# СПРАВОЧНИК
## ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СВЧ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

СПРАВОЧНИК ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СВЧ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

# СПРАВОЧНИК
## по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
**В. И. ВОЛЬМАНА**

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1982

ББК 32.845.8
С74
УДК 621.372.8.049.75.002 (031)

Авторы:

**С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либ,
Н. М. Мамонова, А. Д. Муравцов, А. Г. Саркисьянц,
Р. А. Силин, О. К. Славинский, Д. Д. Ширяев.**

С74 **Справочник** по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. Н. Либ и др.; Под ред. В. И. Вольмана. — М.: Радио и связь, 1982. — 328 с., ил.
В пер.: 1 р. 60 к.

Справочник содержит обширный материал по расчету симметричных, несимметричных, щелевых, копланарных и связанных полосковых линий передачи, а также неоднородностей в них. Даны электрические и конструктивные параметры диэлектрических и проводящих материалов, навесных и пленочных элементов. Рассмотрены этапы конструирования полосковых устройств и технология их изготовления. Приведены библиотека базовых элементов и алгоритмы для систем автоматизированного проектирования.

Для инженеров, конструкторов и технологов, занимающихся разработкой и применением СВЧ полосковых устройств. Может быть полезен студентам вузов при курсовом и дипломном проектировании.

С $\frac{2401000000-061}{046(01)-82}$ 12-82

**ББК 32.845.8
6Ф2.19**

Рецензенты: канд. техн. наук Л. Г. Малорацкий,
канд. техн. наук Э. К. Вилькс, Е. С. Краснов,
Г. М. Эренбург

**Редакция литературы по радиоэлектронике**

**Слав Иванович Бахарев, Владимир Иосифович Вольман, Юлий Наумович Либ и др.**

**СПРАВОЧНИК ПО РАСЧЕТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СВЧ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Редактор **Т. М. Бердичевская.** Художественный редактор **Н. А. Игнатьев**
Художник **Б. К. Шаповалов.** Технические редакторы **Г. З. Кузнецова, Т. Н. Зыкина**
Корректор **Т. Г. Захарова**

**ИБ № 73**

Сдано в набор 3.09.81. Подписано в печать 2 04.82. Т-06471
Формат 60×90 1/16. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая
Усл. печ. л. 20,5. Усл. кр.-отт. 20,5. Уч.-изд. л. 27,01. Тираж 15 000 экз. Изд. № 19753
Заказ 482 Цена 1 р. 60 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46

© Издательство «Радио и связь», 1982

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное решение задач, поставленных XXVI съездом КПСС и «Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», невозможно без широкой автоматизации производства, снижения затрат труда, внедрения систем управления качеством. В области СВЧ техники интенсификация производства, повышение его эффективности и обеспечение высокого качества выпускаемой продукции возможны лишь на базе комплексной миниатюризации с применением интегральных микросхем, микросборок и т. д. Важную роль играют автоматизация труда разработчиков аппаратуры, широкое внедрение унифицированных узлов и элементов, а также внедрение прогрессивной технологии.

Высокая надежность, устойчивость к разнообразным воздействиям, хорошая воспроизводимость параметров и низкая стоимость при массовом производстве, малые масса и габаритные размеры при требуемых электрических характеристиках, возможность практически полной автоматизации как конструирования, так и изготовления, а также ряд других факторов определили быстрое развитие и широкое применение полосковой технологии и полосковых устройств в ОВЧ и СВЧ диапазонах. Переход к массовому производству и необходимость существенного сокращения цикла от разработки до выпуска изделия выявили неэффективность традиционного разделения обязанностей между разработчиком аппаратуры, конструктором и технологом, потребовали повышения уровня знаний всех участников в смежных областях. Центральной фигурой становится новый тип специалиста — конструктор-разработчик, который активно участвует в выборе и расчете электрической схемы узла и его топологии, четко представляя себе назначение, принцип действия и особенности каждого элемента схемы, владеет методами автоматизированного проектирования, хорошо знает все особенности технологического цикла, учитывая возможности и ограничения технологического порядка, нередко определяющие конструкцию узла, умеет использовать эти знания при конструировании, принимая во внимание особенности применения устройства и возможность его серийного производства.

Цель настоящего справочника — предоставить в распоряжение конструктора-разработчика информацию, необходимую для электрического расчета полосковых устройств (гл. 1—3) и их автоматизированного проектирования (гл. 5), конструирования полосковых плат (гл. 1 и 4) и их изготовления (гл. 6). Справочник содержит обширный графический и табличный материал, призванный облегчить и существенно ускорить все этапы разработки, конструирования и изготовления полосковых узлов. Многие его разделы снабжены числовыми примерами.

Современные полосковые устройства очень сложны. Нередко они состоят из десятков, даже сотен отдельных функциональных узлов: делителей, мостов, фильтров, направленных ответвителей и т. д. Однако практически все многообразие функциональных узлов сводится к относительно небольшому числу простейших элементов: отрезки одиночных и связанных линий, изгибы, X- и T-сочленения, изломы и т. д. Поэтому в основу справочника положен декомпозиционный принцип: подробно описаны простейшие элементы и почти не затрагиваются более сложные. Это делает справочник более универсальным, поскольку использование алгоритмов, рассмотренных в гл. 5, позволяет выполнить с помощью ЭВМ полный расчет практически любого линейного полоскового устройства на электродинамическом уровне либо в приближении теории длинных линий. При подборе материала в гл. 2, 3 и 5 учитывалась возможность его использования в системах автоматизированного проектирования. Этим, в частности, обусловлено единообразное описание всех СВЧ элементов с помощью $S$-матриц, наиболее общее и адекватное для цепей, где заметную роль играют волновые процессы.

Справочник охватывает чрезвычайно широкий круг вопросов: от весьма сложного электродинамического анализа до технологии изготовления полосковых устройств и интегральных СВЧ модулей, что неизбежно приводит к определенной конспективности изложения. Естественно, что не все аспекты столь обширной проблемы рассмотрены достаточно полно. Для более подробного ознакомления с тем или иным вопросом можно обратиться к библиографии, составленной на основе разумного компромисса между ее полнотой и ограниченностью объема справочника.

Главы 1 и 4 справочника написаны О. К. Славинским, гл. 2 — В. И. Вольманом, А. Д. Муравцовым и Р. А. Силиным, гл. 3—С. И. Бахаревым и А. Г. Саркисьянцом, гл. 5 — В. И. Вольманом, Д. Д. Ширяевым и Ю. Н. Либом, гл. 6 — Н. М. Мамоновой. Редактирование всех глав выполнено В. И. Вольманом.

Авторы искренне признательны А. Г. Фиалковскому, В. М. Красноперкину, А. И. Гипсману, Г. С. Самохину, А. М. Лереру, А. Г. Чурсину, А. Н. Федорову, предоставившим в их распоряжение результаты некоторых численных расчетов, использованные в гл. 2 и 3, и С. И. Кравченко, разработавшему алгоритм для Фортран-программы и составившему саму программу.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность рецензентам Л. Г. Малорацкому, Э. К. Вильксу, Е. С. Краснову и Г. М. Эренбургу, чьи замечания были учтены при окончательном редактировании и несомненно способствовали улучшению содержания книги.

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания, которые следует направлять в издательство «Радио и связь» по адресу: 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 693.

Глава 1

# МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕХНИКЕ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

## 1.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ [1.1—1.8]

*Относительная диэлектрическая проницаемость* $\varepsilon_r$ — отношение напряженности электрических полей от одного и того же источника в вакууме и безграничной среде диэлектрика. *Комплексная диэлектрическая проницаемость*

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a' - j\varepsilon_a'' = \varepsilon_a' - j\sigma/\omega.$$

*Тангенс угла диэлектрических потерь*

$$\operatorname{tg}\delta = \varepsilon_a''/\varepsilon_a' = \sigma/\omega\varepsilon_a'.$$

*Относительная магнитная проницаемость* $\mu_r$ определяется аналогично диэлектрической. *Комплексная магнитная проницаемость*

$$\mu_a = \mu_a' - j\mu_a'',$$

*тангенс угла магнитных потерь*

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \mu_a''/\mu_a'.$$

*Сопротивление пленочного резистора* $R$ [Ом]:

$$R = (\rho/d)\,(l/b) = \rho_s l/b,$$

где $l$ — длина, $b$ — ширина, $d$ — толщина пленочного резистора, м; $\rho_s$ — сопротивление квадрата ($l/b$) пленки резистивного материала, Ом/□ — не зависит от размеров квадрата; отношение $n = l/b$ называется *числом квадратов резистивной пленки*, следовательно,

$$R = \rho_s n.$$

*Температурный коэффициент сопротивления*

$$\text{ТКС}\,[1/^\circ\,\text{C}] = (\Delta R/R)/\Delta T;$$

Аналогично определяются *температурный коэффициент емкости* ТКЕ, *температурный коэффициент индуктивности* ТКИ и *температурный коэффициент диэлектрической проницаемости* ТК$\varepsilon$.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ [1.9—1.19]

*Плотность* — количество массы в единице объема вещества. Для керамических материалов различают истинную плотность (для равномерно и плотно распределенного вещества) и кажущуюся среднюю плотность для пористого вещества. Наличие пор в объеме уменьшает кажущуюся плотность по сравнению с истинной; в зависимости от способа изготовления керамика одного состава имеет разную плотность.

*Упругость* — свойство твердого тела восстанавливать форму после снятия механического напряжения.

*Механическое напряжение* (нормальное или касательное) $\sigma$ [Па][1] — упругая сила, приходящаяся на единицу площади сечения тела: $\sigma = F/S$.

Мера деформации — $\Delta x/x$, где $\Delta x$ — абсолютная деформация; $x$ — начальный размер. Упругая деформация (на начальном участке) подчиняется закону Гука: $\sigma = k\Delta x/x$, где $k$ — модуль упругости, Па. *Модуль продольной упругости* (*модуль Юнга*) $E$ [Па] — отношение нормального механического напряжения $\sigma$ к соответствующей относительной линейной деформации в пределах упругого участка растяжения (сжатия): $E = \sigma x/\Delta x$.

Для данного случая $E = k$.

*Коэффициент Пуассона* $\mu$ — отношение относительного поперечного сужения (расширения) образца к относительному продольному удлинению (сжатию): $\mu = (\Delta d/d)/(\Delta l/l)$.

*Прочность* — сопротивление механическому разрушению (изгибу, сжатию, растяжению, удару (сдвигу).

*Предел прочности* [Па] — при изгибе, сжатии, растяжении условное механическое напряжение, предшествующее разрушению образца или изменению размеров больше установленного допуска.

Прочность на удар [Дж/м$^2$] — максимальная работа на единицу поверхности при разрушении образца при ударе.

*Модуль сдвига* $G$ [Па] характеризует сопротивление материала деформации сдвига (скола). К образцу (к грани, параллельной плоскости сдвига) прикладывается касательное напряжение $\sigma_\tau$; все плоские слои образца, параллельные плоскости сдвига, смещаются параллельно друг другу. Мера деформации — угол сдвига $\gamma$. *Модуль сдвига* $G = \sigma_\tau/\gamma$. Соотношение между модулем сдвига, коэффициентом Пуассона и модулем Юнга: $G = (1 + \mu)\, E/2$.

*Твердость* [1.14] характеризует сопротивление материала вдавливанию или царапанию (проникновению в материал другого тела) и является сложным свойством, зависящим как от прочности и пластичности материала, так и от метода измерения [1.14—1.16]. В соответствии со способом проникновения различают твердость на вдавливание (микротвердость), склерометрическую твердость (при царапании), абразивную твердость (при сошлифовывании). Микротвердость материалов определяют методами вдавливания. При измерении микротвердости[2] по методу Бринелля используется шарик из закаленной стали диаметром $D = 10{,}5$ или 2,5 мм. Число микротвердости $H_B$ определяется по формуле

$$H_B = 2P/\pi D\,(D - \sqrt{D^2 - d^2}),$$

где $P$ — нагрузка, кгс; $d$ — диаметр отпечатка шарика на материале под действием нагрузки, мм.

При измерении по методу Роквелла [1.17] в материал вдавливается конус (индентор) из алмаза или твердого сплава с углом при вершине 120° или шарик из закаленной стали (диаметром 1,59 мм). Число микротвердости $H_R$ определяется по глубине отпечатка.

По методу Роквелла для измерения твердости мягких материалов (шкала $B$) используется шарик под нагрузкой 100 кгс; получаемые значения $H_{RB}$ — до 100, что по методу Бринелля соответствует 50 ... 240 кгс/мм$^2$. Для материалов средней твердости и твердых (шкала $C$) измерения проводятся с помощью конуса под нагрузкой 60 кгс при этом $H_{RC}$ равно 20 ... 70, что по методу Бринелля соответствует 230 ... 1075 кгс/мм$^2$. Твердость очень твердых материалов (шкала $A$) измеряется с помощью конуса под нагрузкой 150 кгс. При этом $H_{RA}$ свыше 70, что по шкале Бринелля соответствует до 1860 кгс/мм$^2$. Существуют таблицы для перевода шкалы Роквелла в шкалу Бринелля [1.18].

При определении числа микротвердости по методу Виккерса $H_V$ [кгс/мм$^2$] используют алмазную пирамиду с углом при вершине 136°. Нагрузка выбирает-

---

[1] В теории упругости, как и в электродинамике, существуют обозначения $\sigma$, $\mu$, $E$, хотя они относятся к различным понятиям.

[2] Значения нагрузки и число микротвердости приведены без перевода в систему СИ ввиду широкого использования таблиц, изданных ранее.

Таблица 1.1

**Классы шероховатости поверхности ∇**

| ∇ | Подкласс | $R_Z$, мкм | $l_Б$, мм | ∇ | Подкласс | $R_A$, мкм | $l_Б$, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | — | 320...160 | 8,0 | 6 | а | 2,5...2,0 | 0,8 |
| | | | | | б | 2,0...1,6 | |
| | | | | | в | 1,6...1,25 | |
| 2 | — | 160...80 | 8,0 | 7 | а | 1,25...1,0 | 0,8 |
| | | | | | б | 1,0...0,8 | |
| | | | | | в | 0,8...0,63 | |
| 3 | — | 80...40 | 8,0 | 8 | а | 0,63...0,5 | 0,8 |
| | | | | | б | 0,5...0,4 | |
| | | | | | в | 0,4...0,32 | |
| 4 | — | 40...20 | 2,5 | 9 | а | 0,32...0,25 | 0,25 |
| | | | | | б | 0,25...0,2 | |
| | | | | | в | 0,2...0,16 | |
| 5 | — | 20...10 | 2,5 | 10 | а | 0,16...0,125 | 0,25 |
| | | | | | б | 0,125...0,1 | |
| | | | | | в | 0,1...0,08 | |
| 13 | а | 0,1...0,08 | 0,08 | 11 | а | 0,08...0,063 | 0,25 |
| | б | 0,08...0,063 | | | б | 0,063...0,05 | |
| | в | 0,063...0,04 | | | в | 0,05...0,04 | |
| 14 | а | 0,05...0,04 | 0,08 | 12 | а | 0,04...0,032 | 0,25 |
| | б | 0,04...0,032 | | | б | 0,032...0,025 | |
| | в | 0,032...0,025 | | | в | 0,025...0,02 | |

Примечание. Нижняя граница каждого интервала значений относится к данному классу чистоты.

ся равной 5, 10, ..., 100 кгс. При этом твердость $H_V$ алюминия 45 ... 80 кгс/мм², латуни 60—75 кгс/мм², стали 700 ... 900 кгс/мм² (1 кгс/мм² = 9,806 МПа).

*Показателем склерометрической твердости* является ширина царапины, образующейся при воздействии на материал алмазной иглы, твердость при методе Мооса обозначается $H_M$ [1.18][1].

*Показатель абразивной твердости* — объем, сошлифовываемый данным шлифовальным приспособлением и данным абразивом с единицы поверхности материала в единицу времени при определенных давлении и скорости шлифования (единица измерения — мкм/мин [1.13]).

[1] По шкале Мооса число твердости у талька 1, каменной соли 2, алюминия 2,9, известкового шпата 3, меди 3, плавикового шпата 4, никеля 5, апатита 5, полевого шпата 6, кремния 6 ... 7, кварца 7, топаза 8, корунда 9, хрома 9, бора 9,5, алмаза 10.

*Шероховатость поверхности* (ГОСТ 2789—73) [1.19] устанавливается без учета дефектов поверхности (царапин и т. п.). Основными показателями шероховатости поверхности являются величина $R_A$ (табл. 1.1), представляющая собой среднее арифметическое высоты «вершин» и глубины «впадин» профиля поверхности относительно средней линии этого профиля на определенной базовой длине, и аналогично определенная неровность профиля $R_Z$ в десяти точках с максимальным отклонением на определенной базовой длине $l_Б$.

## ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Коэффициент теплопроводности* $K_T$[Вт/(м °С)] численно равен количеству тепла в установившемся тепловом потоке, протекающем в единицу времени через две противоположные грани единицы объема вещества при разности температур в 1° С (иногда используется размерность кал/(см·с °С); 1 кал/см·с °С = = 418,68 Вт/(м ° С)).

*Коэффициент термического линейного расширения* (КТЛР) $\alpha$ [°С$^{-1}$] — отношение приращения $\Delta l$ линейного размера тела $l$ к изменению температуры $\Delta T$, вызвавшему это приращение:

$$\alpha = (1/l)\ (\Delta l/\Delta T).$$

*Термостойкость* — способность тел (например, полимеров, керамики) сохранять эксплуатационные свойства при повышенных температурах определяется максимальной температурой в градусах Цельсия, при которой начинаются химические превращения. Эта температура обычно определяется по изменению массы материала. Иногда термостойкость характеризуют температурой размягчения материала. Температура размягчения по Вика — та, при которой под действием нагрузки стандартный индентор (стальной цилиндрик) вдавливается в испытываемый материал на глубину 1 мм. Длина индентора 3 мм, сечение 1 мм$^2$, диаметр 1,13 мм, нижняя поверхность — плоская. Нагрузка 10,25 или 50,25 Н в зависимости от материала.

Теплостойкость характеризуется температурой в градусах Цельсия, при которой материал еще выдерживает определенную механическую нагрузку без изменения формы. При измерении теплостойкости по Мартенсу консольно закрепленный прямоугольный стержень длиной 120 мм из испытываемого материала помещают под изгибающую нагрузку 5 МПа, которая прикладывается на расстоянии 100 мм от места консольного закрепления. Образец нагревается со скоростью 50°С/ч. Температура, при которой свободный конец образца опустится на 6 мм или сломается, является искомой.

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Группа условий эксплуатации материалов и изделий* (по ГОСТ 14007—68) [1.20]: легкая (Л), средняя (С), жесткая (Ж), очень жесткая (ОЖ). Изделия могут размещаться на открытом воздухе (А), под навесом (Б), в закрытых помещениях без искусственного регулирования климатических условий (В), в закрытых помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (Г).

По содержанию коррозионно-активных веществ в атмосфере выделяют три типа районов: сельская, горная или лесная местность вдали от промышленных объектов (I), промышленный район (II), морская атмосфера (III). Группа условий эксплуатации в зависимости от состояния атмосферы, размещения и района определяется из табл. 1.2.

Диэлектрические материалы испытывают[1] *на теплоустойчивость, морозоустойчивость, термоудар* (термоциклы), *длительную влагоустойчивость* (с конденсацией влаги). В табл. 1.3 приведены условия испытаний диэлектриков для полосковых схем.

[1] Испытания изделий проводятся в соответствии с ГОСТ 16962—71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний».

Таблица 1.2

**Группы условий эксплуатации**

| Тип района | Условие размещения изделий | Группа условий эксплуатации для района | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | с умеренным климатом | с холодным климатом | с тропическим климатом | |
| | | | | сухим | влажным |
| I | А | С | С | С | Ж |
| | Б | С | С | С | Ж |
| | В | С | С | С | Ж |
| | Г | Л | Л | Л | Л |
| II | А | Ж | Ж | С | ОЖ |
| | Б | Ж | Ж | С | ОЖ |
| | В | С | С | С | Ж |
| | Г | Л | Л | Л | С |
| III | А | ОЖ | Ж | — | ОЖ |
| | Б | ОЖ | Ж | — | ОЖ |
| | В | Ж | Ж | — | Ж |
| | Г | С | С | — | С |

Примечания: 1. Район с умеренным климатом: средняя температура — ниже +45°, средняя минимальная — выше —45 °С.

2. Район с холодным климатом: средняя минимальная температура — ниже —45 °С, характеризуется наличием инея, обледенения, ветра со снежной пылью.

3. Район с тропическим сухим климатом: средняя максимальная температура воздуха +40 °С. Интенсивная солнечная радиация, значительные изменения температуры воздуха в течение суток, высокое содержание песка и пыли в воздухе.

4. Район с тропическим влажным климатом: одновременное воздействие высокой влажности и высокой температуры. Сочетание температуры выше 20 °С и относительной влажности выше 80% наблюдается 12 ч в сутки и более за непрерывный период от 2 до 12 месяцев. Для некоторых районов характерны ливневые дожди, воздействие биологических факторов, интенсивная солнечная радиация, конденсация влаги.

Таблица 1.3

**Условия климатических испытаний диэлектриков**

| Вид испытаний | Относительная влажность, % | Температура положительная, °С | Продолжительность испытаний, ч | Температура отрицательная, °С | Продолжительность испытаний, ч | Время выдержки в нормальных условиях, ч |
|---|---|---|---|---|---|---|
| На теплоустойчивость | | 80...150[1] | 2 | — | — | 2 |
| На морозоустойчивость | — — | — | — | —60±2 | 2 | 2 |
| На термоудар[2] | — | 80...150[1] | 1 | —60±2 | 1 | — |
| На длительную влагоустойчивость | 95...100 | 40±2 | 1344 (56 сут.) | — | — | 24 |

[1] В зависимости от типа диэлектрика.
[2] При испытании на термоудар проводится 10 циклов изменения температуры.

Во влажной атмосфере диэлектрики поглощают небольшое количество влаги, что изменяет их механические и электрические свойства. *Влагопоглощение* определяется как увеличение массы образца материала после воздействия влажной атмосферы в течение определенного времени и измеряется увеличением массы образца в процентах.

## 1.2. ДИЭЛЕКТРИКИ

### ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Органическими диэлектриками, используемыми как основания для полосковых схем, являются полимеры — высокомолекулярные соединения, макромолекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев, образованных исходными мономерами.

Большинство полимеров (полистирол, сополимеры) имеет аморфную структуру, некоторые (полиэтилен, политетрафторэтилен) — кристаллическую, чередующуюся с аморфной.

Электрические свойства полимеров определяются полярностью звеньев макромолекул, наличием остаточных функциональных групп и примесями. Неполярные полимеры, полученные полимеризацией (полиэтилен, полистирол, фторопласт), отличаются большим объемным сопротивлением ($10^{14}$ ... $10^{16}$ Ом·м), малым углом диэлектрических потерь (порядка $10^{-4}$), низкой диэлектрической проницаемостью (порядка 2,0 ... 2,4). Поликонденсационные полярные полимеры (полиамидные, полиэфирные) имеют меньшее объемное сопротивление, бо́льшие $\varepsilon_r$ и $\operatorname{tg}\delta$, которые сильнее зависят от температуры.

Для изготовления листовых материалов используются органические полимеры без наполнителей (ненаполненные), с наполнителями (наполненные), армированные стекловолокном или стеклотканью, плакированные[1]. Наполнение производится порошками (мелкодисперсными) различных неорганических веществ (окислов, керамик), что позволяет получать различные значения диэлектрической проницаемости материалов. Армирование и плакирование улучшают механические характеристики материалов (увеличивают жесткость, уменьшают прогиб листа и т. п.).

В табл. 1.4 приведены характеристики отечественных диэлектриков, созданных на основе органических полимеров: полиэтилена, политетрафторэтилена, полистирола, поликарбоната (дифлона), полифениленоксида.

**Фторопласт-4 (политетрафторэтилен, тефлон) фольгированный (ФФ-4).** Ненаполненный диэлектрик, относящийся к органическим карбоцепным[2] полимерам, получаемый полимеризацией тетрафторэтилена. Цвет — молочный, при обработке под склейку — коричневый.

Пластины из ФФ-4 изготовляются прессованием порошка этого полимера в закрытых прессформах при высокой температуре. Одновременно производится металлизация медной оксидированной или хромированной фольгой толщиной 30 ... 50 мкм. Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 150 Н/м. ФФ-4 выдерживает все виды механической обработки, стоек к воздействию химических веществ, используемых в технологии изготовления полосковых схем, допускает пайку при температуре до 260° С в течение 10 с, не поглощает влаги, может использоваться в рабочем диапазоне температур — 50 ... + 150° С.

Основные недостатки: деформируется под нагрузкой вследствие низкой поверхностной твердости; после удаления фольги заметно (до 0,7%) уходят размеры фольгированного материала. Уход размеров наблюдается также при длитель-

---

[1] Плакирование — покрытие листовых изделий слоем металла или диэлектрика для защиты от воздействия внешней среды или механического разрушения. Листовые диэлектрики плакируются листами легких сплавов с высокой проводимостью, плакирующий слой может быть использован в качестве земляной пластины полосковой схемы.

[2] Карбоцепный полимер — полимер, у которого основная цепь построена из атомов углерода. Это частный случай гомоцепных полимеров, у которых основная цепь построена из одинаковых атомов.

Таблица 1.4

**Характеристики органических диэлектриков**

| Марка диэлектрика | $\varepsilon_r$ [2] | $tg\delta$ [3] $\cdot 10^4$ | Пробивное напряжение, МВ/м | Плотность, г/см³ | $H_B$, кгс/мм² | Предел прочности, МПа, при | | | Теплостойкость по Мартенсу, °С | $K_T$, Вт/м° С | КТЛР $\cdot 10^5$, °С$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | изгибе | сжатии | растяжении | | | |
| ФФ-4 | 2,0±0,1 | 3 | 25 | 2,1...2,3 | 3,0...4,0 | 11,0 | 12,0 | 14,0 | 250 | 0,23 | 8...23 |
| ФАФ-4 | 2,6±0,2 | 10 | — | 2,6...2,9 | 7,5 | 21,0 | — | 80,0 | — | 0,21 | 5 |
| ФАФ-4СКЛ | 2,5±0,2 | 8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| САМ-Э | 2,5±0,1 | 6 | 30 | 1,12 | 16...17 | 100,0 | — | 26,0 | 96,0 | — | 7,5 |
| СА-3, 8Ф | 3,8±0,1 | 8 | 28 | 1,8 | 30,0 | 40,0 | 105,0 | 30,0 | 120,0 | 0,37 | 3,5, |
| СТ-3 | 3,0±0,15 | 9 | 24 | 1,1...1,25 | 18,0 | 50,0 | 90,0 | 30,0 | 95,0 | 0,14 | 4...12 |
| СТ-5 | 5,00±0,25 | 9 | 21 | 1,45...1,65 | 20,0 | 50,0 | 90,0 | 25,0 | 95,0 | 0,21 | 4...12 |
| СТ-7 | 7±0,35 | 15 | 19 | 1,7...1,8 | 25,0 | 50,0 | 90,0 | 20,0 | 100,0 | 0,26 | 3...10 |
| СТ-10 | 10,0±0,5 | 20 | 15 | 1,85...2,1 | 28 | 45 | 100 | 15 | 100 | 0,33 | 3...10 |
| СТ-16 | 16,0±0,8 | 30 | 10 | 2,4...2,76 | 35 | 35 | 105 | 10 | 110 | 0,46 | 2...8 |
| ПТ-3 | 2,74±0,14 | 11 | 26 | 1,05...1,15 | 16 | 50 | 90 | 30 | 80 | 0,14 | 6...12 |
| ПТ-5 | 5,0±0,25 | 11 | 21 | 1,4...1,6 | 20 | 40 | 90 | 25 | 80 | 0,21 | 5...12 |
| ПТ-7 | 7,0±0,35 | 15 | 19 | 1,7...1,8 | 20 | 50 | 90 | 20 | 85 | 0,26 | 4...10 |
| ПТ-10 | 10,0±0,5 | 20 | 15 | 1,95...2,1 | 25 | 45 | 100 | 15 | 85 | 0,33 | 3...10 |
| ПТ-16 | 16±0,8 | 30 | 10 | 2,4...2,6 | 30 | 35 | 100 | 10 | 90 | 0,46 | 2...8 |
| ПВП-М | 2,35±0,05 | 5 | 45 | 0,95 | 4,5...5,9 | 30 | — | 25 | 130 | 0,22 | 2,4 |
| АПЛ-Ф-2,65 | 2,65±0,15 | 30 | — | 1,07...1,27 | — | — | — | — | — | — | — |
| АПЛ-Ф-3,8 | 3,8±0,15 | 40 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| АФ-2,5 | 2,5±0,1 | 6 | 16 | 1,06 | 12,5 | 80 | 100 | 68 | 185 | 0,21 | 5,2 |
| ФА | 2,7 | 6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ФЛАН-2,8 | 2,8±0,1 | 15 | 15 | 1,1...1,3 | 15,5 | 80 | 104 | 95 | 190[1] | 0,2 | 3,5 |
| ФЛАН-3,8 | 3,8±0,1 | 12 | 15 | 1,7...1,9 | 19,0 | 80 | 157 | 75 | 200[1] | 0,3 | 3,8 |
| ФЛАН-5 | 5,0±0,2 | 15 | 14 | 1,45...1,65 | 19,9 | 80 | 126 | 75 | 200[1] | 0,25 | 5 |
| ФЛАН-7,2 | 7,2±0,3 | 15 | 12 | 1,75...1,95 | 22,3 | 80 | 158 | 75 | 200[1] | 0,3 | 4 |
| ФЛАН-10 | 10,0±0,5 | 15 | 12 | 2,0...2,2 | 23,7 | 80 | 176 | 75 | 200[1] | 0,4 | 3,5 |
| ФЛАН-16 | 16,0±0,8 | 15 | 8 | 2,5...2,7 | 25,3 | 80 | 201 | 46 | 200[1] | 0,5 | 2,5 |

| Марка диэлектрика | $\varepsilon_r$ [2] | tgδ [2]·10⁴ | Пробивное напряжение, МВ/м | Плотность, г/см³ | $H_B$, кгс/мм² | Предел прочности, МПа, при | | | Теплостойкость по Мартенсу, °С | $K_T$, Вт/м°С | КТЛР·10⁵, °С⁻¹ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | изгибе | сжатии | растяжении | | | |
| СФ1-35 | 6,0 | 250 | — | 1,6...1,85 | — | 70 | — | 70 | 185[1] | 0,28 | — |
| СФ-2Н-50 | 6,0 | 250 | — | 1,6...1,85 | — | 70 | — | 70 | 185 | 0,28 | — |
| СФГ-230-2-50 | 6,0 | 250 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ПКТ-3 | 3±0,15 | 50 | 19 | 1,3 | 8,3...9,5 | 100 | 78 | 50 | 150[1] | 0,23 | 6,5 |
| ПКТ-5 | 5,0±0,25 | 48 | 17 | 1,7 | 11,1...11,4 | 70 | 32 | 55 | 155[1] | 0,35 | 5,5 |
| ПКТ-10 | 10,0±0,5 | 45 | 12 | 2,2 | 16,5...17,3 | 60 | 26 | 56 | 162[1] | 0,5 | 4,2 |
| ФМ-2 | 2,3 | 20 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ПФП | 2,35±0,05 | 5 | — | 0,95 | 4,5...5,9 | — | — | — | — | 0,42 | 2,45 |
| АЛ-2,5 | 2,5 | 6 | 16 | 1,06 | 12,5 | 80 | 100 | 68 | 185 | 0,21 | 5,2 |

[1] По Вика.
[2] Значения $\varepsilon_r$ и tg δ приведены на частоте $10^{10}$ Гц, а для материалов ФАФ-4СКЛ, АПЛ-Ф, ФА, СФ, СФГ — на частоте $10^6$ Гц.
[3] Удельное объемное электрическое сопротивление органических диэлектриков $10^{14}$ ... $10^{18}$ Ом · м (САМ-Э—3 · $10^{18}$ Ом · м; ПТ-3—$10^{17}$ Ом · м; ФФ-4—$10^{18}$ Ом · м; ФАФ-4—$10^{17}$ Ом · м; ФЛАН-2,8—5 · $10^{16}$ Ом · м; ПКТ-5—1 · $10^{15}$ Ом · м; ПКТ-$10^{14}$ Ом · м).

ном воздействии повышенной температуры (до 2% после нагрева в течение 48 ч). Возможна также нестабильность геометрических размеров полосковой платы в процессе длительной эксплуатации. Технические условия на материал ФФ-4: ТУ-6-05-1416—71.

**Фторопласт-4 армированный (ФАФ-4).** Прессованный материал, представляющий собой многослойную пластину из стеклоткани на основе стекловолокна марки Э (изготовленного из фторопласта-4Д, толщина волокна 0,1 мм). Стеклоткань многократно пропитывается суспензией фторопласта-4Д до содержания связующего вещества не менее 75%. Пластины из ФАФ-4 изготовляют прессованием пачки листов пропитанной стеклоткани, облицованной медной фольгой (толщиной 30 ... 50 мкм). Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 800 Н/м.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_r$: 2,6 ± 0,2 в направлении, перпендикулярном слоям пластины, и 3,0 ± 0,3 в направлении, параллельном слоям; tg δ 1·$10^{-3}$ и 3,5·$10^{-3}$ соответственно.

Материал допускает все виды механической обработки, стоек к воздействию химических веществ, используемых в технологии изготовления полосковых схем, устойчив к действию агрессивных сред, обладает, в отличие от ФФ-4, высокой механической прочностью, выдерживает пайку при температуре до 260° С в в течение 10 с. Рабочий диапазон температур — 60 ... + 250° С. Уход размеров для ФАФ-4 не более 0,2% после изготовления полосковой платы, — 0,09% после воздействия повышенной температуры (до 48 ч).

Основные недостатки: самое большое водопоглощение среди органических материалов (0,3% за 24 ч) и низкая влагостойкость с торцов пластины. Материал соответствует ГОСТ 21000—75. Разновидность этого материала ФАФ-

4СКЛ отличается тем, что при его изготовлении в качестве связующего используется сырая каландрированная пленка из фторопласта-4Д. Технические условия на материал ФАФ-4СКЛ: ТУ-02-14-29—75.

**Сополимер стирола с α-метилстиролом (САМ-3).** Ненаполненный диэлектрик, относящийся к органическим карбоцепным полимерам, продукт сополимеризации стирола с α-метилстиролом. Изготовляется прессованием порошка полимера, металлизируется фольгой при прессовании или электрохимическим способом. Прочность сцепления фольги с диэлектриком[1] при прессовании — не менее 300 Н/м, электрохимически осажденного слоя 100 Н/м.

Выдерживает механическую обработку и технологические воздействия при изготовлении полосковых схем (воздействие кислот, низших спиртов, щелочей). Допускает пайку при температуре 140° С в течение 3 ... 4 с, водопоглощение невелико (менее 0,1% за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 80° С. Изменение линейных размеров материала: до 0,14% после технологического цикла, 0,2% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основные недостатки: хрупкость, возможность растрескивания при механических нагрузках, низкая теплостойкость, растворимость в ароматических и хлорированных углеводородах. Технические условия на материал: ТУ 6-05.1580—75.

**Сополимер стирола с α-метилстиролом с наполнением алундом (СА-3,8Ф).** Наполненный диэлектрик на основе САМ-Э, изготовляемый прессованием. При серийном выпуске имеет бо́льшую по сравнению с САМ-Э равномерность диэлектрической проницаемости по площади листов и от партии к партии. Металлизируется медной фольгой в процессе прессования, прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 600 Н/м. Механически обрабатывается твердосплавным инструментом, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем аналогично материалу САМ-Э, хорошо склеивается с аналогичными материалами (САМ-Э, СТ-3 и т. п.) и металлами. Допускает пайку при температуре 180° С в течение 4 с, водопоглощение низкое — 0,1% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 90° С. Изменение линейных размеров: 0,2% после технологического цикла, 0,05% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основные недостатки: низкая механическая прочность, возможность растрескивания при механических нагрузках, низкая теплостойкость, растворимость в ароматических и хлорированных углеводородах. Технические условия на материал: ТУ 16-503-108—72.

**Сополимер стирола с α-метилстиролом, наполненный двуокисью титана (СТ-3, СТ-5, СТ-7, СТ-10, СТ-16, СТФ).** Наполненный диэлектрик на основе САМ-Э, изготовляемый прессованием. Диэлектрическая проницаемость растет от 3 до 16 при увеличении процентного содержания наполнителя — двуокиси титана. Цвет: слоновой кости (СТ-3), оранжевый (СТ-5), светло-зеленый (СТ-7), розовый (СТ-10), молочный (СТ-16). Материал металлизируется медной фольгой в процессе прессования либо электрохимическим способом. Прочность сцепления фольги с диэлектриком при прессовании — не менее 300 Н/м, при электрохимическом способе 200 Н/м.

Материал допускает все виды механической обработки, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем аналогично материалу САМ-Э, хорошо склеивается с другими материалами данной группы и металлами. Допускает пайку при температуре 140° С в течение 4 с, водопоглощение 0,1% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 95° С. Изменение линейных размеров: 0,02% после технологического цикла, 0,03% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основные недостатки: низкая ударная прочность, невысокая теплостойкость, растворимость в ароматических и хлорированных углеводородах.

**Полистирол, наполненный двуокисью титана (ПТ-3, ПТ5, ПТ-7, ПТ-10, ПТ-16).** Наполненный диэлектрик на основе полистирола, изготовляемый прессованием. Диэлектрическая проницаемость растет от 3 до 16 при увеличении содержания наполнителя — двуокиси титана. Цвет: светло-коричневый

[1] Адгезия при отслаивании измеряется в единицах силы, приходящейся на единицу ширины полоски.

(ПТ-3), сиреневый (ПТ-5), голубой (ПТ-7), желтый (ПТ-10), серый (ПТ-16). Материалы металлизируются медной фольгой в процессе прессования либо электрохимическим способом. Прочность сцепления фольги с диэлектриком при прессовании — не менее 300 Н/м, при электрохимической металлизации 200 Н/м.

Материал допускает все виды механической обработки, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, хорошо склеивается с металлами и материалами данной группы. Допустимая температура пайки 140° С (4 с), водопоглощение 0,15% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 80° С, высокая стабильность размеров. Изменение линейных размеров: 0,01% после технологического цикла, 0,03% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основные недостатки: низкая ударная прочность, невысокая теплостойкость (ниже, чем у материалов типа СТ), растворимость в ароматических и хлорированных углеводородах, разброс диэлектрической проницаемости от партии к партии при серийном изготовлении.

**Полиэтилен высокой плотности (ПВП-М) со стабилизирующими добавками, облученный.** Ненаполненный органический карбоцепный полимер, относящийся к полиолефинам, продуктам полимеризации непредельных углеводородов олефинового ряда (в данном случае этилена). Изготовляется литьем под давлением либо прессованием. Металлизируется электрохимическим способом, прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 300 Н/м.

Материал легко обрабатывается механически, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, химически стоек в агрессивных средах, допустимая температура пайки 140° С (4 с). Водопоглощение низкое: 0,01% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 80° С.

Основные недостатки: низкая теплостойкость, возможность растрескивания в напряженном состоянии, снижение химической стойкости при температурах выше 50° С. Стабильность линейных размеров материала невысока: 0,3% после технологического процесса, 0,45% после воздействия повышенных температур (48 ч). Технические условия: ТУ 6-05-041-526—74.

**Полиэтилен, наполненный алундом (АПЛ, АПЛ-Ф).** Наполненный диэлектрик на основе ПВП-М. Изготовляется прессованием при одновременной металлизации медной фольгой. Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 600 Н/м.

Материал хорошо обрабатывается механически, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, допустимая температура пайки 140° С (3 ... 4 с), водопоглощение 0,01% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 80° С. Изменение линейных размеров: 0,9% после технологического цикла, 1,5% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основные недостатки: низкая теплостойкость, значительная усадка и коробление пластин при изготовлении полосковых плат. Технические условия: ТУ ИМО 509-064—75.

**Поликарбонат, наполненый двуокисью титана (ПКТ-3, ПКТ-5, ПКТ-10).** Наполненный диэлектрик на основе поликарбоната двухатомного фенола «Дифлон», синтезируемого из дифенилпропана и фосгена. Относится к числу органических синтетических гетероцепных полимеров (сложный полиэфир). Наполнитель — двуокись титана в различном процентном содержании, что позволяет получать ряд дискретных значений диэлектрической проницаемости. Листовой материал изготовляется прессованием, одновременно облицовывается медной фольгой. Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 800 Н/м. Материал допускает все виды механической обработки, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, обладает высокой механической прочностью, допустимая температура пайки 260° С (5 с), водопоглощение 0,01% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 135° С. Изменение линейных размеров: 0,1% после технологического цикла, не более 0,1% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основной недостаток: низкая стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам. Технические условия: ТУ 16-603-156—77.

**Полиэтилен фольгированный плакированный радиотехнический (ПФП).** Ненаполненный диэлектрик, выпускаемый в виде трехслойных листов: медная фольга—полиэтилен—алюминий Д16АТ. Разновидности материала: ПФП-20-1,5;

ПФП-20-1,5-2,5; ПФП-20-2-3,0; ПФП-35-1-1,5; ПФП-35-1,5-2,5; ПФП-35-2-3,0. Цифры в названии обозначают (в порядке их расположения): толщину фольги, мкм; толщину диэлектрика, мм; толщину алюминиевой пластины, мм. Все характеристики материала аналогичны характеристикам ПВП-М.

**Арилокс (полифениленоксид) марок АЛ, ФА, АФ.** Ненаполненный диэлектрик из числа органических гетероцепных[1] полимеров, относящийся к простым полиэфирам, получаемый из 2,6-диметилфенола в жидкой фазе. Цвет материала — коричневый. Пластины из диэлектрика получаются прессованием при одновременной металлизации медной фольгой. Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 800 Н/м.

Материал обладает высокой механической прочностью, допускает все виды механической обработки, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, устойчив к действию кислот и щелочей. Допустимая температура пайки 260° С (до 10 с), водопоглощение 0,1% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 150° С, уход линейных размеров: 0,15% после воздействия технологического цикла, 0,7% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основной недостаток: низкая стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам.

Листовой и фольгированный материал имеет марки ФА6, ФА, АФ-2,5, ФА-10, АЛ-2,5. Буква Л обозначает листовой материал, Ф — фольгированный. Технические условия: ТУ ИМО 509-057—73; ТУ-6-05-041-404 (НФ)—74.

**Арилокс, наполненный алундом или двуокисью титана.** Наполненный диэлектрик на основе полифениленоксида, изготовляемый прессованием. Диэлектрическая проницаемость растет от 2,8 до 16 при увеличении содержания наполнителя. Пластины из этого материала изготовляются прессованием с одновременной металлизацией медной фольгой. Прочность сцепления фольги с диэлектриком — не менее 800 Н/м. Цвет материала: темно-коричневый (до черного) ФЛАН-2,8; коричневый ФЛАН-3,8; светло-коричневый ФЛАН-5; ФЛАН-7; серый ФЛАН-10; зеленый ФЛАН-16. Материал обладает высокой механической прочностью, требует использования при механической обработке твердосплавного инструмента, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, устойчив к действию кислот и щелочей. Марка фольгированного листового материала — ФЛАН. Допустимая температура пайки 260° С (10 с), водопоглощение 0,1 ... 0,2% (за 24 ч), диапазон рабочих температур — 60 ... + 150° С. Уход линейных размеров: 0,05% после технологического цикла, 0,1% после воздействия повышенных температур (48 ч).

Основной недостаток: низкая стойкость к ароматическим и хлорированным углеводородам. Технические условия: ТУ 16 503.148—75.

**Стеклотекстолит.** Слоистый прессованный материал, изготовленный из листов стеклоткани (из волокна марки «Э» — электроизоляционного — толщиной 0,1 мм) и пропитанный термореактивным связующим — эпоксидной смолой, отверждаемой смолой новолачного или резольного типа. Листовой стеклотекстолит получают в результате прессования пачки листов стеклоткани, пропитанных связующим и облицованных медной фольгой (типа ФМЭО — оксидированной медной электролитической фольгой — толщиной 35 и 50 мкм; типа ФМЭОШ — оксидированной медной электролитической фольгой повышенной шероховатости — толщиной 35 ... 50 мкм). Для приклейки фольги к диэлектрику используется клей БФ-4, наполненный пылевидным кварцем. Прочность сцепления фольги с диэлектриком 800 ... 1000 Н/м.

Материал допускает механическую обработку, выдерживает технологические воздействия при изготовлении полосковых схем, хорошо склеивается с аналогичными диэлектриками и металлами. Допустимая температура пайки 260° С (10 ... 15 с). Водопоглощение значительное: 1,5 ... 3% (за 24 ч). Диапазон рабочих температур — 60 ... + 85° С, нагревостойкий стеклотекстолит допускает возможность эксплуатации его при температурах до 180 ... 200° С в течение 50 ... 100 ч.

---

[1] Гетероцепный полимер — полимер, у которого основная часть построена из разных элементов, например у полифениленоксида из углерода, водорода, кислорода.

Основной недостаток: высокие диэлектрические потери и разброс диэлектрической проницаемости от партии к партии, что определило ограниченную область применения стеклотекстолита на СВЧ (в основном в качестве несущей конструкции полосковых линий с воздушным заполнением). В соответствии с ГОСТ 10316—70 применяются следующие марки стеклотекстолита: СФ-1-35, СФ2И-50 (нагревостойкий), СФГ230-1-35, СФГ-230-2-50 (с покрытием гальваностойкой фольгой).

**Зарубежные органические диэлектрики.** Состав в основном сходен с составом отечественных. Ниже приведены характеристики наиболее распространенных из них [1.23]:

фторопласт (тефлон), армированный стеклотканью: $\varepsilon_r = 2{,}4 \ldots 2{,}62$; $\mathrm{tg}\delta = (15 \ldots 20)\cdot 10^{-4}$; теплостойкость по Мартенсу 250° С; $K_т = 0{,}29$ Вт/(м° С); КТЛР $= 1{,}8\cdot 10^{-5}$ ° С$^{-1}$;

фторопласт, наполненный стекловолокном: $\varepsilon_r = 2{,}32 \ldots 2{,}4$; $\mathrm{tg}\,\delta = (4 \ldots 8)\cdot 10^{-4}$; теплостойкость по Мартенсу 250° С; $K_т = 0{,}25$ Вт/(м° С); КТЛР $= 1{,}6\cdot 10^{-5}$° С$^{-1}$;

облученный полиолефин (аналог полиэтилена): $\varepsilon_r = 2{,}32$; $\mathrm{tg}\delta = 3\cdot 10^{-4}$; $K_т = 0{,}53$ Вт/(м·° С); КТЛР $= 10{,}8\cdot 10^{-5}$° С$^{-1}$;

полистирол: $\varepsilon_r = 2{,}5$; $\mathrm{tg}\,\delta = (2{,}5 \ldots 6)\cdot 10^{-4}$; теплостойкость по Мартенсу 60° С; $K_т = 0{,}15$ Вт/(м·°С); КТЛР-$7\cdot 10^{-5}$ °С$^{-1}$;

полистирол, наполненный стекловолокном: $\varepsilon_r = 2{,}62$; $\mathrm{tg}\,\delta = 4\cdot 10^{-4} — 2 \times 10^{-3}$; теплостойкость по Мартенсу 60° С; $K_т = 0{,}2$ Вт/(м·° С); КТЛР $= 5{,}7 \times 10^{-5}$ ° С$^{-1}$;

полифениленоксид: $\varepsilon_r = 2{,}55$; $\mathrm{tg}\,\delta = 16\cdot 10^{-4}$; теплостойкость по Мартенсу 150°С; $K_т = 0{,}19$ Вт/(м·° С); КТЛР $= 2{,}9\cdot 10^{-5}$° С$^{-1}$;

полиэфирные, силиконовые и другие смолы, наполненные керамической пудрой для создания широкого диапазона диэлектрических проницаемостей; $\varepsilon_r = 1{,}7 \ldots 25$; $\mathrm{tg}\,\delta = 5\cdot 10^{-4} \ldots 5\cdot 10^{-3}$; теплостойкость по Мартенсу 200° С; $K_т = 0{,}13$ Вт/(м·° С); КТЛР $= (2{,}2 \ldots 3{,}2)\cdot 10^{-5}$° С$^{-1}$;

фторопласт, армированный кварцевой тканью: $\varepsilon_r = 2{,}47$; $\mathrm{tg}\,\delta = 6\cdot 10^{-4}$; теплостойкость по Мартенсу 200° С; $K_т = 0{,}13$ Вт/(м·° С); КТЛР $= (2{,}2 \ldots 3{,}2)\cdot 10^{-5}$;

гибкий диэлектрик на основе тефлона с керамическим наполнением, имеющий свойства, аналогичные керамике из окиси алюминия, «ЭПСИЛАМ-10». Этот материал хорошо обрабатывается механически, поставляется в виде стандартных листов 228,6 × 228,6, мм толщиной 0,25 ... 2,5 мм; $\varepsilon_r = 10 \pm 0{,}2$ в диапазоне частот 1 ... 10 ГГц; $\mathrm{tg}\,\delta = 2\cdot 10^{-3}$; $K_т = 0{,}37$ Вт/(м·° С); КТЛР $= (2 \ldots 2{,}5)\cdot 10^{-5}$° С$^{-1}$; температурный коэффициент $\varepsilon_r$ в диапазоне температур — 50 ... + 170° С составляет $0{,}57\cdot 10^{-3}$° С$^{-1}$. «ЭПСИЛАМ-10» обычно выпускается фольгированным с двух сторон медью или плакируется жесткой алюминиевой пластиной.

## НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

**Керамика на основе окиси алюминия (глиноземистая).** Керамические материалы называются в зависимости от содержания окиси алюминия глиноземистым фарфором, ультрафарфором, корундово-муллитовой керамикой, алюмооксидом, ГБ-7, микролитом, поликором, 22ХС и т. д. [21]. Метод изготовления керамических изделий можно разбить на три основных этапа: приготовление керамической массы, оформление изделий (например, прессованием), сушка (спекание) и обжиг. Готовое изделие может быть подвергнуто дополнительной механической обработке для уменьшения степени шероховатости его поверхности или глазурованию[1] для улучшения класса обработки поверхности, сниже-

[1] Нанесение глазури — тонкого (0,1 ... 0,2 мм) стекловидного слоя, прочно сплавленного с поверхностным слоем керамического изделия. Тугоплавкая глазурь наносится на необожженное изделие и расплавляется одновременно с окончательным спеканием керамики, легкоплавкая, наносится на спеченную керамику и расплавляется при температуре более низкой, чем температура обжига изделия.

ния возможности загрязнений, увеличения поверхностного и объемного сопротивления и т. д. Цвет керамики зависит от состава и может быть белым, бело-полупрозрачным (поликор), от темно-коричневого до сиреневого (22Х, 22ХС), слабо-желтоватым (ГМ-1).

Материалы металлизируются термовакуумным, электрохимическим способами, приклейкой фольги и т. д. Прочность сцепления слоя металлизации с диэлектриком различна в зависимости от способа металлизации и находится в пределах от 2 МПа (при электрохимической металлизации) до 15 МПа (при термовакуумной[1]).

Керамика отличается высокой механической прочностью, твердостью (микротвердостью), стабильностью размеров во времени и при воздействии технологических процессов изготовления полосковых схем (воздействие кислот, щелочей, растворителей). Механическая обработка керамики проводится алмазным инструментом или с помощью ультразвуковых и лазерных методов. Керамические материалы допускают воздействие высокой температуры 1300° С при технологических процессах, диапазон рабочих температур — 60 ... +700° С. Водопоглощение весьма мало́ и зависит от пористости керамики (0 для керамики «Поликор», 0,02% для 22ХС). Коэффициент теплопроводности керамики существенно превышает аналогичный параметр органических диэлектриков (табл. 1.5).

Наилучшими характеристиками (повторяемость параметров в серии, потери на СВЧ, теплопроводность и т. п.) обладают подложки из материалов, содержащих 98 ... 100% окиси алюминия ($Al_2O_3$): поликор (99,7%), сапфирит (98%), ГМ (99,6%), А-995 (99,8%), КМ[2]. Особо следует выделить монокристаллическую окись алюминия (сапфир), которая как чистый материал превосходит по своим электрическим и механическим характеристикам керамические материалы, имея малые диэлектрические потери (tg $\delta$ — менее $1 \cdot 10^{-4}$), высокую однородность структуры, хорошо обрабатывается до 14-го класса чистоты поверхности. Последнее позволяет использовать сапфир в качестве подложки для локального осаждения полупроводниковых материалов при создании интегральных микросхем без навесных активных компонентов, что расширяет частотный диапазон ИС [1.24]. Следует, однако, отметить трудность изготовления сапфира и соответственно высокую стоимость подложек из него.

Получили также распространение керамические материалы с меньшим процентом окиси алюминия (91 ... 96%): например, керамика 22ХС содержит 94,4% окиси алюминия ($Al_2O_3$); 2,76% двуокиси кремния ($SiO_2$); 0,49% окиси хрома ($Cr_2O_3$); 2,35% двуокиси марганца ($MnO_2$); кристаллическая фаза 82 ... ... 86%; стеклофаза 10 ... 12%; пористость 4 ... 6%; керамика ВГ-1 содержит 95,3% $Al_2O_3$; 3,3% $SiO_2$; 0,2% окиси кальция (CaO); 1,2% окиси магния (MgO); кристаллическая фаза 72 ... 85%; стеклофаза 11 ... 12; пористость 3 ... 7%.

**Керамические материалы с повышенной диэлектрической проницаемостью.** В полосковых схемах и их элементах находит применение керамика с повышенной диэлектрической проницаемостью (выше 10). Она используется в качестве подложек СВЧ схем с высокой степенью интеграции и в СВЧ конденсаторах.

Для получения заданных свойств материалов с повышенным значением $\varepsilon_r$ нередко сочетают кристаллические фазы разного типа (с различными $\varepsilon_r$) или используют твердые растворы в зависимости от назначения применяемого материала и конкретных требований к нему. Один из основных методов изготовления высококачественных подложек с высокой диэлектрической проницаемостью — горячее прессование при температуре выше 1200° С.

Большинство керамических материалов с повышенной диэлектрической проницаемостью разработано и используется в качестве высокочастотной конденсаторной керамики. Однако возможность изготовления из них пластин, обладаю-

---

[1] Адгезию при отрыве измеряют в единицах силы на площадь поверхности.

[2] Рассматриваемые керамические материалы состоят в основном из мелкокристаллических частиц $Al_2O_3$ (поликристаллическая структура) и небольшого количества окислов других металлов (например, MgO, BaO и т. п.); присутствуют и аморфные включения (стеклофаза); некоторую часть объема занимают поры (закрытые или открытые). Лучшие электротехнические и механические свойства имеет мелкозернистая керамика с минимальным содержанием стеклофазы и минимальной пористостью.

Таблица 1.5

**Характеристики неорганических диэлектриков**

| Марка диэлектрика | $\varepsilon_r$ | $tg\delta \cdot 10^4$ | Пробивное напряжение, МВ/м | Плотность, г/см³ | Микротвердость $H \cdot 10^{-3}$, МПа | Предел прочности (при статическом изгибе), МПа, не менее | Модуль упругости (при 20°С), МПа $10^{-4}$, не менее | Теплостойкость, °С | $K_т$, Вт/м°С | КТЛР·$10^7$, °С$^{-1}$ | ТК$\varepsilon \cdot 10^6$, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Поликор[1] | 9,6±0,2 | 1 | 20...25 | 3,96 | 25...27 | 280 | 38 | — | 31,5 | 80±5 | 76,5 |
| Сапфирит | 9,5±0.2 | 1 | 40 | 3,88 | — | 300 | 30...40 | — | 21 | 62±5 | 134 |
| ГМ | 9,5±0.2 | 1 | 50 | 3.88 | 23...24 | 220...300 | 35 | — | 16,7...21 | 62...66 | 175 |
| Сапфир | 9,4...11,7 | 1 | — | 3,98 | 20...23 | — | 35 | 1900 | 25...40 | 50...60 | — |
| А-995 | 9,7 | 1 | 30 | 3,85 | — | 320 | — | — | 21 | 60±5 | 155 |
| КМ-1 | 7,0...7,5 | 16 | 30 | 3,2 | — | 220 | — | — | 15 | 34±2 | 120 |
| 22ХС[2] | 9,3±0,3 | 15 | 50 | 3,65 | 22...25 | 320 | 31 | 1240 | 13,8 | 60±5 | 81,5 |
| ВГ-IV | 9,3 | 10 | 30 | 3,67 | — | 310 | — | — | 10,1 | — | — |
| ГБ-7 | 9,05 | 3 | 35 | 3,85 | — | 320 | — | 1120 | — | 55±5 | 100 |
| Миналунд-7 | 9,05 | 3 | 50 | 3,6 | 21...22 | 300 | 30 | 1205 | 10,5 | 57 | 101 |
| УФ-61[3] | 9,05±0,01 | 8 | 20 | — | — | 245 | — | — | — | 50...65 | 100±30 |
| П-68 | 9,5±1 | 1 | 20 | — | — | 245 | — | — | — | 50...65 | 100±30 |
| МА-12 | 12±1 | 1 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 100±30 |
| ТМ-15 | 15±1 | 1 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 100±30 |
| ТМ-20 | 20±1,5 | 5 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | —75±60 |
| ТМ-25 | 25±1,5 | 5 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 75±60 |
| ТЛ/25 | 25±1,5 | 6 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 47±30 |
| ТЛ/33 | 30±1,5 | 5 | 8 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 33±30 |
| ТЛ/0 | 40±2 | 6 | 7 | — | — | 68 | — | — | — | 120 | 0±20 |
| ТЛ/47 | 45±2 | 6 | 8 | — | — | 78 | — | — | — | 120 | —47±20 |
| ТЛ/75 | 50±2 | 6 | 8 | — | — | 78 | — | — | — | 120 | —150±40 |
| ТЛ/330 | 60±2 | 6 | 8 | — | — | 78 | — | — | — | 120 | —330±60 |
| ТЛ/470 | 80±2 | 8 | 8 | — | — | 78 | — | — | — | 120 | —470±90 |
| ТЛ/750 | 100±10 | 2 | 8 | — | — | 78 | — | — | — | 120 | —750±100 |
| Т-150 | 150±15 | 15 | 10...12 | 3,8...3,9 | — | 120...180 | — | — | — | 80...90 | —1500±100 |
| Т-250 | 250±30 | 30 | 5 | — | — | 59 | — | — | — | 120 | —3300±1000 |
| БТА | 20±2 | 3 | — | — | — | 80 | — | — | — | 106 | —40±10 |
| БА-35[4] | 35±1 | 2 | 8 | 4,35±0,3 | 7,8 | 108 | — | — | 15 | 83...91 | —30...40 |
| МТ-60[5] | 58,7±1,8 | 2 | 15 | 3,9 | 8,0 | 108 | — | — | 11 | 91±4 | —700 |
| Т-90[6] | 87±2,6 | 3 | 9 | 4,0 | 8,5 | 108 | — | — | 11 | 91±4 | —700...800 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Рутил | 89 (⊥ оси)<br>173 (∥ оси) | 20 | | 4,2...4.3 | — | — | — | — | — | 71...92 | —800 |
| СТ32-1[7] | 9,7...10(Iгр.)<br>10,0...<br>10,3 (II гр.) | 4...6 | 40 | 3,17 | 8 | 150 | — | 1200 | 1,0 | 32 | — |
| СТ38-1[8] | 7,25±0,15<br>0,05 | 4 | 40 | 2,9 | — | 100 | 8 | 1300 | 1,3 | 38 | 86,2 |
| СТ15-1 | 15±0,5 | 6 | — | — | — | — | — | — | — | 56 | — |
| СТ25-1[9] | 25±1 | 12 | — | 3,6 | — | 110 | — | — | — | 60 | — |
| СТ50-1 | 8,0...9,0 | 35 | 47 | 2,65 | 7 | 180 | — | — | 1,4 | 52 | 189,8 |
| ЦМ-4[3] | 6,5±0,5 | 6 | 25 | — | — | 78 | — | — | — | 18 | 60±20 |
| Кварц плавленный С5-1[10] | 3,82±0,1 | 1 | — | — | — | — | — | 900 | 1 | 6...9 | 5,5 |
| Окись бериллия (Брокерит-9) | 6,6 | 4 | — | 2,83 | 14,7...15,3 | 140 | 30 | — | 160...210 | 75...93 | 79,5 |
| 10СЧ | 14,8 | 70 | — | 5,02 | — | — | — | 280[11] | 2,59 | 490...610 | — |
| 30СЧ-6 | 15,5...16,52 | 50 | — | 5,24...5,56 | — | — | — | 280[11] | — | 695 | — |
| 30СЧ-3 | 15,5 | 30 | — | 5,6 | — | — | — | 230[11] | — | 866 | — |
| 30СЧ-9 | 13,1...15,9 | 50 | — | 4,83...5,13 | — | — | — | 200[11] | — | 725 | — |
| 40СЧ-2 | 13,0...15,8 | 80 | — | 4,82...5,12 | — | — | — | 180[11] | — | 745 | — |
| 40СЧ-4 | 15,5 | 30 | — | 5,6 | — | — | — | 280[11] | — | — | — |
| 40СЧ-5 | 13,1...15,9 | 40 | — | 4,81...5,11 | — | — | — | 170[11] | — | 726 | — |
| 80СЧ | 12,2...14,7 | 40 | — | 4,76...5,06 | — | — | — | 120[11] | — | 698 | — |
| 60СЧ | 12,6...15,4 | 40 | — | 4,77...5,07 | — | — | — | 150[11] | — | 670 | — |
| 90СЧ | 11,7...14,3 | 30 | — | 4,84...,5,04 | — | — | — | 100[11] | — | 674 | — |
| Кремний высокоомный | 11,7 | 150 | — | 2,33 | — | — | — | — | 90...150 | 42 | — |
| Арсенид галлия | 13,3 | 16 | — | 5,4 | — | — | — | — | 41 | 57 | — |

[1] Технические условия Щe0.781.000 ТУ.
[2] Технические условия на 22ХС полированные дГ0.737.027 ТУ, 22ХС неполированные Б40.737.000 ТУ.
[3] Технические условия на ЦМ-4, УФ-61 Т-250 УБ0.027.012 ТУ.
[4] ДМГ 0.027.001 ТУ.
[5] ДМГ 0.027.004 ТУ.
[6] ДМГ0.027.005 ТУ.
[7] ТХ0.781.004 ТУ.
[8] ТХ0 781 002 ТУ.
[9] ТХ0 781 009 ТУ.
[10] ТХ0.781.005 ТУ.
[11] Для ферромагнитных материалов 10СЧ ... 90СЧ приведена температура Кюри, °С.

щих хорошим качеством поверхности и устойчивых к технологическим воздействиям при изготовлении рисунка интегральных микросхем СВЧ (для некоторых видов керамики существуют ограничения в использовании кислот и щелочей), возможность проведения механической обработки пластин, пайки навесных компонентов при высоких температурах и т. п. являются предпосылкой использования некоторых из этих материалов в качестве подложек СВЧ схем [1.21].

Основные характеристики высокочастотной конденсаторной керамики незначительно отличаются от характеристик глиноземистой: малое водопоглощение, широкий диапазон рабочих температур (некоторые типы керамики используются при температуре жидкого гелия [1.25]).

**Ситаллы** [1.26]. Продукт кристаллизации стекол особых составов, обладающих способностью при обработке превращаться в микрокристаллический материал, по объему которого равномерно распределены мельчайшие кристаллы, находящиеся в непосредственном контакте между собой или соединенные через тонкую пленку остаточного стекла. Размеры кристаллов в основном не превышают 1 мкм, что обеспечивает высокую плотность и однородность материала во всем объеме, придает ситаллам ряд свойств, превосходящих аналогичные свойства стекол и многих керамических материалов. Удельное объемное сопротивление ситаллов $10^{10}$ ... $10^{12}$ Ом·м. Отличительные характеристики ситаллов: малая пористость, очень низкое водопоглощение (менее 0,02%) и газопроницаемость, высокая термостойкость, малая теплопроводность, возможность получения подложек с высоким классом обработки поверхности (до 14-го класса). По твердости ситаллы превосходят стекло, обычную керамику и металлы. Наиболее твердые ситаллы близки к закаленным сталям. Стабильные диэлектрические свойства на СВЧ и совместимость ситаллов с технологией интегральных микросхем обусловили их широкое применение и перспективность использования в качестве подложек интегральных микросхем СВЧ [1.27].

Наиболее распространены в настоящее время ситаллы марок СТ32-1 и СТ38-1. Ситалл СТ32-1 содержит 24,5% $Al_2O_3$; 37% $SiO_2$; 17,5% $TiO_2$; 21 % MgO и незначительное число редкоземельных элементов. Ситалл СТ38-1 содержит 23% $Al_2O_3$; 34% $SiO_2$; 18% двуокиси титана ($TiO_2$); 9% MgO; 16% редкоземельных элементов. К недостаткам ситаллов можно отнести меньшую теплопроводность по сравнению с керамическими материалами.

**Неорганические диэлектрики с пониженной диэлектрической проницаемостью.** Как видно из табл. 1.5, у большинства современных неорганических материалов $\varepsilon_r \geqslant 7$. Для подложек с меньшим $\varepsilon_r$ используются некоторые типы высокочастотной конденсаторной керамики (ЦМ-4), кварц (плавленный и монокристаллический), керамика на основе окиси бериллия.

Плавленный кварц (кварцевое стекло) с $\varepsilon_r = 3{,}78$ ... 3,90 обладает высокой повторяемостью диэлектрических характеристик от партии к партии. Подложки из кварца хорошо обрабатываются механически (ультразвуковое и алмазное сверление), выдерживают воздействие технологического процесса изготовления полосковых схем, позволяют проводить пайку при температурах 250° С в течение до 10 с. У плавленного кварца весьма низкое влагопоглощение, диапазон рабочих температур — 50 ... + 150° С. Кварц хорошо металлизируется обычными методами, принятыми для неорганических диэлектриков. Основной недостаток: сравнительно низкая теплопроводность (по сравнению с глиноземистой керамикой).

Подложки из монокристаллического кварца используют относительно редко, преимущественно в высокодобротных и высокостабильных схемах. Это связано с высокой стабильностью $\varepsilon_r$ и низкими диэлектрическими потерями кварца в широком диапазоне частот и температур. Пьезоэлектрические свойства кварца позволяют создавать СВЧ схемы в сочетании с устройствами, использующими акустоэлектрические эффекты (линии задержки, модуляторы и т. п.).

Особое место среди керамических материалов с невысокой диэлектрической проницаемостью занимает окись бериллия (BeO). На основе окиси бериллия создана, например, керамика Брокерит-9, в составе которой: BeO (97%), $Al_2O_3$ (1,17%), $SiO_2$ (0,96%), CaO (0,87%), кристаллической фазы в объеме материала 87—91%, стеклофазы 4 ... 6%, поры 5 ... 7%. Окись бериллия — высокочастотный диэлектрик с теплопроводностью, не худшей, чем у некоторых металлов.

Поэтому ее широко применяют в качестве материала для теплоотвода от мощных транзисторов и подложек для СВЧ схем с высоким уровнем рассеиваемой мощности.

**Ферриты 10СЧ ... 90СЧ.** Ферриты (см. табл. 1.5) полируются до высокого класса чистоты поверхности (12-й, 13-й класс), обрабатываются механически так же, как керамика, выдерживают воздействие технологических процессов изготовления полосковых схем, металлизируются вакуумным осаждением и по толстопленочной технологии. Основной недостаток ферритов: меньшая механическая прочность по сравнению с керамикой.

**Полупроводниковые материалы.** На подложках из кремния и арсенида галлия [1.24] с помощью процессов полупроводниковой технологии можно создать активные компоненты (диоды, транзисторы и т. д.), т. е. перейти к монолитным

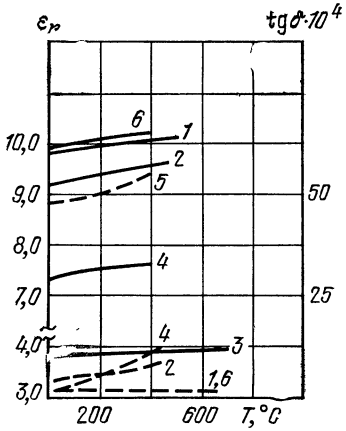



Рис. 1.1.

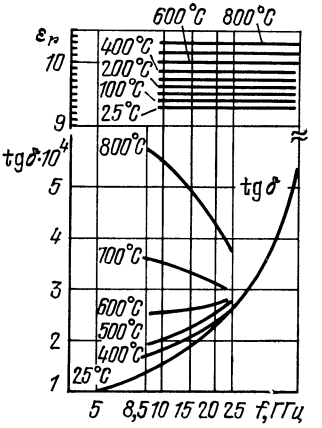



Рис. 1.2

СВЧ схемам. Основные достоинства кремния: высокая теплопроводность и постоянство диэлектрической проницаемости в широком температурном и частотном диапазонах. Удельное объемное сопротивление полупроводниковых материалов $10^3$ ... $10^6$ Ом·см. Арсенид галлия также отличается высокой стабильностью диэлектрических свойств. Оба эти полупроводника целесообразно использовать в диапазоне частот выше 20 ГГц, где благодаря снижению проводимости материала с ростом рабочей частоты уменьшается затухание в линиях передачи, выполненных на этих подложках.

Высокая термостойкость неорганических материалов [1.3; 1.40] позволяет использовать их в широком диапазоне температур. Однако при нагреве диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь, как правило, увеличиваются. На рис. 1.1 представлены усредненные зависимости $\varepsilon_r$ (сплошная линия) и tg δ (штриховая) для некоторых широко используемых материалов (*1* — поликор; *2* — 22ХС; *3* — кварц; *4* — СТ38-1; *5* — СТ50-1; *6* — А-995) на частоте 10 ГГц. Наиболее стабильно по диэлектрическим свойствам кварцевое стекло (изменение 0,7% до 400° С), у керамики и ситаллов в этом же диапазоне температур $\varepsilon_r$ изменяется на 3 ... 5%, заметно растет tg δ. Наиболее стабильна по tg δ керамика с высоким процентом $Al_2O_3$ («Поликор», А-995). На рис. 1.2 приведены обобщенные зависимости $\varepsilon_r$ и tg δ высокоглиноземистой керамики от частоты при различных температурах [1.3].

## 1.3. ПРОВОДНИКОВЫЕ, РЕЗИСТИВНЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Чистые металлы.** Структура проводников полосковых схем практически всегда многослойная, что позволяет добиться требуемой адгезии проводника к диэлектрическому основанию, достаточно малых потерь и высокой устойчивости к коррозии. Поэтому обычно первый (от диэлектрического основания) слой проводника — высокоомный материал с хорошими адгезионными свойствами; второй слой — основной проводник — металл с высокой проводимостью, наконец, третий слой обеспечивает защиту от воздействий внешней среды и лужение всего проводника либо его части для проведения монтажных операций. В табл. 1.6 приведены характеристики проводящих материалов, используемых для изготовления полосковых схем. Значения проводимости указаны для монолитных проводников без учета качества их поверхности (шероховатости, окисной пленки и т. п.).

Медная фольга [1.37] широко используется для создания проводящего слоя в материалах при изготовлении полосковых плат (металлизация плат прессованием и приклейкой). Существуют три марки медной фольги: ФМЭ (фольга медная электролитическая), ФМЭО (фольга медная электролитическая оксидированная), ФМЭОШ (фольга медная оксидированная повышенной шероховатости). Фольга этих марок изготовлена методом электролитического осаждения и выпускается в листах и рулонах. Основные ее характеристики должны соответствовать ГОСТ 1458—69. Выпускается фольга следующи хразмеров: толщина 0,035 ± 0,003 мм и $0{,}050^{+0{,}005}_{-0{,}007}$ мм; ширина рулонной фольги 500, 550, 1000, 1100 мм (допуск ± 5 мм); ширина и длина листовой фольги 550 × 750 и 550 × 710 мм (допуск ± 5 мм). Масса 1 м²: 305 + 27 г при толщине 0,035 мм и $435^{+43}_{-60}$ г при толщине 0,050 мм. Одна поверхность фольги выполняется гладкой (не ниже 8-го класса чистоты), другая — шероховатой; высота неровностей на шероховатой поверхности фольги 3 ... 8 мкм для ФМЭ и ФМЭО и 5 ... 8 мкм для ФМЭОШ. Толщина оксидированного слоя на фольге 0,15 ... 0,35 мкм. Сопротивление фольги, отнесенное к 1 мм² сечения и 1 км длины, при температуре 20° С не должно превышать 30 Ом.

Используется также медная рулонная фольга (по ГОСТ 5638—75), изготовленная из меди марки МО, М1, М2 (содержание меди 99,95; 99,9; 99,7% соответственно) и имеющая толщину 0,015—0,050 мм и ширину 20 ... 150 мм. Выпускается также фольга с адгезионным покрытием толщиной 0,020 мм, ТУ 48-2-2—72.

Материалы для вакуумного напыления проводников и обкладок конденсаторов: медь бескислородная марки МБ, ГОСТ 10988—75 (пруток диаметром 10 мм); медь вакуум-плавленная гранулированная, бКО 028.007 ТУ; алюминий марки АО, ГОСТ 11069—74. При изготовлении адгезионных слоев для проводников и обкладок конденсаторов используются: хром металлический марки ЭРХ, МТУ 5-30—70; нихром Х20Н80, ГОСТ 12766—67; ванадий марки ВНМ-1, ТУ 48-4-722—73; титан марки ВТI-0, АМТУ 475-2—67; тантал ТН3, РЭТУ № 1244—67.

**Проводниковые пасты, контактолы и припои.** Проводниковые пасты представляют собой композиции мелкозернистых порошков металлов, выполняющих роль функциональных материалов, и легкоплавких стекол, являющихся постоянным связующим. В состав паст входит также органическое связующее, обеспечивающее требуемые вязкость, растекаемость и другие свойства, необходимые для нанесения рисунка схемы на ее основание. Металл как функциональный материал обеспечивает создание токопроводящих дорожек, а стекло удерживает частицы металла в состоянии точечных контактов при обжиге и обеспечивает адгезию металла к основанию схемы. Предел прочности при отрыве проводника от основания — не менее 1 ... 3 МПа. В окончательном виде проводник представляет собой систему металлических частиц, находящихся в контакте друг с другом. В качестве функциональных материалов используются однокомпонентные системы (серебро, золото, платина, палладий, индий, родий, рутений и др.), а также многокомпонентные на основе сплавов (платина—зо-

Таблица 1.6

**Основные характеристики металлов**

| Металл | Относительное удельное сопротивление $q$ (по отношению к меди) | $\rho$, Ом·м·$10^8$ (на постоянном токе при 20° С) | $\sigma \cdot 10^{-7}$, См/м | Толщина скин-слоя, мкм, на частотах, ГГц | | | | | | Поверхностное сопротивление пленки $\rho \cdot 10^2$ (толщина 600 нм), Ом/□ | КТЛР, °С$^{-1}$ | $K_T$, Вт/м°С | Температура плавления, °С | $H_B$, кгс/мм$^2$ | Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние, К | ТКС, °С$^{-1}$ | Плотность, г/см$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 10 | | | | | | | | |
| Серебро Ag | 0,941 | 0,0162 | 6,6 | 4,5 | 2,88 | 2,03 | 1,44 | 1,02 | 0,64 | 2,7 | 18,6 | 453 | 961 | 25 | — | — | 10,49 |
| Медь Cu | 1,0 | 0,0172 | 5,9 | 4,9 | 2,98 | 2,09 | 1,48 | 1,05 | 0,66 | 2,8 | 16,6 | 406 | 1083 | 35 | — | 0,0039 | 8,92 |
| Золото Au | 1,41 | 0,0244 | 4,4 | 5,55 | 3,53 | 2,49 | 1,75 | 1,24 | 0,79 | 4,1 | 14,0 | 312 | 1063 | 18 | — | 0,0034 | 19,3 |
| Алюминий Al | 1,52 | 0.0262 | 3,81 | 5,82 | 3,7 | 2,61 | 1,85 | 1,3 | 0,83 | 4,6 | 21,0 | 218 | 660 | 25 | 1,196 | 0,0039 | 2,7 |
| Бериллий Be | 2,38 | 0,041 | 2,43 | 6,82 | 4,3 | 3,04 | 2,15 | 1,52 | 0,96 | 5,42 | 12,0 | 184 | 1280 | 61 | 0,03 | — | 1,84 |
| Магний Mg | 2,61 | 0,045 | 2,22 | 7,42 | 4,66 | 3,3 | 2,32 | 1,66 | 1,04 | 7,2 | 27,0 | 170 | 651 | 30 | — | 0,004 | 1,74 |
| Молибден Mo | 2,96 | 0,051 | 1,66 | 8,6 | 5,4 | 3,82 | 2,71 | 1,92 | 1,21 | 8,8 | 5,3 | 150 | 2620 | 153 | 0,83 | 0,0033 | 10,2 |
| Иридий Ir | 3,08 | 0,053 | 1,85 | 8,12 | 5,1 | 3,62 | 2,56 | 1,81 | 1,12 | 8,3 | 6,5 | 146 | 2410 | 170 | 0,14 | 0,0039 | 22,4 |
| Вольфрам W | 3,19 | 0,055 | 1,81 | 8,4 | 5,27 | 3,74 | 2,65 | 1,88 | 1,18 | 8,8 | 4,4 | 167 | 3400 | 252 | 0,01 | 0,0045 | 19,3 |
| Рутений Ru | 4,36 | 0,075 | 1,33 | 9,8 | 5,66 | 4,06 | 2,88 | 2,04 | 1,28 | — | 9,1 | — | 2250 | 220 | 0,47 | — | 12,4 |
| Никель Ni | 4,01 | 0,069 | 1,28 | 10,0 | 6,3 | 4,48 | 3,18 | 2,25 | 1,41 | 13,0 | 13,2 | 75,5 | 1453 | 68 | — | 0,0047 | 8,96 |
| Платина Pt | 6,1 | 0,105 | 0,95 | 11,3 | 7,1 | 5,02 | 3,55 | 2,52 | 1,58 | 16,4 | 9,5 | 71,1 | 1770 | 40 | — | 0,003 | 21,45 |
| Палладий Pd | 6,27 | 0,108 | 0,92 | 12,1 | 7,6 | 5,4 | 3,82 | 2,71 | 1,71 | 18,0 | 9,5 | 70,7 | 1550 | 46 | — | 0,0033 | 12,02 |
| Олово Sn | 6,62 | 0,114 | 0,90 | 12,5 | 7,87 | 5,57 | 3,95 | 2,8 | 1,76 | — | 23,0 | 63,1 | 232 | 5,2 | 3,72 | 0,0042 | 7,29 |
| Ниобий Nb | 8,72 | 0,15 | 0,67 | 13,1 | 8,25 | 5,8 | 4,15 | 2,95 | 1,85 | — | 7,2 | 50 | 2500 | 75 | 9,2 | — | 8,57 |
| Тантал Ta | 7,21 | 0,124 | 0,81 | 14,3 | 9 | 6,36 | 4,5 | 3,2 | 2,02 | — | 6,6 | 50 | 3000 | 45 | 4,4 | 0,003 | 16,6 |
| Ванадий V | 13,95 | 0,248 | 0,42 | 18,7 | 11,26 | 7,0 | 5,65 | 4,0 | 2,52 | — | 8,3 | 31 | 1900 | 64 | 5,13 | — | 6,11 |
| Хром Cr | 7,6 | 0,13 | 0,77 | 13,0 | 8,15 | 5,75 | 4,1 | 2,9 | 1,82 | — | 6,2 | 88,6 | 1900 | 244 | — | — | 7,19 |
| Титан Ti | 27,79 | 0,478 | 0,21 | 24,8 | 15,6 | 11,1 | 7,8 | 5,54 | 3,48 | — | 8,1 | 21,9 | 1670 | 73 | 0,39 | — | 4,52 |

Таблица 1.7

**Состав паст и поверхностное сопротивление проводников, изготовленных на их основе**

| Тип пасты (изготовитель) | Основные элементы проводника | $\rho_s \cdot 10^3$, Ом/□ |
|---|---|---|
| 3701 (СССР) АУЭ0.027.005ТУ | Серебро(14%) — палладий(65%) | 20...50 |
| 3711 (СССР) АУЭ0.027.005ТУ | Серебро (78...86%) | 2...5 |
| 9750 (США) | Серебро платина | 40 |
| 9770 (США) | » » | 2...3 |
| 9473 (США) | Серебро — палладий | 25 |
| 9071 (США) | » » | 10...18 |
| 9572 (США) | Золото — палладий | 80 |
| 9596 (США) | Платина — золото | 60 |

лото, палладий—серебро, палладий—золото и др.). Использование благородных металлов связано с их высокой химической инертностью и достаточно хорошей электропроводностью [1.38, 1.39, 1.41, 1.42]. В табл. 1.7 приведены данные о составе некоторых проводниковых паст. В последнее время создан ряд проводниковых паст, не содержащих драгоценных металлов, однако низкие значения поверхностного сопротивления проводников, созданных на их основе, ограничивают их применение на СВЧ.

Таблица 1.8

**Основные характеристики контактолов**

| Марка | Наполнитель | $\rho \cdot 10^6$, Ом·м | Предел прочности при отрыве, МПа | Температура отверждения, °С | Максимальная рабочая температура, °С | Срок годности |
|---|---|---|---|---|---|---|
| К-8 | Серебро | 2...3 | 5...10 | 120...190 | 150 | 6 мес. |
| К-11 | Золото | 3...8 | 3...5 | 70...100 | 125 | 6 мес. |
| К-12 | Серебро | 4...20 | 7...15 | 70...120 | 125 | 20 сут. |
| К-13 | » | 1...6 | 3...5 | 20...120 | 125 | 6 мес. |
| К-16 | » | 2...5 | 5...7 | 150...200 | 155 | 30 сут. |
| К-17 | » | 1...4 | 15...20 | 170...180 | 200 | 6 мес. |
| К-18 | » | 1...4 | 5...7 | 200 | 155 | 20 сут. |
| К-19 | » | 30...50 | 7...10 | 20...80 | 80 | 2 ч |
| К-20 | » | 0,5...1,0 | 1...2 | 20...80 | 60 | 6 мес. |
| К-21 | » | 2...4 | 5...10 | 180...200 | 300 | 6 ч |
| КП-3 | Палладий | 10...20 | 15...30 | 170...200 | 170 | 6 мес. |
| КН-1 | Никель | 5...20 | 10...15 | 20...100 | 70 | 3 сут. |
| КН-2 | » | 40...60 | 7...10 | 170...200 | 155 | 6 сут. |
| КН-3 | » | 50...80 | 30...50 | 200...220 | 200 | 6 мес. |
| КН-5 | » | 60...100 | 2...3 | 20...70 | 70 | 6 мес. |
| ТПК-1 (клей) | Серебро | 25 | — | 20...100 | 80 | — |
| АС-588 (эмаль) | Никель | 100 | — | 18...35 | 60 | — |
| ИР-169 | Никель посеребренный | 10 | — | 80 | 100 | 30 мин |

Таблица 1.9

**Основные характеристики припоев**

| Марка (состав) | Температура кристаллизации, °С | | $\rho \cdot 10^6$, Ом·м | $K_т$, Вт/(м·К) |
|---|---|---|---|---|
| | начала | конца | | |
| Олово чистое | 232 | 232 | 0,115 | 63 |
| ПОС-90 (90% олова, 10% свинца) | 216 | 183 | 0,120 | 54 |
| ПОС-61 (61% олова, 39% свинца) | 190 | 183 | 0,139 | 50 |
| ПОС-40 (40% олова, 60% свинца) | 238 | 183 | 0,159 | 42 |
| ПОС-61М (61% олова, 38% свинца, 1% меди) | 192 | 183 | 0,143 | 49 |
| ПОСК-50-18 (50% олова, 18% кадмия, 32% свинца) | 145 | 142 | 0,133 | 54 |
| ПСР-2,5 (2,5% серебра) | 305 | 295 | 0,214 | — |
| ПСр-3 (3% серебра) | 305 | 300 | — | — |
| ПСР-40 (40% серебра) | 605 | 595 | 0,072 | — |
| ПСрОС-3-58 (58—66% олова, 0,8% сурьмы, 3% серебра, остальное свинец) | 190 | 180 | 0,145 | — |
| ПСР-3-Ин (97% индия, 3% серебра) | 141 | 144 | — | — |
| ПОСВ-50 (25% олова, 25% свинца, 50% висмута) | — | 120 | — | — |
| ПОИ-50 (50% олова, 50% индия) | — | 121 | 0,280 | — |
| Сплав Вуда (12...25% олова, 25% свинца, 12...13% кадмия, 49...51% висмута) | 70 | 66 | 0,197 | — |
| Сплав Розе (17,5...18,5% олова, 31,6...32,5% свинца, 49,5...51,5% висмута) | 96 | 93 | 0,141 | — |

Контактолы — маловязкие или пастообразные полимерные композиции, в которых в качестве связующего используются смолы (эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические), а токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные порошки металлов (серебро, золото, палладий, никель). Контактолы используются в качестве токопроводящих клеев, покрытий, эмалей и т. д. и наносятся на контактируемые поверхности или в места соединений проводников с помощью иглы, шприца, шпателя. Рабочая вязкость контактолов реализуется введением соответствующих растворителей (ацетона, циклогексанона, этилцеллозольва и т. п.). После подсыхания при невысоких температурах образуется твердое покрытие или клеевая прослойка с высокими проводимостью и адгезией. Проводимость контактолов определяется в основном свойствами токопроводящего наполнителя (проводимостью, формой и размерами частиц, концентрацией). Чаще всего в качестве наполнителя используют порошки серебра. Срок годности контактолов определяется временем, в течение которого свойства композиций не меняются. В табл. 1.8 приведены характеристики некоторых типов контактолов.

В табл. 1.9 приведены данные о некоторых припоях, используемых в производстве полосковых схем. Припои делятся на две группы: твердые и мягкие. У мягких припоев температура плавления ниже, у твердых — выше 300° С. Предел прочности мягких припоев при растяжении 16 ... 100 МПа, твердых — 100 ... 500 МПа.

## РЕЗИСТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы, используемые для создания резисторов в полосковых схемах СВЧ, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

обеспечивать требуемое поверхностное сопротивление;

обладать низким ТКС в диапазоне эксплуатационных температур;

обеспечивать стабильность параметров резисторов во времени;

быть стойкими к воздействию климатических условий;

Таблица 1.10

**Характеристики некоторых сплавов**

| Сплав | $\rho \cdot 10^6$, Ом·м | ТКС·$10^6$, °С$^{-1}$ | КТЛР·$10^4$, °С$^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| Серебро—палладий (60%) | 0,38 | ±250 | — |
| Медь (83%)—марганец (13%)—никель (4%)—манганин | 0,48 | ±10 | ±2 |
| Никель (80%)—хром (20%)—нихром | 1,05 | ±85 | 1,7 |
| Никель (78%)—хром (20%)—алюминий (2%)—железо (2%) | 1,33 | ±5 | ±100 |

быть технологически удобными и экономически целесообразными, т. е. должны позволять осуществлять производство резистивных элементов способом, совместимым технологически с процессом производства всей схемы, и обеспечивать высокий выход годных изделий, их повторяемость, воспроизведение размеров и номиналов и т. п.

Основные характеристики резистивных материалов и получаемых из них элементов: удельное сопротивление (проводимость) монолитного материала; поверхностное сопротивление пленки материала, зависящее от условий создания пленочной структуры и режима ее обработки [1.34]. Обычно удельное сопротивление пленок выше, чем у монолитного образца из того же материала. В качестве резистивных материалов используются чистые металлы, сплавы, керметы, полупроводники и пасты.

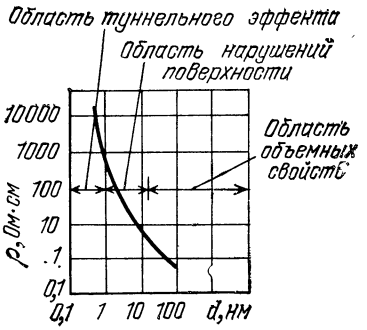



Рис. 1.3

**Чистые металлы.** Преимущественное распространение получили такие материалы с высоким сопротивлением, как хром и тантал. Последнее объясняется возможностью построения таких технологических процессов, где пленки из одних и тех же материалов используются для создания нескольких типов элементов, например танталовая технология. Для создания резисторов можно использовать титан, гафний, цирконий, марганец, рений [1.31] и другие элементы.

**Сплавы.** Наиболее широко используется сплав нихром (состав меняется от 80% никеля + 20% хрома до 50% никеля + 50% хрома). В табл. 1.10 приведены параметры некоторых сплавов, используемых в производстве резисторов. Одно из положительных качеств этих материалов — низкий ТКС (— 50 ... 50° С) [1.31].

**Керметы.** Материалы на основе микрокомпозиции металл—диэлектрик (металлокерамические), представляющие собой твердые растворы (псевдосплавы) серебра, хрома или другого металла и двуокиси кремния в различных пропорциях (кремния до 50%). Применяются для получения пленочных резисторов с высоким удельным сопротивлением и низким ТКС. Иногда для повышения сопротивления в состав керметов вводятся стекла (металлосилициды). Наилучшие результаты достигнуты при сочетании хром—моноокись кремния (70% хрома + + 30% моноокиси кремния), перспективны соединения золото—окись тантала ($Au—Ta_2O_5$), германий—хром и т. п. [1.8; 1.31], дисилициды: $TiSi_2$, $CrSi_2$, $FeSi_2$, являющиеся в отличие от керметов, химическими соединениями и имеющие высокое удельное сопротивление [1.36]. Широко используется многокомпонентный металлосилицидный сплав типа МЛТ-3 (Fe, Cr, Si, W). Данные о пленках некоторых тугоплавких соединений и керметов [1.8] приведены в табл. 1.11.

Из рис. 1.3 следует, что при малых толщинах пленки ее свойства заметно зависят от вида микронеровностей подложки, возможны нарушения непрерыв-

Таблица 1.11

**Поверхностное сопротивление пленок тугоплавких соединений и керметов**

| Вещество | $d$, мкм | $\rho_s$, Ом/□ |
|---|---|---|
| Карбид титана | 0,055 | 15 |
| Карбид тантала | 0,35 | 40 |
| Силицид тантала | 0,075 | 1800 |
| Карбид хрома | 0,2 | 1200 |
| Силицид хрома | 0,06 | 80 |
| Силицид титана | 0,33 | 5000 |
| Нитрид хрома | 0,104 | 800 |
| Борид хрома | 0,25 | 120 |
| 50% NiCr—50% SiO | 0,1 | 600 |
| 70% Cr—30% SiO | 0,1 | 300 |
| 50% $Cr_3Si$—50% $TaSi_2$ | 0,02...0,03 | 1400 |
| 50% TiSi—50% CrSi | 0,07; 0,03 | 200; 300 |
| 95% TaSi—5% SiO | 0,1 | 2000 |
| 50% $Cr_3Si$—49% $TaSi_2$—1% SiO | 0,02 | 5000 |

Таблица 1.12

**Основные характеристики резистивных материалов**

| Материал | $\rho_s$, Ом/□ | ТКС·$10^4$, °$C^{-1}$ |
|---|---|---|
| Тантал (ТН-3) | 25...100 | —2,0 |
| Нихром (Х20Н80) | 25...300 | ±1,0 |
| Хром | 50...500 | 0,6 |
| Сплав МЛТ-3М | 50...500 | ±2,0 |
| Сплав РС-3710 | 500...1 000 | —1,5...—2,5 |
| Сплав РС-5406К | 50...200 | 0,5...1,0 |
| Никель | 10...300 | 2,50 |
| Моноокись кремния—хром | $10^3$...$10^4$ | 0,50...2,50 |
| Вольфрам | $10^2$...$10^4$ | 1,00 |
| Рений | 250...$10^4$ | 0...—1,0 |
| Титан | 100...2 000 | —11...+30 |
| Силициды хрома | 200...500 | ±2,0 |
| Нитрид тантала | 50...500 | 1,0 |
| Окислы олова | 10...$10^3$ | —7,0...+9,0 |
| Пасты: | | |
| 4004 | 40...55 | ±2,0 |
| 4005 | 80...110 | ±1,5 |
| 4006 | 450...550 | ±1,5 |
| 4007 | 900...1 100 | ±1,0 |
| 4008 | 2700...3 300 | ±0,5 |
| 4009 | 5400...6 600 | ±1,5 |
| 4010 | 18000...22 000 | ±2,0 |
| 4011 | 45000...55000 | ±2,5 |
| Birox-1400 (США) | 10...$10^6$ | ±1,0 |
| Gerti-Fired-9400 (США) | 10...$10^6$ | ±2,5 |

Примечание. Пасты 4004...4011 выпускаются по техническим условиям АУЭ 0.027.004 ТУ.

ности структуры, электропроводность осуществляется за счет туннельного эффекта и термоэмиссии между отдельными кристаллитами. Пленки толщиной до 1 нм практически не применяются. Сплошной можно считать пленку толщиной от 100 нм (пленки тугоплавких металлов обеспечивают стабильные свойства и при меньших толщинах) [1.34].

**Полупроводниковые пленки.** Наилучшие результаты достигнуты для пленок двуокиси олова $SnO_2$, которая в чистом виде является полупроводником. Свойства этих пленок можно улучшить, добавив сурьму, индий, двуокись титана. Основные преимущества пленочных резисторов на основе олова (станатных): высокая климатическая и механическая устойчивость, теплостойкость (до 250° С), химическая стойкость [1.34] ($50 \leqslant \rho_s \leqslant 200$ Ом/□).

**Резистивные пасты.** Используются для создания резисторов по толстопленочной технологии и представляют собой композиции, где роль функциональных материалов выполняют смеси серебра и палладия, рутения или его окислов, индия, олова, нитрида тантала, рения, окиси таллия и других веществ. Наиболее часто применяются композиции на основе драгоценных и редких металлов, однако в последнее время появились пасты на основе, например, кадмия, не содержащие благородных металлов. В качестве связующих веществ в состав резистивных паст входят стекла (свинцово-боросиликатные, цинково-боросиликатные и др.), обеспечивающие стабильность свойств резисторов [1.38]. Основные характеристики резистивных материалов приведены в табл. 1.12 [1.7; 1.34; 1.41; 1.42].

## ПЛЕНОЧНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

К пленочным диэлектрикам, используемым в основном для СВЧ конденсаторов, предъявляются следующие основные требования: технологичность (воспроизводимость), высокое напряжение пробоя, малые диэлектрические потери, плотная структура материала (без микроотверстий и трещин) (табл. 1.13).

**Неорганические диэлектрики.** Наиболее распространены моноокись германия GeO и моноокись кремния SiO, обладающие высокой технологичностью и хорошими эксплуатационными свойствами. В технологических процессах, связанных с использованием полупроводниковых подложек, а в последние годы и при создании гибридных микросхем с навесными активными элементами широко используется двуокись кремния ($SiO_2$). Перспективен для создания конденсаторов нитрид кремния ($Si_3N_4$). Входят в практику щелочно-галоидные соединения, например фтористый магний $MgF_2$, фтористый литий LiF, фтористый кальций $CaF_2$. Проводятся исследования по использованию сегнетоэлектрических пленок с высокой диэлектрической проницаемостью [1.31; 1.34] типа титаната бария $BaTiO_3$ или смеси этого материала с титанатом стронция $SrTiO_3$.

Широко используются конденсаторы на основе диэлектрических пленок окислов металлов, так как при этом удается включить процесс окисления в общий технологический процесс изготовления и получить высокие электрические характеристики элементов. Наибольшее распространение на практике получили пленки пятиокиси тантала $Ta_2O_5$. Используются также окислы и других металлов: алюминия $Al_2O_3$, сурьмы $Sb_2O_3$ и $Sb_2O_4$, висмута $Bi_2O_3$, ниобия $Nb_2O_5$, вольфрама $WO_3$, титана $TiO_2$. Окись тантала $Ta_2O_5$ широко проверена в танталовой технологии (гл. 6), пленки этого материала обладают высокими электрической прочностью и удельной емкостью. Недостаток конденсаторов такого типа на СВЧ заключается в малой проводимости тантала как материала обкладок конденсаторов; применение алюминия позволяет достичь более высокой добротности емкостных элементов.

**Органические диэлектрики.** Используются пленки из фторопласта, полистирола, поликарбонатов, полиэтилена («майлар»), достоинство которых — низкие диэлектрические потери на СВЧ, высокая электрическая прочность, эластичность. Все это в сочетании с невысокой диэлектрической проницаемостью позволяет считать их перспективными для создания высококачественных СВЧ конденсаторов. Используются пленки толщиной 4 ... 50 мкм. Некоторое применение получили диэлектрические пленки на основе полимеризованных эпоксидных смол и фоторезистов, используемых в производстве СВЧ микрополосковых схем (ФН-11, ФН-57К, ВЩ).

Таблица 1.13

**Характеристики основных пленочных диэлектриков**

| Материал | $\varepsilon_r$ [1] | tg $\delta$ [1] | Удельная емкость, пФ/мм² | Пробивное напряжение $U_{пр} \cdot 10^{-6}$, В/см | ТКЕ·$10^6$, °С$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Моноокись кремния | 5...6; 11 | $1...2 \cdot 10^{-3}$ | 100...120 | 1...2 | 110 |
| Двуокись кремния | 3,5...4 | $1...2 \cdot 10^{-3}$ | 50...200 | 5...10 | 80...100 |
| Окись германия | 10...12 [2] | $0,5...1 \cdot 10^{-2}$ [2] | 100...200 | 0,5...0,8 | 350 |
| Пятиокись тантала | 21...27 | $10^{-2}$ | $1...1,5 \cdot 10^3$ | 5 | 200...300 |
| Окись алюминия | 10 | $0,3...1,5 \cdot 10^{-3}$ | 300...800 | 9 | 150...500 |
| Боросиликатное стекло | 4,0 [2] | $2 \cdot 10^{-3}$ [2] | 20...100 | 3 | 30...35 |
| Двуокись титана | 30...100 | $2,6 \cdot 10^{-2}$ | 100...1000 | 0,24 | 300 |
| Халькогенидные стекла | 6...21 | $1...15 \cdot 10^{-3}$ | 100...300 | 0,2...2 | 20...50 |
| Нитрид кремния | 6...8 | $1 \cdot 10^{-2}$ | — | 10 | — |
| Фтористый магний | 4,9 | $7 \cdot 10^{-3}$ | — | — | — |
| Фтористый литий | 5,2 | $3 \cdot 10^{-2}$ | — | — | — |
| Окись ниобия | 38 | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | — | — | — |
| Полистирол | 2,57 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 1...30 | 2 | — |
| Фторопласт-4 | 2,0 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 1...20 | 4 | — |
| Полиэтилен терефталат (Майлар) | 3,23 | $4 \cdot 10^{-3}$ | 1...50 | 4 | — |
| Эпоксидная смола (пленка 160-270 нм) | 5...6 | $6...7 \cdot 10^{-3}$ | — | 1,2...1,8 | — |
| Фоторезист ФН-11 | 2,5 [2] | — | 2000 | — | — |
| Пасты (СССР): | | | | | |
| 0902 | — | 0,02 [2] | 70 [3] | 0,15 | ±2000 |
| 1001 | — | 0,03 | 6 [3] | 0,15 | — |
| 1003 | — | 0,03 | 6 [3] | 0,15 | — |

[1] На частоте 1 кГц.
[2] На частоте 500 МГц.
[3] При толщине слоя 30...40 мкм.

**Пасты** [1.38, 1.41; 1.42; 1.44]. Роль функционального материала в пастах выполняют вещества, определяющие диэлектрическую проницаемость получаемой пленки, например $BaTiO_3$, порошки керамики и ситаллов и т. п. В качестве связующего материала используются легкоплавкие стекла (фритты). Рабочие напряжения конденсаторов на основе пленочных диэлектриков — порядка 6 ... 30 В для материалов типа моноокиси германия, кремния, двуокиси кремния, до 100 В для окиси тантала и алюминия, до 100 ... 500 В для паст.

# Глава 2

# ОДИНОЧНЫЕ И СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ

## 2.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛН

### ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Активная часть поверхностного сопротивления проводника* $R_s$ [Ом] численно равна сопротивлению, которое оказывает протекающему току слой проводника толщиной $\Delta$ на частоте $f = 0$:

$$R_s = (\sigma\Delta)^{-1} = (\pi f \mu_a/\sigma)^{1/2} = 2{,}61\cdot 10^{-7}\sqrt{qf\mu_r},$$

где $q = \sigma_{меди}/\sigma$ ($\sigma_{меди} = 5{,}8\cdot 10^7$ См/м).

*Волна основного типа* (*основная волна линии*) — волна с наименьшей критической частотой среди всех возможных волн в данной регулярной линии. В полосковых линиях таковой является Т-волна (при однородном заполнении и отсутствии потерь в проводниках) или квази-Т, у которых критическая частота равна нулю.

*Т-волна* (или волна ТЕМ) — волна, у которой отсутствуют продольные составляющие векторов **E** и **H**, т. е. составляющие, параллельные направлению движения энергии по линии. Векторы **E** и **H** лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения. В регулярных симметричной (СПЛ) и несимметричной (НПЛ) полосковых линиях Т-волна является основной при однородном диэлектрическом и магнитном заполнении и идеальной проводимости проводников. Критическая частота Т-волны равна нулю, т. е. распространение этой волны возможно во всем частотном диапазоне. Структура поля и параметры этой волны не зависят от частоты.

*Е-волна* (или ТМ) — волна, у которой вектор **E**, имеет помимо поперечных продольную составляющую, а продольная составляющая вектора **H** равна нулю. Структура поля и параметры Е-волн зависят от частоты, т. е. имеет место дисперсия.

*Н-волна* (или ТЕ) — волна, у которой вектор **H** имеет помимо поперечных продольную составляющую, а продольная составляющая вектора **E** равна нулю. Свойства Н- и Е-волн во многом аналогичны. В полосковых однородных линиях без потерь они являются волнами высшего типа.

*Гибридная волна* — волна, у которой векторы **E** и **H** имеют продольные и поперечные составляющие. Волна может рассматриваться как суперпозиция Е- и Н-волн, доля каждой из которых определяется граничными условиями, частотой и т. д. В регулярной неоднородной полосковой линии одна из гибридных волн (квази-Т) является основной. На достаточно низких частотах эта волна по своим свойствам и структуре практически не отличается от Т-волны, но ее параметры зависят от частоты, что обусловливает наличие дисперсии. Критическая частота квази-Т волны равна нулю.

*Волновое сопротивление* регулярной линии без потерь, работающей в режиме бегущей волны, в произвольном поперечном сечении $Z_в$ [Ом] $= U/I$; его можно определить также по формулам $Z_в = 2P/I^2$, $Z_в = U^2/2P$, где $P$ — мощность, переносимая волной по линии. Для Т-волны все три определения дают одинаковый результат, как и следующие формулы: $Z_в$ [Ом] $= \sqrt{(L\mu_0)/(C\varepsilon_0)} = 1/(v_ф\varepsilon_0 C) = 120\pi\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}\,[1/(C/\varepsilon_r)]$, где $C/\varepsilon_r$ определяется из решения статической задачи.

*Глубина скин-слоя* $\Delta$ — расстояние, при прохождении которого волной напряженность ее поля в проводнике уменьшается в $e$ раз ($\approx 2{,}718$ раза). Для хо-

роших проводников $\Delta$ [мм] $= (\pi f \mu_a \sigma)^{-1/2} = 0{,}066\,(q/f\mu_r)^{1/2}$, где $f$ — частота, МГц

*Дисперсия* — зависимость параметров волны (линии) от частоты.

*Длина волны в линии* $\Lambda$ равна расстоянию, которое должна пройти волна вдоль регулярной линии, чтобы ее фаза изменилась на 360° (2π): $\Lambda$ [м] $= 2\pi/\beta = v_ф/f$.

*Добротность линии* $Q$ — безразмерная величина, равная собственной добротности полуволнового резонатора, выполненного из отрезка исследуемой линии: $Q \approx 8{,}686\beta/2\alpha$, где $\alpha$ — коэффициент затухания, дБ/м, и $\beta$ — постоянная распространения, м$^{-1}$.

*Критическая частота* в регулярных полностью экранированных линиях (типа металлического волновода, коаксиальной линии, экранированной СПЛ или НПЛ и др.) без потерь соответствует частоте, на которой постоянная распространения $\beta$ равна нулю. В регулярных линиях с частичным экранированием (например, МПЛ на рис. 2.37) либо в линиях без экрана (например, диэлектрический волновод), где возможно излучение, критической соответствует частота, на которой равны коэффициенты распространения волны в линии и любой из волн, способной переносить энергию в окружающем линию пространстве.

*Коэффициент затухания* $\alpha$ [Нп/м] обратно пропорционален расстоянию, которое должна пройти волна вдоль регулярной линии, чтобы ее амплитуда уменьшилась в $e$ раз. Такому затуханию соответствует 1 Нп (8,686 дБ). Коэффициент затухания в полосковых линиях, как и в большинстве других, рассчитывается в хорошо выполняющемся на практике предположении, что структуры электромагнитных полей в линии с потерями и в той же линии без потерь одинаковы. Погрешность становится значительной вблизи критических частот и при анализе вырожденных волн, имеющих в линиях без потерь различную структуру электромагнитного поля, но равные критические частоты. Зависимость амплитуды полей от продольной координаты $z$ в линии с потерями описывается множителем exp $(-\alpha z)$.

*Коэффициент отражения* $\Gamma$ равен отношению комплексных амплитуд отраженной и падающей волн: $\Gamma = \mathbf{E}_{отр}/\mathbf{E}_{пад} = \Gamma_н \exp(-2\gamma z)$, где $\Gamma_н$ — коэффициент отражения от нагрузки (сечение $z = 0$); $z$ — положительная величина, равная расстоянию от нагрузки до точки, где определяется $\Gamma$; $\gamma = \alpha + j\beta$. Уровень отражений в линии обычно характеризуют коэффициентом стоячей волны: $K_{ст\,U} = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$.

*Погонная емкость линии* (нормированная) $C$ численно равна заряду $\tau$, приходящемуся на единицу длины регулярной линии и деленному на $\varepsilon_0$, если разность потенциалов $U$ между проводниками линии равна 1 В: $\varepsilon_0 C = \tau/U = 2W_э/U^2$, где $W_э$ — энергия электрического поля, сосредоточенная в линии единичной длины.

*Погонная индуктивность линии* (нормированная) $L$ численно равна удвоенной энергии $W_м$ магнитного поля, сосредоточенной в регулярной линии единичной длины и деленной на $\mu_0$, когда по проводникам линии течет ток $I$, равный 1 А: $\mu_0 L = 2W_м/I^2 = \Phi/I$, где $\Phi$ — магнитный поток, проходящий между проводниками линии на единицу ее длины.

*Постоянная распространения* $\beta$ [м$^{-1}$] (*фазовая постоянная, волновое число*) численно равна фазовому сдвигу, получаемому волной при прохождении в регулярной линии расстояния единичной длины: $\beta = \omega/v_ф = 2\pi/\Lambda$.

*Тепловая прочность линии* определяется максимальной мощностью, превышение которой приводит к изменению параметров диэлектрика, заполняющего линию либо отдельные ее отрезки. Это явление, получившее название теплового пробоя, обычно связано с локальным либо общим повышением температуры диэлектрического заполнения из-за рассеяния в нем части электромагнитной энергии и недостаточной теплопроводности большинства используемых на практике диэлектрических материалов.

*Фазовая скорость* $v_ф$ [м/с] — скорость перемещения фронта волны (поверхности равных фаз) вдоль продольной оси $z$ регулярной линии: $v_ф = c\,(LC)^{-1/2} = \omega/\beta = \Lambda f$, где $c = 1/(\varepsilon_0\mu_0)$. В среде без потерь при однородном диэлектри-

ческом заполнении у Т-волны $v_ф = (\varepsilon_a \mu_a)^{-1/2} = c/(\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$, где $\varepsilon_r$ и $\mu_r$ — параметры среды, заполняющей линию.

*Характеристическое сопротивление* $Z_c$ [Ом] волны, распространяющейся в линии, определяется отношением $Z_c = |\mathbf{E}_\perp|/|\mathbf{H}_\perp| = (|E_x|^2 + |E_y|^2)^{1/2}/(|H_x|^2 + |H_y|^2)^{1/2}$. Для Т-волны $Z_c = Z_c^{\text{Т}} = (\mu_a/\varepsilon_a)^{1/2} = 120\pi \quad (\mu_r/\varepsilon_r)^{1/2} \approx 377 \times (\mu_r/\varepsilon_r)^{1/2}$.

*Электрическая прочность* как линии, так и устройства ограничивается максимальной напряженностью электрического поля, превышение которой приводит к пробою. Мощность, при которой происходит электрический пробой, называется предельной ($P_{\text{пред}}$). Мощность, которую можно передать по линии, не опасаясь пробоя, $P_{\text{доп}} = P_{\text{пред}} K_{\text{св}}^{-1} U K_{\text{зап}}^{-1}$, где $K_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, выбираемый в зависимости от условий эксплуатации в пределах 2 ... 4.

*Эффективная диэлектрическая проницаемость* $\varepsilon_{\text{эф}}$ численно равна отношению квадрата скорости света $c$ в вакууме к квадрату фазовой скорости $v_ф$ в линии: $\varepsilon_{\text{эф}} = c^2/v_ф^2$. При однородном диэлектрическом заполнении линии $\varepsilon_{\text{эф}}$ совпадает с $\varepsilon_r$, а при слоистом заполнении $\varepsilon_{r\,\text{мин}} < \varepsilon_{\text{эф}} < \varepsilon_{r\,\text{макс}}$, где $\varepsilon_{r\,\text{мин}}$ и $\varepsilon_{r\,\text{макс}}$ — относительные диэлектрические проницаемости слоев соответственно с наименьшей и наибольшей диэлектрической проницаемостью (при $\mu_r = 1$).

## ВОЛНЫ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

Начнем рассмотрение с волн между двумя параллельными идеально проводящими плоскостями (экранами), пространство между которыми заполнено однородным диэлектриком с относительной проницаемостью $\varepsilon_r$. Как показывает анализ, вдоль оси $z$ в данном случае могут распространяться волны $E_q$ и $H_q$ с коэффициентом замедления

$$n = \beta/k_0 = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r - (\beta_x/k_0)^2 - (q\pi/k_0 b)^2}, \quad q = 0, 1, 2, \ldots,$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число свободного пространства; $b$ — расстояние между экранами.

Так как $0 \leqslant \beta_x < k_0\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$, зависимость $n$ от частоты (длины волны) описывается не одной кривой, а занимает целую полосу. На рис. 2.1 области существования различных типов волн заштрихованы и лежат между осями $\lambda$, $n$ и соответствующими граничными кривыми. Это означает, что спектр волн соответствующих типов непрерывный.

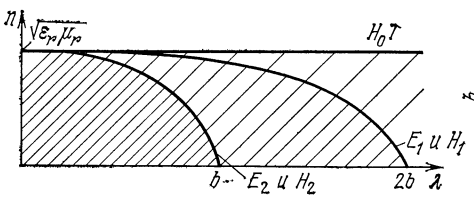



Рис. 2.1

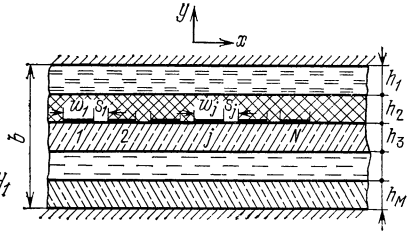



Рис. 2.2

Если между экранами поместить $N$ полосковых проводников (полосок) (рис. 2.2) и сохранить однородное заполнение, то структура поля волн $E_q$ и $H_q$ несколько исказится, однако эти волны по-прежнему будут существовать и сохранится их непрерывный спектр. Кроме того, становится возможным распространение волн с дискретным спектром, энергия которых локализована вблизи полосок. На плоскости $\lambda$, $n$ каждой такой волне соответствует не область, а отдельная кривая дисперсии $n(\lambda)$. К этим волнам относится и низшая Т-волна,

распространяющаяся в интервале частот $0 < f < \infty$. Остальные волны называются высшими, несмотря на то, что волна $H_0$, как и Т, может распространяться при $0 < f < \infty$. Число независимых Т-волн равно числу полосок. Для этих волн при однородном заполнении линии однозначно вводятся понятия потенциала $U_j(z)$ и тока $I_j(z)$ ($j = 1, \ldots, N$) на каждом проводнике. Потенциал экрана полагается равным нулю. Токи и потенциалы связаны между собой телеграфными уравнениями

$$\mu_0^{-1} d\,[\mathbf{U}(z)]/dz = -\mathrm{j}\omega\,[\mathbf{L}_\mu]\,[\mathbf{I}(z)],\quad \varepsilon_0^{-1} d\,[\mathbf{I}(z)]/dz = -\mathrm{j}\omega\,[\mathbf{C}_\varepsilon]\,[\mathbf{U}(z)], \tag{2.1}$$

где $[\mathbf{U}(z)]$ и $[\mathbf{I}(z)]$ — векторы (матрицы-столбцы) с компонентами $U_j(z)$ и $I_j(z)$ соответственно; $[\mathbf{L}_\mu]$ и $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ — квадратные матрицы порядка $N$, состоящие из нормированных погонных индуктивностей и емкостей. Коэффициенты матрицы $[\mathbf{L}_\mu]$ всегда можно выразить через коэффициенты матрицы $[\mathbf{C}_\varepsilon]$, поскольку

$$[\mathbf{L}_\mu]\,[\mathbf{C}_\varepsilon] = \mu_r \varepsilon_r [1], \tag{2.2}$$

где $[1]$ — единичная матрица порядка $N$, причем $[\mathbf{L}_\mu] = \mu_r [\mathbf{L}_1]$, $[\mathbf{C}_\varepsilon] = \varepsilon_r [\mathbf{C}_1]$, где $[\mathbf{L}_1]$ и $[\mathbf{C}_1]$ — матрицы индуктивностей и емкостей, вычисленные соответственно при $\mu_r = 1$ и $\varepsilon_r = 1$. В матрице $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ перед всеми элементами, кроме диагональных, стоит знак минус:

$$[\mathbf{C}_\varepsilon] = \begin{bmatrix} C_{11}^\varepsilon & -C_{12}^\varepsilon & \ldots & -C_{1N}^\varepsilon \\ -C_{12}^\varepsilon & C_{22}^\varepsilon & \ldots & -C_{2N}^\varepsilon \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -C_{1N}^\varepsilon & -C_{2N}^\varepsilon & \ldots & C_{NN}^\varepsilon \end{bmatrix}, \tag{2.3}$$

вдоль главной диагонали стоят $C_{jj}^\varepsilon$, равные емкости $j$-го проводника, когда потенциалы всех остальных равны нулю. Величина $C_{jj}^\varepsilon$ равна, по существу, сумме погонных емкостей между $j$-м проводником и всеми остальными:

$$C_{jj}^\varepsilon = C_j^\varepsilon + \sum_{l=1,\ l\neq j}^{N} C_{jl}^\varepsilon,$$

где $C_j^\varepsilon$ — безразмерная погонная емкость между $j$-м проводником и экраном, а $C_{jl}^\varepsilon$ — между $j$-м и $l$-м проводниками.

Соотношение между потенциалами и токами на концах отрезка многополосковой линии длиной $z$, расположенной в среде с проницаемостями $\varepsilon_r$ и $\mu_r$, удобно записывать с помощью матрицы проводимости:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{I}(0)] \\ -[\mathbf{I}(z)] \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}] \begin{bmatrix} [\mathbf{U}(0)] \\ [\mathbf{U}(z)] \end{bmatrix}; \tag{2.4}$$

$$[\mathbf{Y}] = \frac{\mathrm{j}}{120\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\mu_r}} \begin{bmatrix} -[\mathbf{C}_\varepsilon]\,\mathrm{ctg}\,kz & [\mathbf{C}_\varepsilon]\,\mathrm{cosec}\,kz \\ [\mathbf{C}_\varepsilon]\,\mathrm{cosec}\,kz & -[\mathbf{C}_\varepsilon]\,\mathrm{ctg}\,kz \end{bmatrix}, \tag{2.5}$$

$$k = k_0 \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}.$$

При $N = 1$ из (2.5) можно определить волновое сопротивление линии

$$Z_\text{в} = 120\pi \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}/C\ . \tag{2.6}$$

В однородной полосковой линии фазовая скорость Т-волн равна групповой и не зависит от распределения потенциалов по $N$ полоскам. Коэффициент замедления всех Т-волн $n = c/v_\text{ф} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$, т. е. волны $N$-кратно вырождены. Поэтому кривая дисперсии для Т-волн на плоскости $\lambda$, $n$ представляет прямую, совпада-

ющую с границей существования волн $H_0$ (см. рис. 2.1). Чтобы в рабочем диапазоне частот устранить волну $H_0$, устройства на полосковых линиях ограничивают боковыми металлическими стенками на расстоянии $a$ друг от друга. При $\lambda > 2a$ волны $E_q$ и $H_q$, $q = 0, 1, 2, \ldots$ распространяться не могут.

Кроме Т-волн при определенных условиях вблизи полоски могут локализоваться и волны $H^{(q)}$, которым соответствует дискретный спектр [2.21]. В симметричной полосковой линии (рис. 2.3) при $t = 0$ и $a \to \infty$ волне $H^{(q)}$

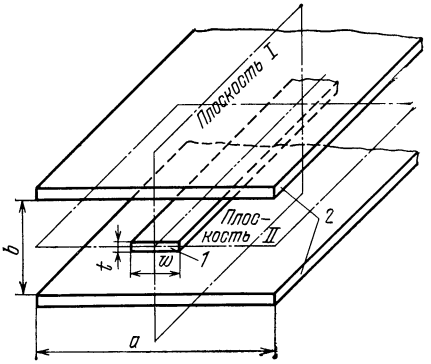



Рис. 2.3

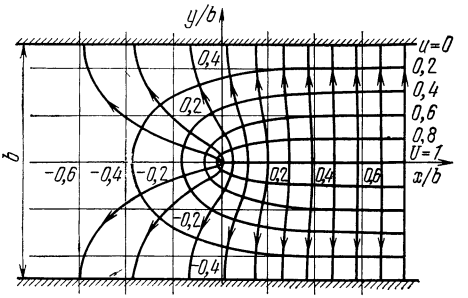



Рис. 2.4

соответствует такая структура поля, у которой на ширине $w$ укладывается целое число полуволн. Каждой из таких структур соответствует своя критическая длина волны $\lambda_{кр}$, несколько превышающая значение $2w/q$, $q = 1, 2, \ldots$ Локализация поля возможна, если $\lambda_{кр} > 2b$. Волны $H^{(q)}$ и $H_0$ ортогональны, так что низшим типом волны, который может нести энергию в сторону от полоски, является волна $H_1$ с критической длиной волны $2b$.

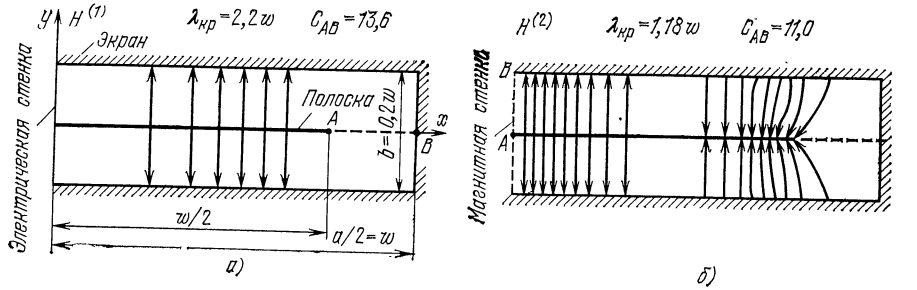



Рис. 2.5

На рис. 2.4 изображены силовые линии электрического поля и эквипотенциали для Т-волны, рассчитанные для СПЛ методом конформных отображений [2.15]. Эквипотенциали совпадают с силовыми линиями магнитного поля. Силовые линии электрического поля для волн $H^{(q)}$, $q = 1, 2$ (они же — линии уровня продольной компоненты магнитного поля), рассчитанные методом конечных элементов [2.49, 2.50], приведены на рис. 2.5. Волновое сопротивление $Z_в = (120\pi/C_{AB})/\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}$, где $\varepsilon_0 C_{AB} = 2W_э/U^2_{AB}$ ($W_э$ — амплитуда энергии электрического поля, запасаемой на единице длины линии; $U^2_{AB}$ — квадрат напряжения между точками $A$ и $B$, вычисленного как интеграл от электрического поля вдоль $AB$).

Кроме рассмотренных волн со сплошным и дискретным спектрами существуют излучающиеся волны с дискретным спектром, описанные в [2.51]. Они могут быть полезными в субмиллиметровом и оптическом диапазонах. Для волн этого типа характерно наличие определенного числа полуволн между экраном и полоской. Под излучением подразумевается трансформация энергии волны данного типа в энергию волн с непрерывным спектром. Такая трансформация возможна, когда значения коэффициента замедления волны данного типа лежат в интервале замедлений волн с непрерывным спектром.

Перейдем к описанию волн в линии со слоистым магнитодиэлектриком (см. рис. 2.2), где, как и при однородном заполнении, возможно распространение волн с непрерывным и дискретным спектрами. Непрерывный спектр имеют волны многослойного волновода, возмущенные полоской, а дискретный — волны, лока-

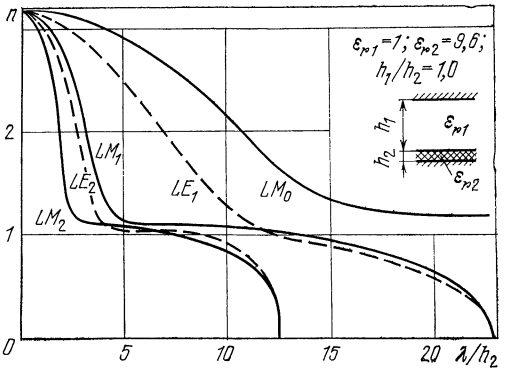



Рис. 2.6

лизованные полосковой линией. Волны непрерывного спектра в отсутствие полоски делятся на LE- и LM-волны [2.52]. У LE-волн нулю равна компонента поля $E_y$, а у LM-волн — компонента $H_y$. При числе слоев $M = 2$ и числе полосок $N = 0$ дисперсионные характеристики этих волн определяются из трансцендентных уравнений. Для LM-волн

$$(\varepsilon_{r1}/\gamma_{y1}) \operatorname{cth} \gamma_{y1} h = -(\varepsilon_{r2}/\gamma_{y2}) \operatorname{cth} \gamma_{y2} h,$$

а для LE-волн

$$(\gamma_{y1}/\mu_{r1}) \operatorname{cth} \gamma_{y1} h = -(\gamma_{y2}/\mu_{r2}) \operatorname{cth} \gamma_{y2} h,$$

при этом $k_0^2\varepsilon_{r1}\mu_{r1} + \gamma_{y1}^2 = k_0^2\varepsilon_{r2}\mu_{r2} + \gamma_{y2}^2 = k^2 + \beta_x^2$.

Рассчитанный по этим формулам коэффициент замедления $n$ для различных типов волн двухслойного волновода при $\beta_x = 0$; $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$ приведен на рис. 2.6. Когда $\beta_x \neq 0$, каждой волне соответствует область, лежащая под соответствующей кривой дисперсии при $\beta_x = 0$ и ограниченная осями координат $(\lambda, n)$. Для кривых характерен перегиб при $n$, близком к единице. Все кривые при $\lambda \to 0$ сходятся в точке $n = \sqrt{\varepsilon_{r2}}$. Волна низшего типа $LM_0$ не имеет отсечки (распространяется при любых длинах волн), а ее замедление всегда больше единицы. При $\lambda \to \infty$ коэффициент замедления этой волны стремится к величине [2.53]

$$n_{LM_0} = \sqrt{(\mu_{r1} h_1 + \mu_{r2} h_2)\, \varepsilon_{r1} \varepsilon_{r2} / (\varepsilon_{r1} h_1 + \varepsilon_{r2} h_2)}. \qquad (2.7)$$

Начиная с $\lambda \simeq 8h_2\sqrt{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}$, коэффициент замедления начинает заметно возрастать. Когда верхний экран удален в бесконечность, коэффициент замедления волны $LM_0$ стремится к единице при больших значениях $\lambda$ и по-прежнему возрастает при $\lambda < 8h_2\sqrt{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}$, стремясь к $\sqrt{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}$ при $\lambda \to 0$.

Из волн с дискретным спектром при $N \neq 0$ наиболее изучены те типы волн, которые не излучаются (их кривые дисперсии лежат выше кривой для волны $LM_0$).

Волной низшего типа для линии со слоистым магнитодиэлектриком при $N \neq 0$ является квази-Т-волна. Она может распространяться на любых частотах, а ее замедление с ростом частоты стремится к значению $\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ того слоя, для которого оно максимально. По мере уменьшения частоты замедление стремится к значению, определяемому в квазистатическом приближении.

На низких частотах для описания квази-Т-волн можно пользоваться уравнениями (2.1). Если известен способ вычисления матрицы $[C_\varepsilon]$, то [2.81]

$$[L_\mu] = [C_{1/\mu}]^{-1}. \tag{2.8}$$

Для однополосковой линии

$$Z_в = 120\pi / \sqrt{C_\varepsilon C_{1/\mu}}. \tag{2.9}$$

В частности, для линии на диэлектрической подложке, когда для всех слоев $\mu_r = 1$,

$$Z_в = 120\pi / \sqrt{C_\varepsilon C_1}. \tag{2.10}$$

Коэффициенты замедления $n$, распределение потенциалов и токов каждой волны определяются как собственные числа и собственные векторы задач:

$$[C_{1/\mu}]^{-1} [C_\varepsilon] [U] = n^2 [U]$$

или (2.11)

$$[C_\varepsilon] [C_{1/\mu}]^{-1} [I] = n^2 [I].$$

Каждому собственному числу $n_q^2$ соответствует так называемая нормальная волна [2.54] с определенным распределением напряжений $[U_q]$ и токов $[I_q]$. В отличие от линии в однородной среде, каждой нормальной волне соответствует определенный коэффициент замедления. При $N = 1$

$$n = \sqrt{C_\varepsilon / C_{1/\mu}}, \tag{2.12}$$

а при $\mu_r = 1$ $\varepsilon_{эф} = n^2 = C_\varepsilon / C_1$.

В $N$-полосковой линии собственные векторы токов $[I_q]$ и напряжений $[U_q]$ состоят из действительных величин, что следует из симметрии матриц $[C_\varepsilon]$ и $[C_{1/\mu}]$, и ортогональны, если $n_q^2 \neq n_j^2$, т. е. $[I_q]^т [U_j] = 2P_q \delta_{qj}$. Здесь $\delta_{qq} = 1$; $\delta_{qj} = 0$ при $q \neq j$. Величина $P_q$ равна мощности, переносимой $q$-й нормальной волной вдоль линии. Обозначим через $[U']$ и $[I']$ квадратные матрицы, состоящие из столбцов $[U_q]$ и $[I_q]$ соответственно. Тогда

$$[U']^т [I'] = [I']^т [U'] = 2 [P], \tag{2.13}$$

где $[P]$ — диагональная матрица порядка $N$, состоящая из коэффициентов $P_q$. Введя обозначения $[\mathrm{ctg}\, \beta z]$ и $[\mathrm{cosec}\, \beta z]$ для диагональных матриц $N$-го порядка, состоящих из коэффициентов $\mathrm{ctg}\, \beta_q z$ и $\mathrm{cosec}\, \beta_q z$ соответственно, где $\beta_q = k_0 n_q$ — волновое число для $q$-й нормальной волны, можно записать

$$[Y] = j \begin{bmatrix} -[I'] [\mathrm{ctg}\, \beta z] [U']^{-1} & [I'] [\mathrm{cosec}\, \beta z] [U']^{-1} \\ [I'] [\mathrm{cosec}\, \beta z] [U']^{-1} & -[I'] [\mathrm{ctg}\, \beta z] [U']^{-1} \end{bmatrix}. \tag{2.14}$$

При определении $[Y]$ можно избежать вычисления обратных матриц, воспользовавшись (2.13), поскольку матрица $[P]$ диагональная ($[U']^{-1} = (1/2) [I'] [P]^{-1}$). Кроме того, достаточно найти только матрицу $[U']$ или $[I']$, решив одно из двух уравнений (2.11). Другую матрицу можно найти непосредственно из телеграфных уравнений (2.1): $[U'] [n] = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}\, [C_{1/\mu}]^{-1} [I']$ или $[I'] [n] = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0} \times [C_\varepsilon] [U']$, где $[n]$ — диагональная матрица из элементов $n_q$. На основе описанного выше метода нормальных волн [2.55, 2.66] созданы программы [2.57—2.60] расчета устройств на связанных полосковых линиях.

Обычно таблицы и графики для $Z_в$ и $n$ линии, содержащей лишь два слоя ($\varepsilon_{r1} = 1$; $\mu_{r1} = 1$; $\varepsilon_{r2} \neq 1$), приводятся при $\mu_{r2} = 1$. Однако ими можно воспользоваться и при $\mu_{r2} \neq 1$, если из таблиц определить величины $Z_в^\varepsilon$ при $\varepsilon_r = \varepsilon_{r2}$, $Z_в^{1/\mu}$ при $\varepsilon_{r2} = 1/\mu_{r2}$ и $Z_в^1$ при $\varepsilon_{r2} = 1$. Тогда при $\mu_{r2} \neq 1$

$$Z_в = Z_в^\varepsilon Z_в^{1/\mu} / Z_в^1; \quad n = Z_в^{1/\mu} / Z_в^\varepsilon.$$

Коэффициент замедления $n_т$ волны квази-Т на низких частотах превышает $n_{LM_0}$, описываемый (2.7), если $h_1^2 \mu_{r1} \varepsilon_{r2} < h_2^2 \mu_{r2} \varepsilon_{r1}$ [2.53]. При этом волна квази-Т не излучает, т. е. не трансформируется в волну $LM_0$. При обратном знаке неравенства поле волны квази-Т излучается полосковой линией. С ростом частоты $n_т$ растет и может стать больше $n_{LM_0}$. Излучение из линии прекращается.

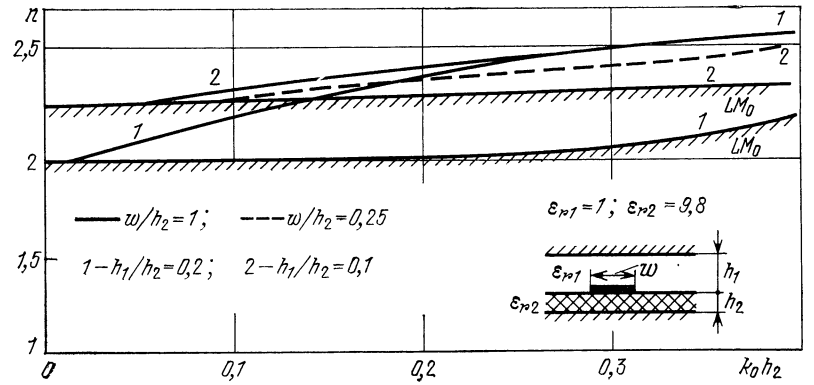



Рис. 2.7

Кривые дисперсии, построенные по результатам решения интегральных уравнений [2.53], приведены на рис. 2.7. Линией со штриховкой нанесена кривая дисперсии волны $LM_0$. Кривая дисперсии волны квази-Т начинается не при нулевой частоте ($k_0h_2 = 0$), как обычно, а при некотором значении $k_0h_2 > 0$. При $k_0h_2 \to 0$ кривая $n$ ($k_0h_2$) для этой волны должна пересечь кривую для $LM_0$-волны. Пересечение кривых волн квази-Т и $LM_0$, т. е. переход из области излучения в область неизлучения, смещается в сторону высоких частот по мере уменьшения расстояния $h_1$ и ширины полоски $w$.

Кроме волн квази-Т в линии могут существовать неизлучающиеся волны высшего типа [2.61, 2.62]. Их природу проще всего пояснить, если рассмотреть линию с одной полоской и пользоваться представлением о полном внутреннем отражении [2.63, 2.64]. Пусть слой магнитодиэлектрика толщиной $h$ с проницаемостями $\varepsilon_r$ и $\mu_r$ с одной стороны полностью металлизирован, а на другую его сторону нанесена металлическая полуплоскость (рис. 2.8). При этом область в диэлектрике слева от границы полуплоскости ($x < 0$) образует оптически более плотную среду, чем область справа. Волны высших типов в соответствии с концепцией Бриллюена можно рассматривать как суперпозицию плоских волн, падающих под углом $\theta$ к оси $x$ на границу раздела. Пусть плоская волна с одной компонентой электрического поля падает слева на границу раздела. Для нее $\sin\theta = k/k_0\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} = n/\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$. При малых углах падения волна частично преломляется, унося энергию от границы $x = 0$. При углах, превышающих некоторое критическое значение, наблюдается полное внутреннее отражение, т. е. излучение прекращается. Коэффициент $n$, соответствующий углу полного внутреннего отражения, равен $n_{LM_0}$. При $n > n_{LM_0}$ волна не излучается.

Кривые дисперсии волн квази-Т, $HE_1$ и $HE_2$ в МПЛ приведены [2.62, 2.63] на рис. 2.9 для случая, когда верхний экран удален настолько, что квази-Т-

волна не излучается. Линией со штриховкой обозначена граница излучения ($n_{LM_0}$). Штриховой линией нанесены кривые дисперсии прямоугольного волновода, ограниченного сверху и снизу электрическими стенками, а по бокам — магнитными. Такая модель полосковой линии широко используется при анализе неоднородностей (подробно рассмотрена в гл. 3) и носит название модели Олинера. Из рисунка видно, что кривые дисперсии волн $HE_1$ и $HE_2$ в МПЛ и волноводе при $n \geqslant n_{LM_0}$ близки. Отличие состоит в том, что в волноводе нет излучения и штриховые линии достигают точки $n = 0$, тогда как в МПЛ при $n < n_{LM_0}$ имеет место излучение, поэтому кривые обрываются при $n = n_{LM_0}$. На низких частотах коэффициенты замедления $n_{HE_1}$ и $n_{HE_2}$ выше, чем для соответствующих волн в волноводе, а на высоких — ниже.

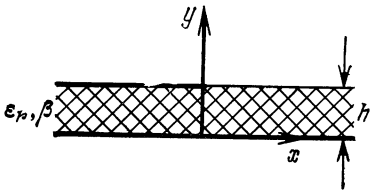



Рис. 2.8

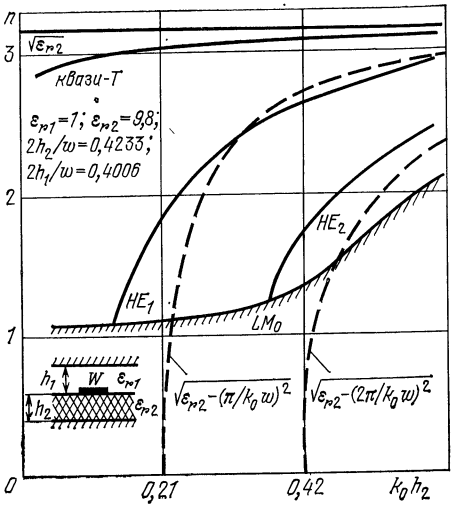



Рис. 2.9

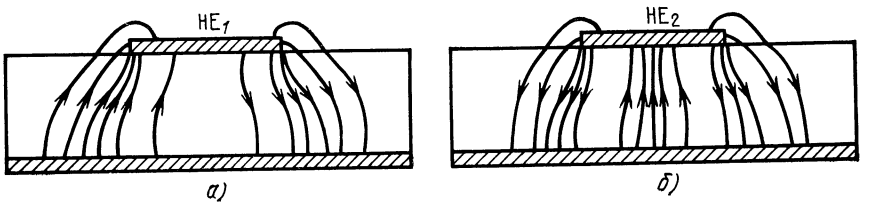
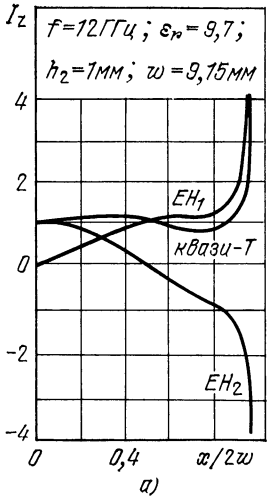



Рис. 2.10

Волнам Т, $HE_1$, $HE_2$ и т. д. соответствуют различные распределения поля и токов в поперечном сечении полоски [2.62, 2.63, 2.65]. При $t = 0$ поперечные составляющие электрического и магнитного полей и продольные составляющие тока стремятся к бесконечности как $\rho^{-1/2}$, где $\rho$ — расстояние до кромки бесконечно тонкой полоски. Продольные составляющие электрического и магнитного полей, а также поперечная составляющая тока стремятся к нулю как $\rho^{1/2}$. Если у квази-Т-волны электрическое поле по ширине полоски не изменяет знака, то у высших волн оно изменяет знак (рис. 2.10).

Распределение продольной $I_z(x)$ и поперечной $I_x(x)$ компонент токов для линии с удаленным верхним экраном ($h_1 = \infty$) приведено [2.65] на рис. 2.11 для половины ширины полоски. У волны квази-Т компонента $I_z(x)$ не изменяет знака, а значения $I_x(x)$ для этой волны на рис. 2.11, *б* следует умножить на $10^{-3}$. Эпюры токов проводимости на внутренней поверхности полоски, построенные на основе данных рис. 2.11, приведены на рис. 2.12. Для волн квази-Т это линии, направленные преимущественно вдоль $z$. Они переходят в токи сме-



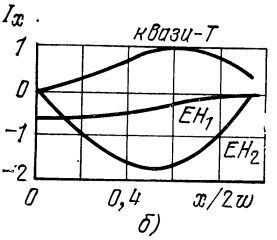




Рис. 2.11

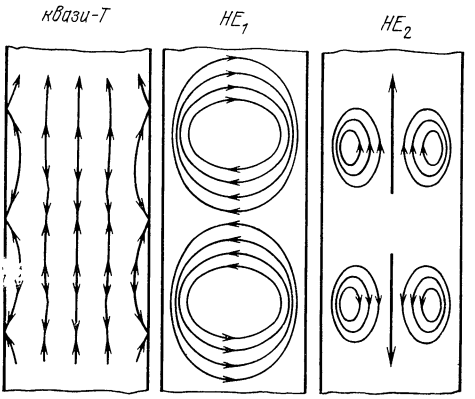



Рис. 2.12

щения, перпендикулярные плоскости рисунка. Для волн $HE_q$ линии тока могут замыкаться и на поверхности полосок. Число перемен знака продольной компоненты тока равно номеру $q$.

МПЛ с неизлучающимися волнами высшего типа называются микроволноводами [2.66]. Отрезки подобных линий используют в качестве резонаторов с добротностью до 600, тогда как на волне квази-Т добротность обычно не превышает 200. Объясняется это тем, что для всех волн, кроме квази-Т, существует критический угол полного внутреннего отражения. Поэтому открытый конец полосковой линии на волне квази-Т должен излучать, а на волне $HE_1$ может не излучать, если угол падения превышает критический, т. е. добротность резонатора определяется только омическими потерями в диэлектрике и в металле.

## 2.2. ОДНОРОДНАЯ СИММЕТРИЧНАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Симметричная полосковая линия (СПЛ) (см. рис. 2.3) представляет собой трехпроводную полосковую линию передачи с поперечным сечением в виде параллельных прямых, имеющая две плоскости симметрии *I* и *II*, линия пересечения которых параллельна направлению распространения энергии [2.1]. На рис. 2.3 *1* — полоска, *2* — металлический экран. Пространство между проводниками полностью заполнено однородной изотропной средой с параметрами $\varepsilon_a = \varepsilon_0\varepsilon_r$, $\mu_a = \mu_0\mu_r$, $\sigma_д$. Токонесущие поверхности выполнены из металла с проводимостью $\sigma_м$.

### ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

**Полоска нулевой толщины.** При $\sigma_м = \infty$, $t/b = 0$, $a = \infty$ точное значение $Z_в$ находится методом конформных отображений [2.3]:

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 30\pi K_1(k), \tag{2.15}$$

где $K_1(k) = K(k)/K(k')$, $k = \operatorname{sech}(\pi w/2b)$,

$$k' = \sqrt{1 - k^2}. \tag{2.16}$$

Хотя эллиптические интегралы достаточно полно табулированы [2.4], прямое использование таблиц нецелесообразно. В (2.15), как и в последующих равенствах для $Z_в$, эллиптические функции обычно входят в виде выражения $K_1(k)$, для которого получены следующие приближенные формулы [2.5], дающие погрешность вычисления не более $10^{-5}$:

1) при $0{,}5 \leqslant k^2 \leqslant 1$

$$K_1(k) = \ln[2(1+\sqrt{k})/(1-\sqrt{k})]/\pi; \tag{2.17}$$

2) при $0 < k^2 \leqslant 0{,}5$

$$K_1(k) = \pi/\ln[2(1+\sqrt{k'})/(1-\sqrt{k'})]. \tag{2.18}$$

Из (2.17) и (2.18) можно определить $k$ как функцию от $K_1(k)$ (рис. 2.13 и 2.14):

1) для $1 \leqslant K_1 \leqslant \infty$

$$k = [(e^{\pi K_1}-2)/(e^{\pi K_1}+2)]^2; \tag{2.19}$$

2) для $0 \leqslant K_1 \leqslant 1$

$$k = \sqrt{1-[(e^{\pi/K_1}-2)/(e^{\pi/K_1}+2)]^4}. \tag{2.20}$$

Согласно (2.16)

$$w/b = (2/\pi)\ln[(1/k)+\sqrt{(1/k)^2-1}]. \tag{2.21}$$

**Пример 2.1.** Определить ширину полоски СПЛ, заполненной ФАФ-4, при $t = 0$, $b = 4$ мм, если $Z_в = 50$ Ом. Определяем $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 50\sqrt{2{,}5} = 79$ Ом. Из (2.15) находим $K_1(k) = Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(30\pi) = 0{,}838$. Для найденного $K_1(k)$ опреде-

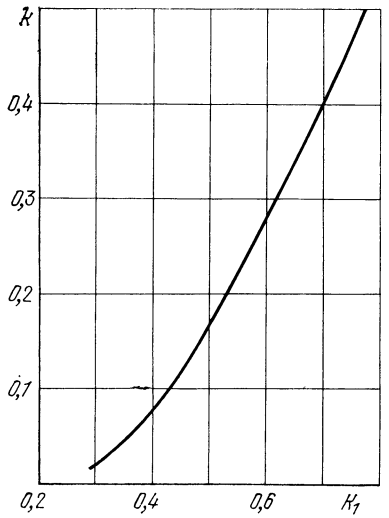



Рис. 2.13

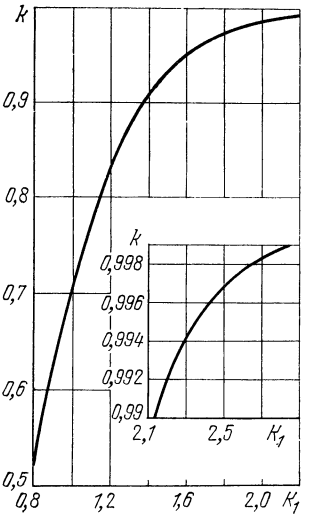



Рис. 2.14

ляем или из (2.20), или по графику (см. рис. 2.14) $k = 0{,}56$. Из (2.21) находим $w/b = 0{,}75$, т. е. $w = 0{,}75 \cdot 4 = 3$ мм.

При $a < \infty$, когда все пространство внутри и вне линии полностью заполнено однородным диэлектриком [2.6],

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 60\pi K_1(k), \tag{2.22}$$

где

$$k = (\sqrt{1+k_1^2}-k_2)/(\sqrt{1+k_1^2}+k_2), \tag{2.23}$$

а $k_1$ и $k_2$ определяются следующими уравнениями:

$$a/b = 2\,[K(k_2)\,E(\gamma, k_2) - E(k_2)\,F(\gamma, k_2)]/\pi; \tag{2.24}$$

$$w/b = 2K(k_2)\,[E(k_2)\,F(p, k_2)/K(k_2) - E(p, k_2) + \\ + (\sqrt{k_1^2 - k_2^2 + 1})/(k_1\sqrt{1 + k_1^2})]/\pi, \tag{2.25}$$

где $\sin^2\gamma = (1 - E(k_2)/K(k_2))/k_2^2$, $\operatorname{tg} p = 1/k_1^2$.

Результаты расчета по (2.22) представлены на рис. 2.15, там же построен график для $a = \infty$, рассчитанный по (2.15). Сравнение показывает, что при $a/b > w/b + 0{,}5$, точное значение $Z_в$ при конечном $a$ отличается менее чем на 1% от $Z_в$ при $a = \infty$.

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях размеров и $\varepsilon_r$ определяется по формуле

$$\Delta Z_в/Z_в = m_1\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r + m_2\Delta w/w + \\ + m_3\Delta b/b + m_4\Delta t/t, \tag{2.26}$$

где

$$m_1 = \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial\varepsilon_r}(\ln Z_в); \\ m_2 = w\frac{\partial}{\partial w}(\ln Z_в); \\ m_3 = b\frac{\partial}{\partial b}(\ln Z_в); \\ m_4 = t\frac{\partial}{\partial t}(\ln Z_в), \tag{2.27}$$

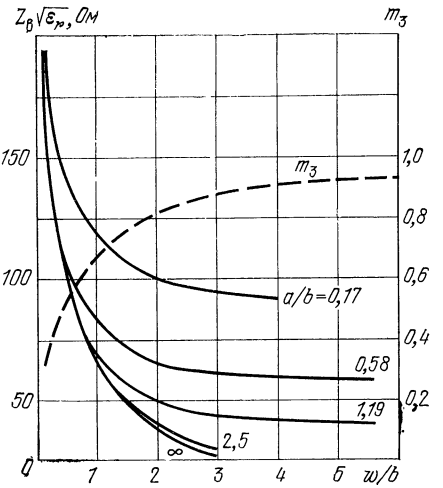


Рис. 2.15

для СПЛ с полоской нулевой толщины $m_4 = 0$. Выполнив необходимые преобразования, получаем: $m_1 = -0{,}5$;

$$m_3 = -m_2 = \frac{\pi}{2}\,\frac{w}{b}\,\frac{[E(k)/K(k) + E(k')/K(k') - 1]}{\operatorname{th}(\pi w/2b)}. \tag{2.28}$$

Результаты расчета $m_3$ по (2.28), приведенные на рис. 2.15, показывают, что относительное изменение $Z_в$ при отклонении размеров СПЛ будет больше для линий с меньшим $Z_в$.

**Пример 2.2.** Определить изменение $Z_в$ для СПЛ, рассмотренной в примере 2.1, при отклонении ширины полоски на $\pm$ 2% от номинального значения 3 мм. Так как $\Delta b = \Delta\varepsilon_r = 0$, то $m_1 = m_3 = 0$. По величине $w/b = 0{,}75$ (см. пример 2.1) из графика (см. рис. 2.15) определяем — $m_2 = 0{,}62$. Из (2.26) получаем $\Delta Z_в/Z_в = -0{,}62 \times (\pm\,0{,}02) = \mp\,0{,}124$. Значит, $Z_в$ может лежать в интервале 49,38 ... 50,62 Ом.

**Полоска конечной толщины.** При $\sigma_м = \infty$, $t/b > 0$ и $a = \infty$ точное значение $Z_в$ находится методом конформных отображений [2.7] и описывается (2.15). Параметр $k$ определяется из следующей системы уравнений:

$$t/b = [d\Pi(d, p) - K(p)]/D, \tag{2.29}$$

$$w/b = [K(\sqrt{1 - p^2}) - dk^2\Pi(1 - k^2d, \sqrt{1 - p^2})]/D, \tag{2.30}$$

где $D = d\,[\Pi(p^2 - p^2/k^2, \sqrt{1 - p^2}) + \Pi(k^2/(k^2 - 1), p) - K(p)]$; $d = 1 - p^2 + p^2/k^2$. Результаты расчета по (2.15), (2.29) и (2.30) приведены в [2.5] и представлены на рис. 2.16, 2.17.

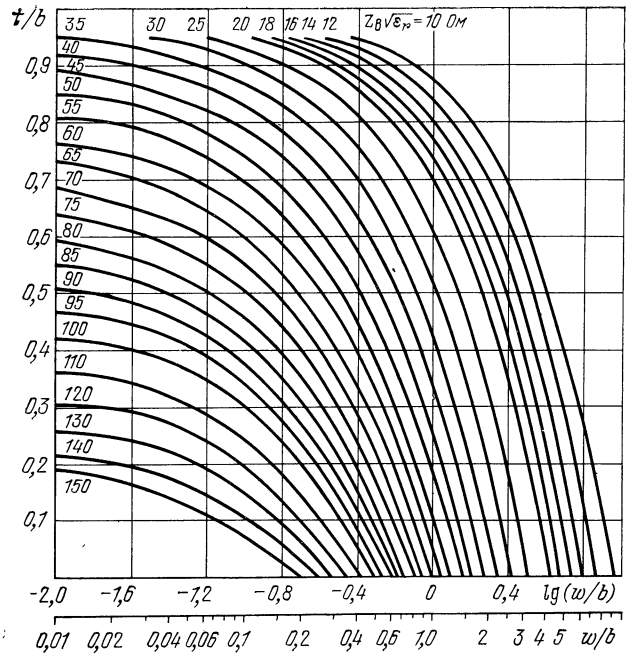



Рис. 2.16

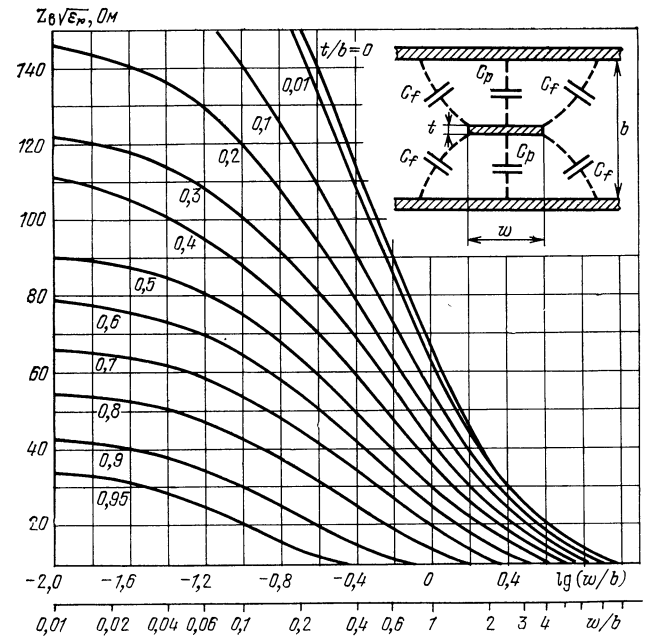



Рис. 2.17

С погрешностью, не превышающей 1,24% и достигаемой при $w/b = 0{,}35 \times \times (1 - t/b)$, $Z_в$ СПЛ определяется по следующим формулам [2.3, 2.8]:

1) при $w/b \geqslant 0{,}35\,(1 - t/b)$

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 30\pi/(a_1 w/b + C_f), \tag{2.31}$$

где $a_1 = 1/(1 - t/b)$,

$$\pi C_f = 2a_1 \ln(a_1 + 1) - (a_1 - 1)\ln(a_1^2 - 1). \tag{2.32}$$

При выводе (2.31) предполагалось, что полная погонная емкость $C$ слагается из емкости плоского конденсатора $C_p$ и емкости за счет краевого эффекта $C_f$ (см. рис. 2.17): $C = 2C_p + 4C_f$, где $C_f$ определяется из (2.32), а $C_p = 2a_1 w/b$;

2) при $w/b \leqslant 0{,}35\,(1 - t/b)$ и $w \geqslant t$

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 60 \ln(4b/\pi d), \tag{2.33}$$

где $d/w = 0{,}5 + 0{,}8t/w - 0{,}12\,(t/w)^2$. (2.34)

**Пример 2.3.** Определить ширину полоски СПЛ, заполненной ФАФ-4, при $b = 4$ мм, $t = 0{,}03$ мм, если $Z_в = 50$ Ом. Определяем $Z_в = 50\sqrt{2{,}5} = 79$ Ом. Так как $t/b = 0{,}03/4 = 0{,}0075$, то согласно (2.32) $C_f = 0{,}457$. Из (2.31) находим $w/b = [30\pi/(Z_в\sqrt{\varepsilon_r}) - C_f]/a_1 = 0{,}73$, т. е. $w = 0{,}73 \cdot 4 = 2{,}92$ мм.

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях $\varepsilon_r$ и размеров СПЛ рассчитывается по (2.26), где $m_1 = -0{,}5$:

1) при $w/b \geqslant 0{,}35\,(1 - t/b)$

$$30\pi m_2 = -Z_в\sqrt{\varepsilon_r}\, a_1 w/b,\quad 30\pi m_3 = Z_в\sqrt{\varepsilon_r}\, a_1^2\,(w/b + lt/b),\quad 30\pi m_4 = -Z_в\sqrt{\varepsilon_r} \times \times a_1^2\,(w/b + l)\,t/b,$$

где $a_1 = 1/(1 - t/b)$, $l = \ln(2b/t - 1)/\pi$;

2) при $w/b \leqslant 0{,}35\,(1 - t/b)$ и $w > t$

$$m_2 = -60\,[0{,}5 + 0{,}12\,(t/w)^2]/(dZ_в\sqrt{\varepsilon_r}),\quad m_3 = -m_4 = 60/Z_в\sqrt{\varepsilon_r},$$

где $d$ определяется из (2.34).

Результаты расчета представлены на рис. 2.18, 2.19. Для сравнительно тонких полосок ($t/b < 0{,}3$) основной вклад в изменение $Z_в$ вносят отклонения $w$ и $b$, причем для СПЛ с малым $Z_в$ преобладающее влияние оказывает отклонение $b$, а для СПЛ с высоким $Z_в$ — отклонение $w$; для сравнительно толстых полосок ($t/b > 0{,}4$) основной вклад в изменение $Z_в$ вносят $b$ и $t$.

**Центральная полоска с закругленными краями.** Чтобы передать по СПЛ относительно высокий уровень мощности, полоску делают сравнительно толстой с закругленными краями (рис. 2.20). Емкость на единицу длины такой линии приближенно определяется как сумма емкости плоского конденсатора, ширина пластин которого равна $w - 2r = w - t$, и емкости полосковой линии с круглой полоской диаметром $d = t$:

$$C = 4a_1\,(w/b - t/b) + 120\pi/Z_1\sqrt{\varepsilon_r},$$

где $a_1 = 1/(1 - t/b)$; $Z_1$ — волновое сопротивление СПЛ с круглой полоской, определяемое с погрешностью $2 \cdot 10^{-5}$% по формуле [2.5]

$$Z_1\sqrt{\varepsilon_r} = 60\{\ln[(\sqrt{1+p} + \sqrt{1-q})/\sqrt{p+q}] - 0{,}033\,x^4 + 0{,}014x^8\}, \tag{2.35}$$

где $p = 2\,\mathrm{sh}^2 x$, $q = 2\sin^2 x$, $x = \pi t/4b$. Используя выражение для $C$, получаем при $a_1 = 1/(1 - t/b)$

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 30\pi Z_1\sqrt{\varepsilon_r}/[30\pi + Z_1\sqrt{\varepsilon_r}\, a_1\,(w/b - t/b)]. \tag{2.36}$$

Результаты расчета по (2.36) представлены на рис. 2.20, 2.21, кривая для $t/b = 0$ на рис. 2.20 рассчитана по (2.15).

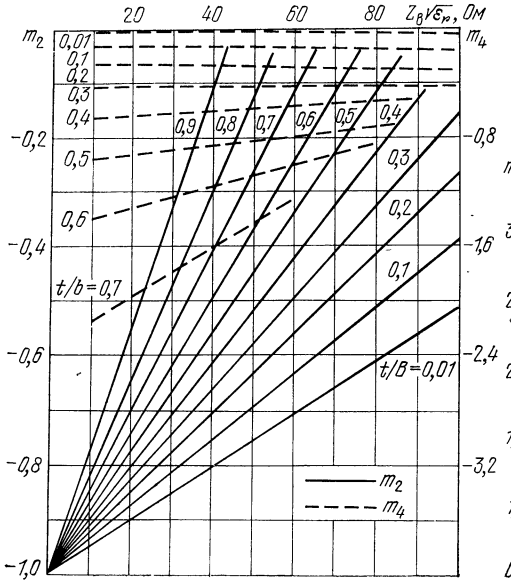



Рис. 2.18

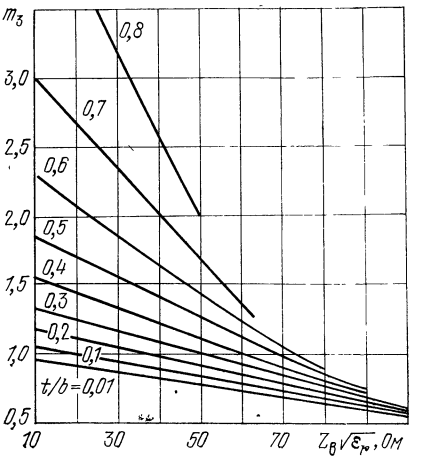



Рис. 2.19

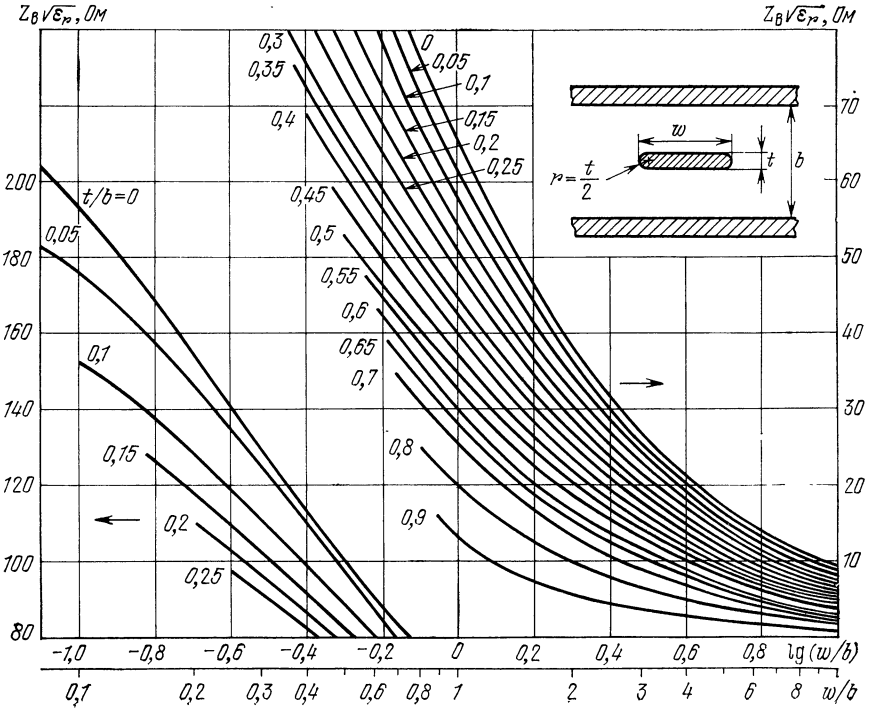



Рис. 2.20

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях $\varepsilon_r$ и размеров СПЛ определяется по формуле (2.26), где

$$m_1 = -0{,}5; \quad 30\pi m_2 = -Z_в \sqrt{\varepsilon_r}\, a_1\, w/b;$$

$$30\pi m_3 = Z_в \sqrt{\varepsilon_r}\, [a_1^2\, (w/b - t/b) + A];$$

$$30\pi m_4 = -Z_в \sqrt{\varepsilon_r}\, [a_1^2\, (w/b - 1)\, t/b + A],$$

где $a_1 = 1/(1 - t/b)$;

$$A = 1800\pi x\, [(q \operatorname{sh} x + p \sin x)/\sqrt{pq}\, (p - q) + 0{,}13\, (x/2)^3 - 0{,}11\, (x/2)^7];$$

$$p = \operatorname{ch} x; \quad q = \cos x, \quad x = \pi t/4b.$$

Результаты расчета представлены на рис. 2.22. Для СПЛ с относительно большим $Z_в$ преобладающее влияние на его значение оказывают отклонения $b$ и $t$,

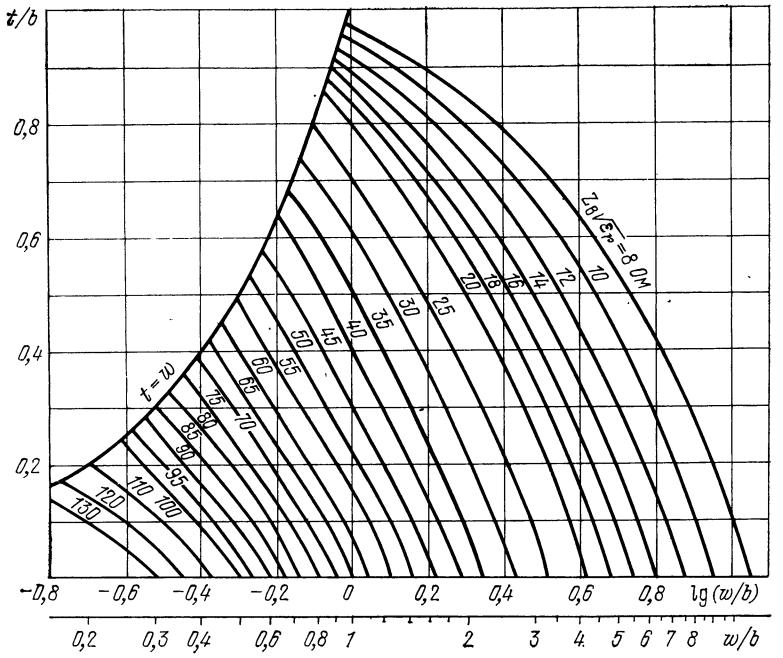



Рис. 2.21

а для СПЛ с относительно малым $Z_в$ — $w$ и $b$. Следует отметить, что при $t/b > 0{,}4$ $|m_2|$ практически не зависит от $t/b$; при $t/b \approx 0{,}3$ $m_3$ практически не зависит от $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$.

**Несимметрично расположенная полоска конечной толщины.** Поперечное сечение линии изображено на рис. 2.23; $Z_в$ определяется по формуле

$$Z_в \sqrt{\varepsilon_r} = 120\pi/C.$$

Полная погонная емкость

$$C = C_{p1} + C_{p2} + 2C_{f1} + 2C_{f2},$$

где $C_{p1} = 2rw/b$, $C_{p2} = 2qw/b$ — емкости плоских конденсаторов $r = 1/(1 - t/b - 2s/b)$; $q = 1/(1 - t/b + 2s/b)$. Краевые емкости определяют по следующим формулам:

1) при $w/b \geqslant 0{,}35\ (1 - t/b)$

$$\pi C_{f1} = 2rl \ln (rl + 1) - r \ln (r^2 l^2 - 1)\ t/b, \quad \pi C_{f2} = 2qm \ln (qm + 1) - - q \ln (q^2 m^2 - 1)\ t/b,$$

где $l = 1 - 2s/b$, $m = 1 + 2s/b$;

2) при $0{,}05 < w/(b - t) < 0{,}35$ в $C_{p1}$ и $C_{p2}$ $w/b$ следует заменить на $w'/b = 0{,}06\ (1 - t/b) + 0{,}83 w/b$.

При $s = 0$ формула для $Z_в$ совпадает с (2.31). Результаты расчета $Z_в$ для $s = 0$ сравнивались с точными данными, полученными по (2.15), с учетом (2.29), (2.30) [2.5]. Для указанных пределов изменения размеров линии ошибка не пре-

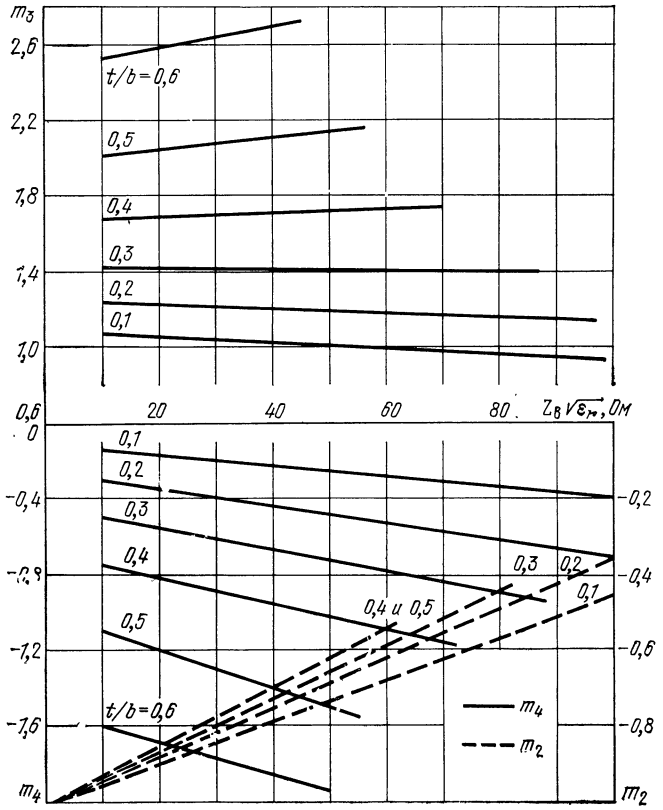



Рис. 2.22

вышает 1,5%. Результаты расчета по вышеприведенным формулам представлены на рис. 2.23—2.25. Смещение полоски в СПЛ при неизменных $w/b$ и $t/b$ приводит к уменьшению $Z_в$, что можно использовать для уменьшения $w$ при заданном $Z_в$. Приведенные формулы позволяют оценить влияние технологических погрешностей изготовления СПЛ, в частности несимметричное расположение полоски на $Z_в$. На рис. 2.26 показана зависимость $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$ 50-омной СПЛ от смещения полоски при разных $t/b$. То же смещение, но более толстой полоски вызывает большее изменение $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$. При $s/b \leqslant 0{,}05$ толщина полоски практически не влияет на изменение $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$ при ее смещении. На этом же рисунке показано относительное изменение $Z_в$ от $s/b$ для $t/b = 0{,}05$ при разных $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$. При $s/b \leqslant 0{,}05$ $Z_в\sqrt{\varepsilon_r}$ изменяется не более чем на 1% от номинального значения.

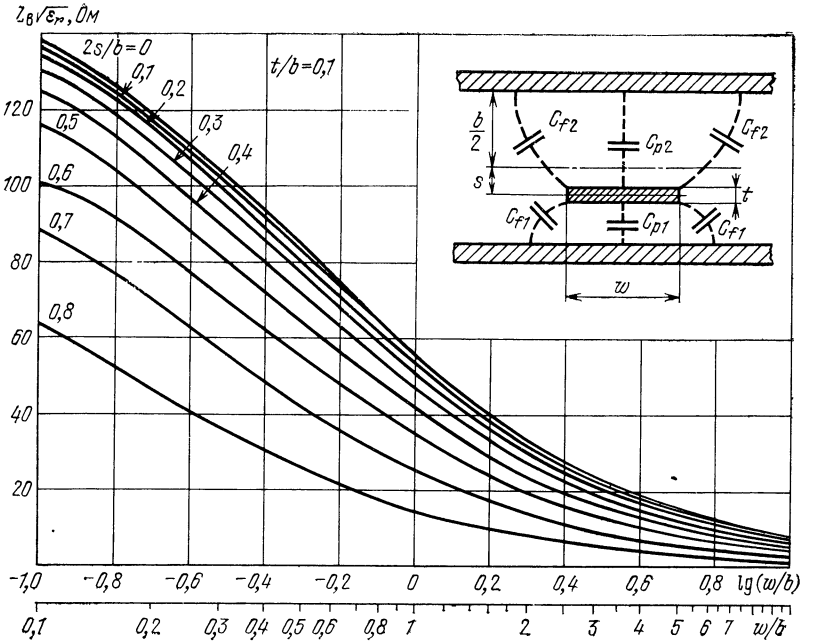



Рис. 2.23

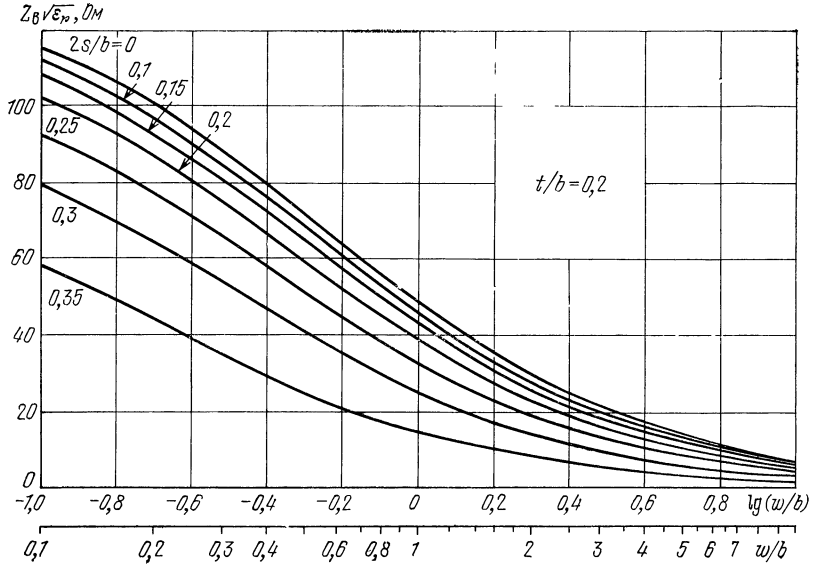



Рис. 2.24

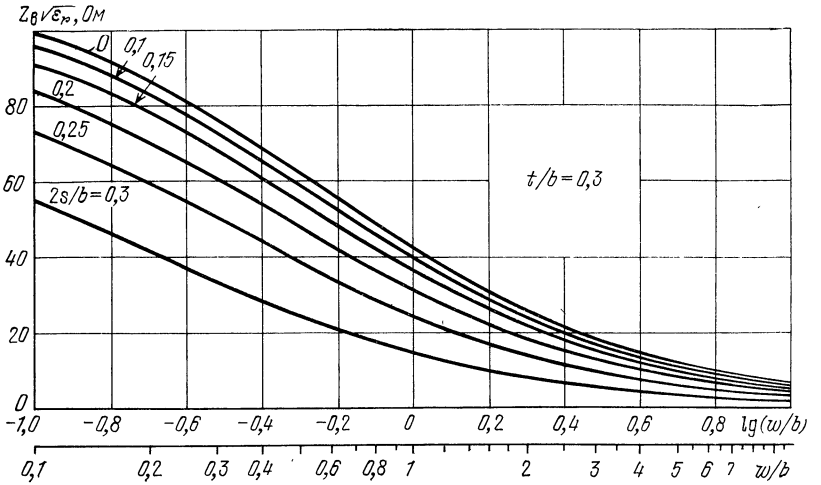



Рис. 2.25

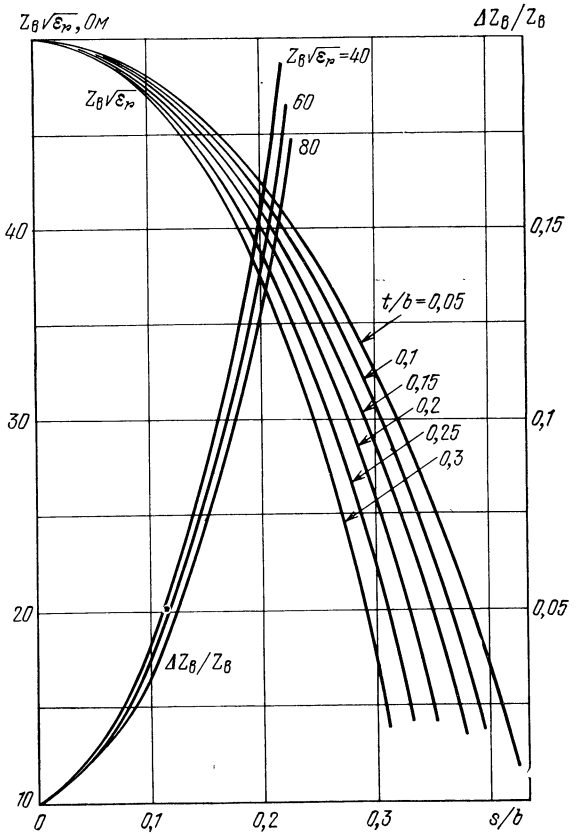



Рис. 2.26

**Пример 2.4.** Определить $Z_в$ СПЛ при $w$, $b$, $t$ и заполнении таких же, как в примере 2.3, если $s = 0{,}5$ мм. Находим: $w/b = 0{,}73$; $t/b = 0{,}0075$ и $s/b = 0{,}5/4 = 0{,}125$. Определяем вспомогательные величины: $r = 1/(1-0{,}0075 - 2\cdot 0{,}125) = 1{,}347$; $q = 1/(1 - 0{,}0075 + 2\cdot 0{,}125) = 0{,}805$; $l = 1 - 2\cdot 0{,}125 = 0{,}75$; $m = 1 + 2\cdot 0{,}125 = 1{,}25$.

Вычисляем емкости плоских конденсаторов $C_{p1} = 2\cdot 1{,}347\cdot 0{,}73 = 1{,}967$; $C_{p2} = 2\cdot 0{,}805\cdot 0{,}73 = 1{,}175$ и краевые емкости $C_{f1} = 0{,}462$; $C_{f2} = 0{,}454$. Тогда $C = 1{,}967 + 1{,}175 + 2\cdot 0{,}462 + 2\cdot 0{,}454 = 4{,}974$ и $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 120\pi : 4{,}974 = 75{,}79$ Ом, т. е. $Z_в = 75{,}79/\sqrt{2{,}5} = 47{,}94$ Ом.

## СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Основной волной СПЛ является Т-волна, для которой [2.20]

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y)\, e^{j(\omega t - \beta z)}; \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y)\, e^{j(\omega t - \beta z)}, \tag{2.37}$$

где $\mathbf{E}(x, y) = \mathbf{x}_0 E_x(x, y) + \mathbf{y}_0 E_y(x, y)$; $H_y(x, y) = \sqrt{\varepsilon_a/\mu_a}\, E_x(x, y)$;

$$H_x(x, y) = -\sqrt{\varepsilon_a/\mu_a}\, E_y(x, y); \quad \beta = \omega\sqrt{\varepsilon_a\mu_a}.$$

При $t = 0$ $\mathbf{E}(x, y)$ находится методом конформных отображений и для достаточно широкой полоски ($w/b > 0{,}35$) рассчитывается по формулам [2.15]

$$E_x(x, y) = 2U \sin\theta/(bp); \quad E_y(x, y) = 2U\cos\theta/(bp),$$

где $p = \sqrt[4]{1 - 2e^{-m}\cos n + e^{-2m}}$; $2\theta = \operatorname{arctg}[e^{-m}\sin n/(1 - e^{-m}\cos n)]$; $m = 2\pi x/b$; $n = 2\pi y/b$; $U$ — разность потенциалов между полоской и экраном.

В плоскости полоски ($y = 0$ на рис. 2.27)

$$|\mathbf{E}| = 2U/(b\sqrt{|1 - e^{-m}|}),$$

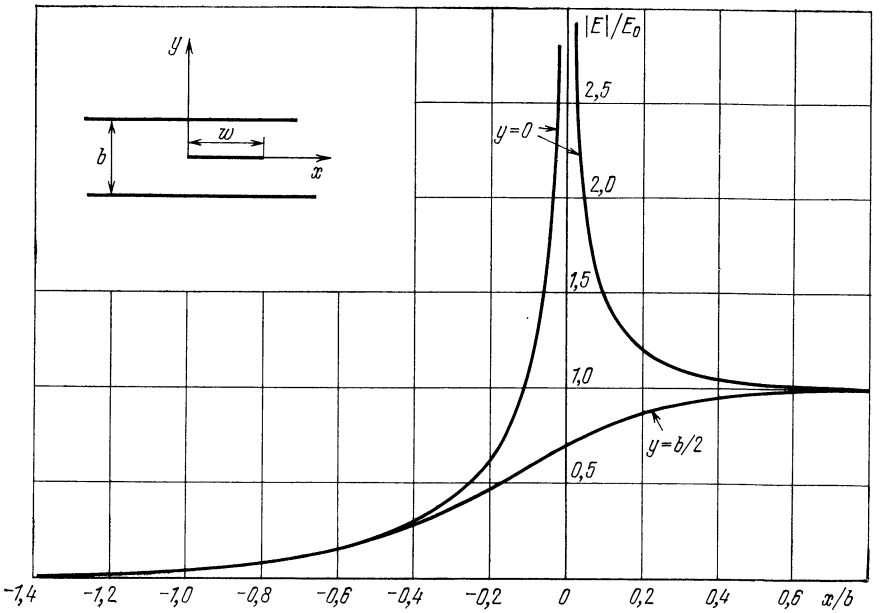



Рис. 2.27

а вблизи экрана ($y = b/2$)

$$|E| = 2U/(b\sqrt{1+e^{-m}}).$$

Вблизи края полоски при $x \to 0$ $|E| \to \infty$, что обусловлено концентрацией поверхностных зарядов вблизи краев. При удалении от края полоски напряженность электрического поля уменьшается, стремясь или к нулю, или к напряженности поля плоского конденсатора $E_0 = 2U/b$. Вблизи экрана напряженность электрического поля монотонно изменяется от нуля до $E_0$. Ширина экрана $a$ (см. рис. 2.3), при которой поле вблизи края экрана практически равно нулю, удовлетворяет неравенству $a > w + (3 \ldots 4)\, b$. Распределение плотности поверхностного заряда и плотности поверхностного тока на полоске и экране имеет такой же вид, как и распределение напряженности электрического поля вблизи металлических поверхностей (см. рис. 2.27).

## ПОТЕРИ

Если общие потери в линии относительно невелики, то коэффициент затухания распространяющейся волны определяют исходя из структуры поля при отсутствии потерь:

$$\alpha\ [\text{дБ/м}] = \alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{м}}, \tag{2.38}$$

где $\alpha_{\text{д}}$ находится по приближенной формуле [2.20]

$$\alpha_{\text{д}}\ [\text{дБ/м}] \approx 91\sqrt{\varepsilon_r}\, f\, \operatorname{tg}\delta, \tag{2.39}$$

$f$ — частота, ГГц; $\alpha_{\text{м}}$ описывается следующими приближенными формулами [2.8]:

1) при $w/b \geqslant 0{,}35\,(1 - t/b)$

$$\alpha_{\text{м}} b\ [\text{дБ}] = 2{,}02\cdot 10^{-6}\sqrt{qf}\, Z_{\text{в}}\varepsilon_r\, [a_1 + 2a_1^2 w/b + a_1^2\,(1 + t/b)\ln(2b/t - 1)/\pi]; \tag{2.40}$$

2) при $w/b < 0{,}35\,(1 - t/b)$ и $w > t$

$$\alpha_{\text{м}} b\ [\text{дБ}] = 0{,}0114\sqrt{qf\varepsilon_r}\{1 + b\,[0{,}5 + 0{,}669 t/w - 0{,}255\,(t/w)^2 + \\ + \ln(4\pi w/t)/2\pi]/d\}/Z_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon_r}, \tag{2.41}$$

где $q = \sigma_{\text{медь}}/\sigma$ — относительное сопротивление металла, из которого изготовлены проводники СПЛ (см. табл. 1.6); $d$ определяется из (2.34); $a_1 = 1/(1 - t/b)$.

Результаты расчета по (2.40) и (2.41) представлены на рис. 2.28. При $t/b \to 0$ $\alpha_{\text{м}} \to \infty$, что связано с особенностями распределения тока на краях полоски (см. рис. 2.11, *а*). Для каждого значения $Z_{\text{в}}$ существует оптимальное значение $t/b$, при котором $\alpha_{\text{м}}$ минимально (рис. 2.29). Поскольку затухание в проводниках обратно пропорционально площади поверхности, по которой течет ток, то коэффициент затухания, обусловленный потерями в полоске $\alpha_{\text{п}}$, можно выразить через $\alpha_{\text{м}}$, $C_p$ и $C_f$ (см. рис. 2.17) [2.14]:

$$\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{м}}\,(C_p + 2C_f)/[2\,(C_p + C_f)]. \tag{2.42}$$

На рис. 2.28 пунктиром нанесена зависимость добротности СПЛ $Q_{\text{м}}$ от $t/b$ ($f$, ГГц; $b$, мм). На рис. 2.30, 2.31 приведена частотная зависимость $\alpha$ для СПЛ, имеющей $Z_{\text{в}} = 50$ и 75 Ом, заполненной диэлектриком ФФ-4 (рис. 2.30) или ФАФ-4 (рис. 2.31), для двух значений толщины полоски. При расчете предполагалось, что проводники выполнены из меди.

**Пример 2.5.** Определить $\alpha$ и $Q_0$ для СПЛ с данными, приведенными в примере 2.3 на частоте $f = 1$ ГГц, если полоски выполнены из меди ($q = 1$). Находим $Z_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon_r} = 79$ Ом; $w/b = 0{,}73$; $t/b = 0{,}0075$. По формуле (2.40) или графикам на рис. 2.28 при $Z_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon_r} = 79$ Ом и $t/b = 0{,}0075$ определяем $\alpha_{\text{м}} b\cdot 10^3/\sqrt{qf\varepsilon_r} = 0{,}684$; $Q_{\text{м}}\sqrt{q}/(b\sqrt{f}) = 130$, т. е. $\alpha_{\text{м}} = 0{,}684\cdot\sqrt{1\cdot 1\cdot 2{,}5}/(4\cdot 10^{-3}\cdot 10^3) = 0{,}27$ дБ/м и $Q_{\text{м}} = 130\cdot 4\cdot\sqrt{1} = 532$.

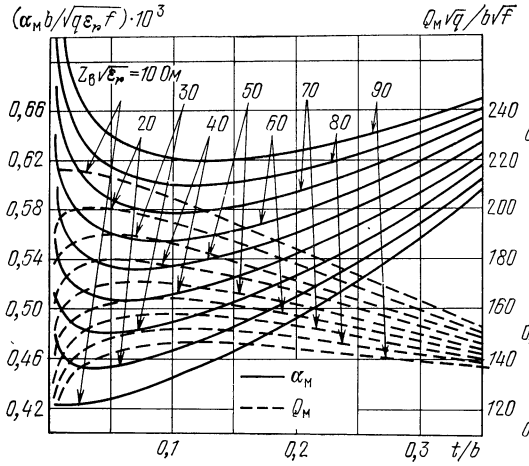



Рис. 2.28

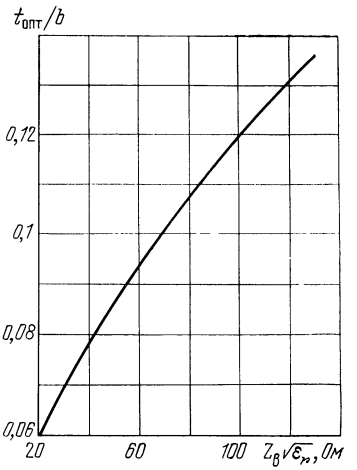



Рис. 2.29

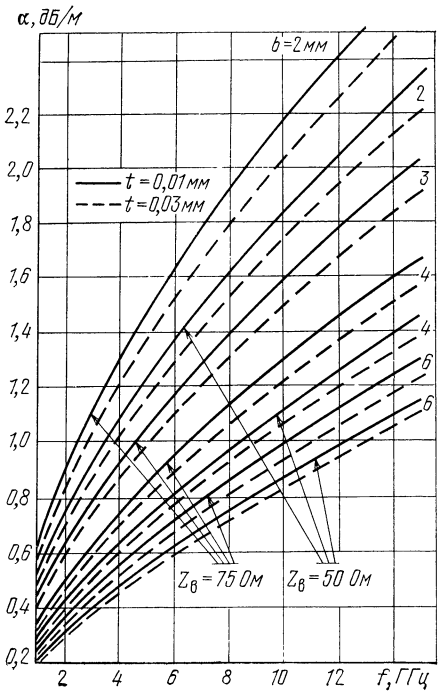



Рис. 2.30

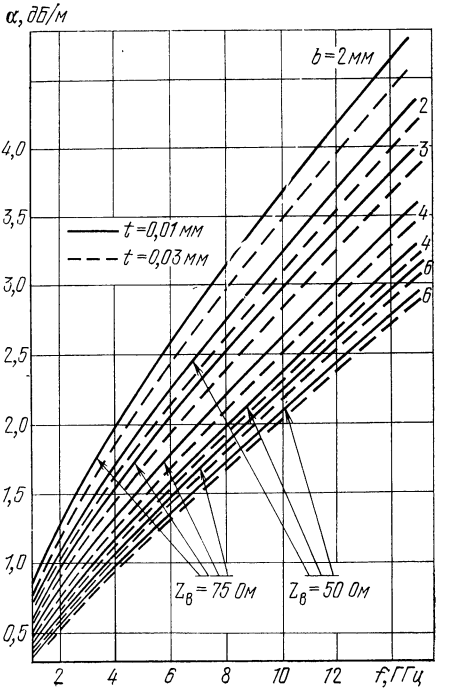



Рис. 2.31

Согласно (2.39) $\alpha_д = 91 \cdot \sqrt{2{,}5} \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0{,}14$ дБ/м, т. е. $\alpha = 0{,}27 + 0{,}14 = 0{,}41$ дБ/м.

Добротность, обусловленная потерями в диэлектрике $Q_д = 1/\mathrm{tg}\,\delta = 1000$. Собственная добротность СПЛ $Q_0 = Q_м Q_д/(Q_м + Q_д) = 347$.

## ПРЕДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

Конструкция СПЛ ограничивает уровень передаваемой мощности; СПЛ обычно нормально работает при уровне мощности, более низком, чем у полых и коаксиальных волноводов, что объясняется повышенной концентрацией поля вблизи края полоски, рассеянием мощности в заполняющем диэлектрике и т. д.

**Импульсная мощность.** До настоящего времени проблема нахождения предельной импульсной мощности полосковых устройств исследована слабо. Теоретический анализ осложняется большим числом трудно учитываемых факторов и требует знания точной структуры электромагнитного поля в линии. Весьма сложен учет технологических факторов. Поэтому в настоящее время экспериментальное макетирование во многих случаях является единственно возможным способом разработки линий с высокой электрической прочностью [2.16].

Для первоначальной и весьма приближенной оценки предельной электрической прочности СПЛ можно использовать следующее выражение, полученное для согласованной линии с воздушным заполнением при нормальных давлении, ионизации и влажности с полоской, имеющей закругления (см. рис. 2.20) [2.17]:

$$P_{пред}\,[кВт] = E^2_{пред}\, b^2 \cdot 10^3\, (t/b)\,(1 - t/2b)\,(1 + d/t)^2/(9Z_в), \qquad (2.43)$$

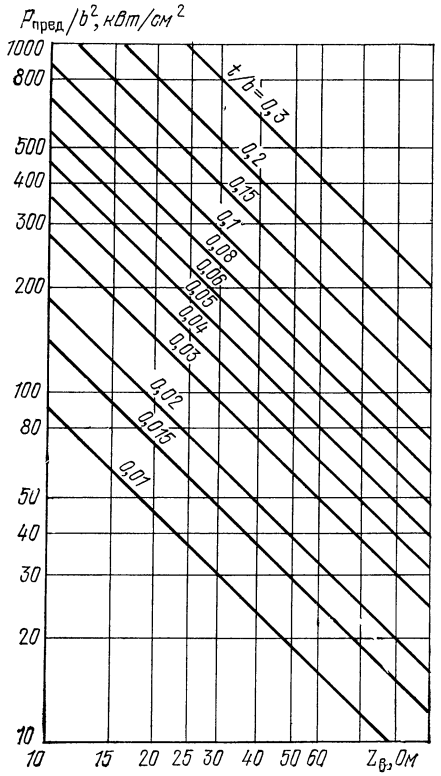



Рис. 2.32

где пробивная напряженность электрического поля $E_{пред}$, кВ/см, для воздуха при нормальных условиях определяется из табл. 2.1; $d$ — минимальное расстояние между параллельными пластинами, при котором поле вызывает пробой, зависящее от длины волны, давления и длительности передаваемого импульса [2.16]; все размеры в (2.43) — в сантиметрах.

Результаты расчета по (2.43) для $E_{пред} = 29$ кВ/см показаны на рис. 2.32. При $b \gg t \gg d$ формула (2.43) упрощается:

$$P_{пред}\,[кВт] \approx E^2_{пред}\, t \cdot b \cdot 10^3/(9Z_в). \qquad (2.44)$$

Как следует из (2.43) и (2.44), для увеличения $P_{пред}$ СПЛ с воздушным заполнением необходимо уменьшать $Z_в$, а также увеличивать

Таблица 2.1

**Пробивная напряженность электрического поля при нормальных условиях**

| λ, см | 35 | 10 | 3,2 | 0,8 |
|---|---|---|---|---|
| $E_{пред}$, кВ/см | 28,5 | 29,5 | 30,0 | 40,0 |

толщину полоски, края которой обязательно закруглены. При давлении $p$ и температуре $T$, отличных от нормальных [2.16],

$$P'_{\text{пред}} = P_{\text{пред}} [2{,}9 \cdot 10^{-3} p/T]^{3/2},$$

где $P_{\text{пред}}$ определяется из (2.43) или (2.44); $p$ — давление, Па; $T$ — температура, К.

Предельную импульсную мощность можно повысить, заполняя СПЛ жидким, газообразным или твердым диэлектриком. При заполнении твердым диэлектриком особое внимание следует обратить на выполнение конструкции, так как наличие воздушного зазора, превышающего среднюю длину свободного пробега электрона ($\approx 10^{-5}$ см при нормальном атмосферном давлении), уменьшает $P_{\text{пред}}$ в $\varepsilon_r^2$ раз. Кроме того, может произойти тепловой пробой диэлектрика при мощности, гораздо меньшей предельной для линии с воздушным заполнением.

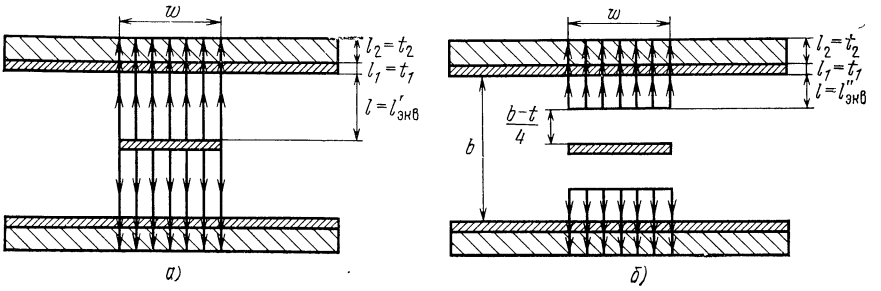



Рис. 2.33

**Средняя непрерывная мощность.** Максимальная средняя мощность, передаваемая по СПЛ, заполненной диэлектриком, ограничивается максимальной рабочей температурой (теплостойкостью) материалов линии. Рассеяние мощности в полоске $P_{\text{п}}$ и диэлектрике $P_{\text{д}}$ вызывает тепловой поток, протекающий перпендикулярно направлению распространения волны, из-за чего устанавливается разница температур между проводниками линии. Линии указанного теплового потока в поперечном сечении СПЛ совпадают с силовыми линиями **E** для основной волны (см. рис. 2.4).

Для установившегося состояния плоскопараллельного теплового потока мощностью $P$, имеющего поперечное сечение $s$ и протекающего по диэлектрику с удельным тепловым сопротивлением $R$ [° С·м/Вт], разница температур на длине $l$ [2.19]

$$\Delta T = RlP/s. \tag{2.45}$$

(Величина $R$ обратно пропорциональна коэффициенту теплопроводности.)

Для приближенной оценки максимальной средней мощности можно рассмотреть следующую модель СПЛ (рис. 2.33); экран СПЛ состоит из тонкого токонесущего слоя толщиной $t_1$ и сравнительно толстой алюминиевой пластины толщиной $t_2$, позволяющей учесть влияние элементов крепления и других внешних элементов на теплоотвод из линии. Для рассматриваемой модели изменение температуры между внешней поверхностью экрана и полоской

$$\Delta T_{\Sigma}/P_0 = \Delta T_1/P_0 + \Delta T_2/P_0 + \Delta T_3/P_0, \tag{2.46}$$

где $\Delta T_1$ — разница температур между верхней и нижней поверхностями диэлектрической пластины, ° С; $\Delta T_2$ — разница температур между верхней и нижней поверхностями токонесущего слоя экрана, ° С; $\Delta T_3$ — разница температур между внешней и внутренней поверхностями алюминиевой пластины экрана, ° С. Реальный тепловой поток, связанный с единичной длиной СПЛ и имеющий мощность $P_{\text{п}} = \delta_{\text{п}} P_0$, где $\delta_{\text{п}} = 1 - 10^{-\alpha_{\text{п}}/10}$, заменяется эквивалентным плоскопараллельным тепловым потоком (рис. 2.33, *а*) той же мощности $P_{\text{п}}$,

но имеющим сечение $s[\text{м}^2] = 2w$ и проходящим путь в диэлектрике [2.14]

$$l'_{\text{экв}} = (b-t)/[2\,(1+2C_f/C_p)], \tag{2.47}$$

где $C_f$ и $C_p$ указаны на рис. 2.17. Рассеяние мощности $P_{\text{д}} = \delta_{\text{д}} P_0$, где $\delta_{\text{д}} = 1 - 10^{-\alpha_{\text{д}}/10}$, происходит по всей толщине диэлектрика. Однако приближенно можно ввести эквивалентные источники теплового потока мощности [2.14].

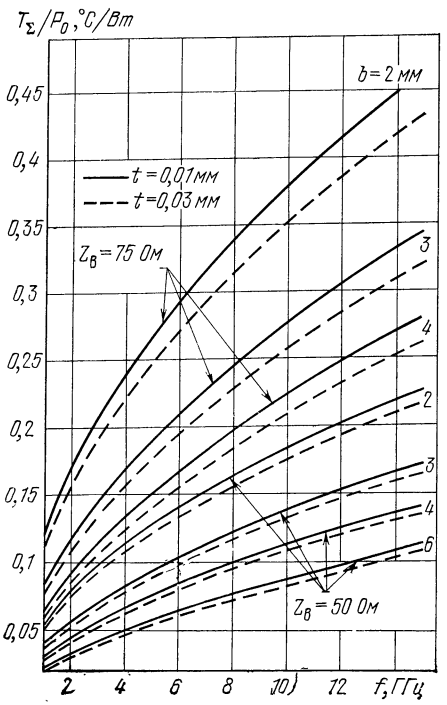



Рис. 2.34

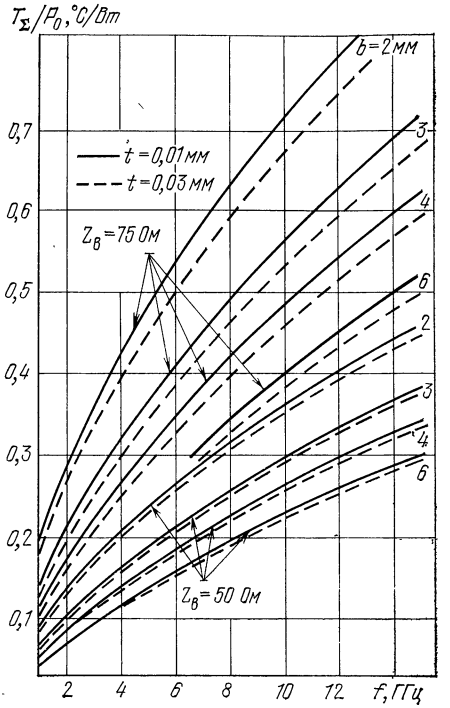



Рис. 2.35

При этом предполагается, что тепловой поток, возникающий за счет потерь в диэлектрике, протекает от эквивалентных источников к экрану. Реальный тепловой поток мощностью $P_{\text{д}}$ заменяется эквивалентным плоскопараллельным тепловым потоком (рис. 2.33, *б*) той же мощности $P_{\text{д}}$, но с поперечным сечением $s\ [\text{м}^2] = 2w$, проходящим путь в диэлектрике

$$l''_{\text{экв}} = (b-t)/[4\,(1+2C_f/C_p)]. \tag{2.48}$$

Используя (2.47), (2.48), получаем из (2.45):

$$\frac{\Delta T_1}{P_0}\left[\frac{°\text{C}}{\text{Вт}}\right] = \frac{R}{8}\,\frac{(\delta_{\text{д}}+2\delta_{\text{п}})\,(1-t/b)}{w/b}\,\frac{1}{1+2C_f/C_p}; \tag{2.49}$$

$$\frac{\Delta T_2}{P_0}\left[\frac{°\text{C}}{\text{Вт}}\right] = \frac{R_1}{2}\,\frac{(\delta_{\text{д}}+\delta_{\text{м}})\,(t_1/b)}{w/b}; \tag{2.50}$$

$$\frac{\Delta T_3}{P_0}\left[\frac{°\text{C}}{\text{Вт}}\right] = \frac{R_2}{2}\,\frac{(\delta_{\text{д}}+\delta_{\text{м}})\,(t_2/b)}{w/b}, \tag{2.51}$$

где $\delta_м = 1 - 10^{-\alpha_м/10}$; $\alpha_м$, $\alpha_д$, $\alpha_п$ определяются по (2.39), (2.41), (2.42); $R$, $R_1$, $R_2$ — удельные тепловые сопротивления диэлектрика, токонесущего слоя и алюминия соответственно, °С·м/Вт.

Зная максимальную рабочую температуру диэлектрика $T_{макс}$ (см. табл. 1.4, 1.5) и температуру окружающей среды $T_{ср}$, находим [2.14]

$$P_{пред} = (T_{макс} - T_{ср})/(\Delta T_{\Sigma}/P_0). \qquad (2.52)$$

Следует отметить, что определенную указанным способом предельную мощность обычно уменьшают в 1,5 ... 2 раза [2.14] вследствие приближенности используемого метода вычисления. На рис. 2.34, 2.35 приведены результаты расчета по формулам (2.46)—(2.51) для СПЛ, имеющей $Z_в$ = 50 и 75 Ом и заполненной диэлектриком ФФ-4 (рис. 2.34) или ФАФ-4 (рис. 2.35), для двух значений толщины полоски. Предполагалось, что полоска и токонесущий слой экрана тол-

Таблица 2.2

**Предельная средняя мощность, Вт, СПЛ (диэлектрик ФАФ-4, $\varepsilon_r = 2{,}5$, $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3}$) при $T_{ср} = 20$ °С и различных значениях $b$, мм; $t$, мм**

| $f$, ГГц | $b=2$ | | $b=3$ | | $b=4$ | | $b=6$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ |
| | | | | $Z_в = 50$ Ом | | | | |
| 1 | 2 288 | 2 439 | 3 146 | 3 340 | 3 872 | 4 096 | 5 051 | 5 304 |
| 2 | 1 532 | 1 627 | 2 052 | 2 168 | 2 476 | 2 604 | 3 131 | 3 269 |
| 3 | 1 205 | 1 276 | 1 586 | 1 671 | 1 889 | 1 981 | 2 346 | 2 441 |
| 4 | 1 014 | 1 071 | 1 317 | 1 385 | 1 555 | 1 627 | 1 906 | 1 979 |
| 5 | 885 | 934 | 1 140 | 1 196 | 1 336 | 1 395 | 1 621 | 1 681 |
| 6 | 793 | 836 | 1 012 | 1 061 | 1 179 | 1 230 | 1 420 | 1 470 |
| 7 | 722 | 760 | 915 | 958 | 1 062 | 1 106 | 1 271 | 1 314 |
| 8 | 667 | 701 | 839 | 878 | 969 | 1 009 | 1 154 | 1 193 |
| 9 | 621 | 653 | 778 | 813 | 895 | 931 | 1 061 | 1 095 |
| 10 | 583 | 612 | 727 | 759 | 834 | 867 | 985 | 1 016 |
| 11 | 551 | 578 | 684 | 714 | 783 | 813 | 921 | 950 |
| 12 | 523 | 549 | 647 | 675 | 739 | 767 | 867 | 893 |
| 13 | 499 | 523 | 615 | 642 | 701 | 728 | 820 | 845 |
| 14 | 478 | 501 | 588 | 612 | 668 | 693 | 780 | 803 |
| 15 | 460 | 481 | 563 | 587 | 639 | 663 | 745 | 767 |
| | | | | $Z_в = 75$ Ом | | | | |
| 1 | 1 159 | 1 261 | 1 617 | 1 749 | 2 017 | 2 172 | 2 691 | 2 874 |
| 2 | 792 | 857 | 1 079 | 1 161 | 1 321 | 1 414 | 1 714 | 1 819 |
| 3 | 632 | 681 | 846 | 907 | 1 024 | 1 092 | 1 306 | 1 380 |
| 4 | 537 | 577 | 711 | 760 | 852 | 906 | 1 073 | 1 131 |
| 5 | 473 | 508 | 620 | 661 | 739 | 784 | 921 | 968 |
| 6 | 427 | 457 | 555 | 591 | 657 | 697 | 812 | 853 |
| 7 | 391 | 419 | 505 | 537 | 594 | 629 | 731 | 766 |
| 8 | 363 | 388 | 465 | 494 | 546 | 577 | 667 | 698 |
| 9 | 340 | 362 | 433 | 459 | 506 | 534 | 616 | 644 |
| 10 | 320 | 341 | 406 | 430 | 474 | 499 | 573 | 599 |
| 11 | 304 | 323 | 383 | 406 | 446 | 469 | 538 | 562 |
| 12 | 289 | 308 | 364 | 385 | 422 | 444 | 508 | 530 |
| 13 | 277 | 295 | 347 | 367 | 402 | 422 | 482 | 502 |
| 14 | 266 | 283 | 332 | 351 | 384 | 403 | 459 | 478 |
| 15 | 256 | 272 | 319 | 337 | 368 | 386 | 439 | 457 |

Таблица 2.3

**Предельная средняя мощность, Вт, СПЛ (диэлектрик ФФ-4, $\varepsilon_r = 2$, $\operatorname{tg}\delta = 3\cdot10^{-4}$) при $T_{ср} = 20$ °С и различных значениях $b$, мм; $t$, мм**

| $f$, ГГц | $b=2$ | | $b=3$ | | $b=4$ | | $b=6$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ | $t=0{,}01$ | $t=0{,}03$ |
| | | | | $Z_в = 50$ Ом | | | | |
| 1 | 2 162 | 2 310 | 3 145 | 3 357 | 4 063 | 4 331 | 5 745 | 6 105 |
| 2 | 1 515 | 1 615 | 2 174 | 2 315 | 2 779 | 2 954 | 3 861 | 4 090 |
| 3 | 1 228 | 1 308 | 1 745 | 1 856 | 2 214 | 2 349 | 3 039 | 3 211 |
| 4 | 1 058 | 1 125 | 1 490 | 1 583 | 1 879 | 1 991 | 2 555 | 2 695 |
| 5 | 941 | 1 000 | 1 317 | 1 397 | 1 652 | 1 749 | 2 228 | 2 347 |
| 6 | 855 | 908 | 1 190 | 1 261 | 1 486 | 1 571 | 1 990 | 2 093 |
| 7 | 789 | 837 | 1 091 | 1 155 | 1 357 | 1 433 | 1 807 | 1 899 |
| 8 | 735 | 779 | 1 012 | 1 071 | 1 254 | 1 323 | 1 660 | 1 743 |
| 9 | 691 | 732 | 946 | 1 001 | 1 169 | 1 233 | 1 540 | 1 616 |
| 10 | 653 | 692 | 891 | 942 | 1 098 | 1 157 | 1 440 | 1 509 |
| 11 | 621 | 657 | 844 | 891 | 1 037 | 1 092 | 1 354 | 1 419 |
| 12 | 593 | 627 | 803 | 847 | 983 | 1 035 | 1 280 | 1 340 |
| 13 | 568 | 601 | 767 | 809 | 937 | 986 | 1 215 | 1 271 |
| 14 | 546 | 577 | 735 | 775 | 896 | 942 | 1 158 | 1 211 |
| 15 | 526 | 556 | 706 | 744 | 859 | 903 | 1 107 | 1 157 |
| | | | | $Z_в = 75$ Ом | | | | |
| 1 | 1 083 | 1 181 | 1 578 | 1 717 | 2 044 | 2 219 | 2 909 | 3 144 |
| 2 | 766 | 833 | 1 102 | 1 196 | 1 415 | 1 531 | 1 983 | 2 137 |
| 3 | 626 | 679 | 892 | 966 | 1 137 | 1 228 | 1 577 | 1 694 |
| 4 | 542 | 588 | 766 | 829 | 971 | 1 047 | 1 336 | 1 433 |
| 5 | 485 | 525 | 681 | 735 | 859 | 925 | 1 173 | 1 256 |
| 6 | 443 | 479 | 618 | 667 | 776 | 835 | 1 054 | 1 127 |
| 7 | 410 | 443 | 569 | 613 | 712 | 765 | 961 | 1 027 |
| 8 | 384 | 414 | 530 | 570 | 661 | 709 | 888 | 947 |
| 9 | 362 | 390 | 497 | 535 | 618 | 663 | 827 | 881 |
| 10 | 343 | 370 | 470 | 505 | 583 | 624 | 776 | 826 |
| 11 | 327 | 352 | 446 | 479 | 552 | 591 | 732 | 779 |
| 12 | 313 | 336 | 426 | 457 | 525 | 562 | 694 | 738 |
| 13 | 301 | 323 | 408 | 437 | 502 | 536 | 661 | 702 |
| 14 | 290 | 312 | 392 | 419 | 481 | 514 | 631 | 670 |
| 15 | 280 | 301 | 377 | 404 | 462 | 493 | 605 | 642 |

щиной $t_1 = t$, выполнены из меди и $t_2 = 3$ мм. Результаты расчета предельной средней мощности приведены в табл. 2.2 и 2.3, при расчете предполагалось, что $T_{ср} = 20°$ С.

**Пример 2.6.** Определить среднюю мощность для данных примера 2.3 при $f = 1$ ГГц, $T_{ср} = 20°$ С, если проводники выполнены из меди, толщина алюминиевой пластины экрана $t_2 = 3$ мм. В данном случае $Z_в = 50$ Ом; $b = 4$ мм; $t = 0{,}03$ мм; $w = 2{,}92$ мм (см. пример 2.3). На частоте $f = 1$ ГГц $\alpha_м = 0{,}27$ дБ/м, $\alpha_д = 0{,}14$ дБ/м (см. пример 2.5). Рассчитываем $C_f = 0{,}457$ (см. пример 2.3) и $C_p = 2\,(w/b)/(1 - t/b) = 2\cdot0{,}73/0{,}9925 = 1{,}471$. Тогда согласно (2.42) $\alpha_п = 0{,}27\cdot(1{,}471 + 2\cdot0{,}457)/(2\cdot1{,}471 + 2\cdot0{,}457) = 0{,}17$ дБ/м. Поэтому $\delta_п = 1 - 10^{-0{,}17/10} = 0{,}038$; $\delta_м = 1 - 10^{-0{,}27/10} = 0{,}06$; $\delta_д = 1 - 10^{-0{,}14/10} = 0{,}032$. Из табл. 1.4 и 1.6 определяем для ФАФ-4 $R = 4{,}762$ м·°С/Вт, для меди $R_1 = 0{,}0026$ м·°С/Вт, для алюминия $R_2 = 0{,}0046$ °С·м/Вт. Согласно (2.49)—(2.51) $\Delta T_1/P_0 = (4{,}762/8)\,(0{,}032 + 2\cdot0{,}038)\times$

$\times(1-0{,}0075)/[0{,}73\ (1+2\cdot 0{,}457/1{,}475)=0{,}054$ °C/Вт; $\Delta T_2/P_0=(0{,}0026/2)\times$ $\times(0{,}032+0{,}06)\ 0{,}0075/0{,}73=0{,}0000012$ °C/Вт; $\Delta T_3/P_0=(0{,}0058/2)\cdot(0{,}032+$ $+0{,}06)\cdot 0{,}75/0{,}73=0{,}00027$ °C/Вт из (2.46) $\Delta T_\Sigma/P_0=0{,}0543°$ C/Вт. Так как для ФАФ-4 $T_{макс}=250°$ C, то из (2.52) определяем $P_{пред}=(250-20)/0{,}0543=$ $=4236$ Вт.

## ВОЛНЫ ВЫСШЕГО ТИПА

Для большинства линий, используемых на практике, первой волной высшего типа в СПЛ является волна $H^{(1)}$ (см. рис. 2.5). Строгое определение постоянной распространения волн высших типов в СПЛ требует решения волнового уравнения для продольных составляющих полей при соответствующих гра-

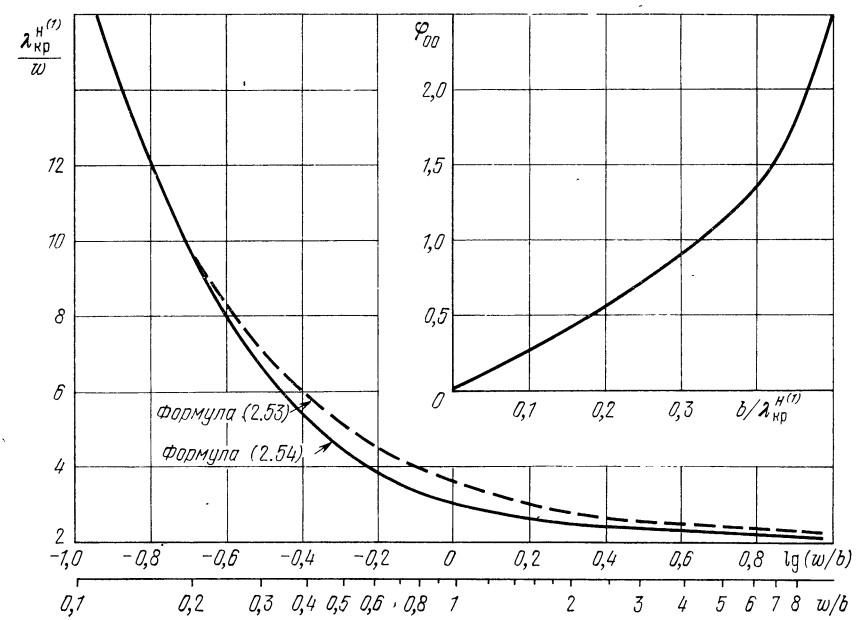



**Рис. 2.36**

ничных условиях. Алгоритмы решения подобной задачи приведены в [2.22]. Получение конечного результата, как правило, требует использования численного метода, т. е. применения ЭВМ.

В первом приближении критическая длина волны для $H^{(1)}$ [2.14]

$$\lambda_{кр}^{H^{(1)}}=2w\,(1+\pi b/4w). \tag{2.53}$$

Более точно критическую длину волны для $H^{(1)}$ при $t/b=0$ и $b<\lambda/2$ можно определить по формуле [2.21]

$$\lambda_{кр}^{H^{(1)}}=2w\pi/(\pi-\varphi_{00}), \tag{2.54}$$

где

$$\varphi_{00}=2\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\arcsin\frac{b/\lambda_{кр}^{H^{(1)}}}{m-0{,}5}-\arcsin\frac{b/\lambda_{кр}^{H^{(1)}}}{m}\right\}. \tag{2.55}$$

Зависимости $\lambda_{кр}^{H(1)}/w$ от $w/b$ и $\varphi_{00}$ от $b/\lambda_{кр}^{H(1)}$ показаны на рис. 2.36. Максимальное расхождение ($\approx 20\%$) наблюдается при $w/b = 0{,}8$. Результаты расчета по (2.54) хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования [2.21].

**Пример 2.7.** Определить $f_{кр}$ для $H^{(1)}$ в СПЛ, рассмотренной в примере 2.3, т. е. при $w/b = 0{,}73$, $t/b = 0{,}0075$, $\varepsilon_r = 2{,}5$, $w = 2{,}92$ мм, так как $t/b$ мало, что согласно рис. 2.36 $\lambda_{кр}^{H(1)}/w = 3{,}5$, откуда $\lambda_{кр}^{H(1)} = 3{,}5 \cdot 2{,}92 = 10{,}2$ мм и критическая частота $f_{кр} = 300 \cdot 10^9/(\sqrt{2{,}5} \cdot 10{,}2) = 18{,}6$ ГГц.

Для обеспечения в СПЛ одноволнового режима работы поперечные размеры следует выбирать такими, чтобы на высшей частоте (при $\lambda_{мин} = c/f_{макс}$) удовлетворялось неравенство $\lambda_{мин}/\sqrt{\varepsilon_r} > \lambda_{кр}^{H(1)}$. Отсюда

$$w < (\lambda_{мин}/\sqrt{\varepsilon_r})\left(w/\lambda_{кр}^{H(1)}\right), \tag{2.56}$$

где $w/\lambda_{кр}^{H(1)}$ определяется из (2.54) или графика на рис. 2.36 по заданному значению $w/b$. Расстояние между экранирующими пластинами должно удовлетворять неравенству

$$b < \lambda_{мин}/(2\sqrt{\varepsilon_r}). \tag{2.57}$$

## 2.3. НЕСИММЕТРИЧНАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Несимметричная полосковая линия передачи (НПЛ) — двухпроводная полосковая линия с поперечным сечением в виде параллельных прямых, имеющая одну плоскость симметрии (плоскость *I* на рис. 2.37), параллельную направлению распространения энергии [2.1]. На рис. 2.37 *1* — полоска; *2* — экран; *3* — подложка из диэлектрика с параметрами $\varepsilon_{r2}$, $\mu_{r2}$, $\sigma_{д2}$, пространство над полоской полностью заполнено диэлектриком с параметрами $\varepsilon_{r1}$, $\mu_{r1}$, $\sigma_{д1}$. Токонесущие поверхности выполнены из металла с проводимостью $\sigma_м$.

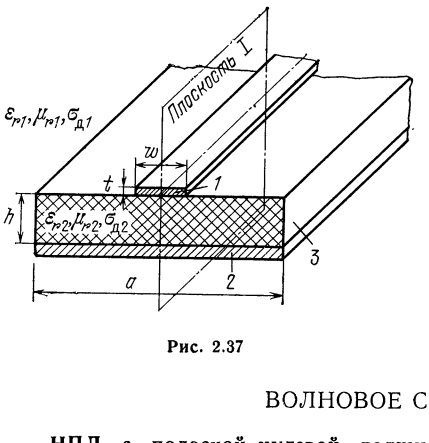


Рис. 2.37

При анализе свойств НПЛ различают два случая: 1) полоски НПЛ находятся в однородном диэлектрике ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r1} = \varepsilon_r$), на практике обычно используют воздушное заполнение ($\varepsilon_r = 1$); 2) $\varepsilon_{r2}$ подложки отличается от $\varepsilon_{r1}$ окружающего пространства, обычно $\varepsilon_{r2} > \varepsilon_{r1}$, при этом линию называют микрополосковой линией передачи (МПЛ).

### ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

**НПЛ с полоской нулевой толщины.** При $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{r1} = \varepsilon_r$, $t/h = 0$, $a = \infty$ точное значение $Z_в$ находится методом конформных отображений [2.23]:

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 60\pi K_1(k), \tag{2.58}$$

где параметр $k$ находится из следующей системы:

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi}\frac{\partial}{\partial v}\ln\Theta_4(v, K_1); \tag{2.59}$$

$$[\Theta_3(v, K_1)/\Theta_4(v, K_1)]^2 = E(k')/[kK(k')], \tag{2.60}$$

$\Theta_3$ и $\Theta_4$ — тета-функции Якоби.

Результаты расчета по (2.58) приведены на рис. 2.38. По формуле (2.58) можно определить $Z_в$ двухпроводной линии, у которой $a = w$ (система из двух одинаковых параллельных полосок в однородном диэлектрике) и расстояние между полосками $2h$.

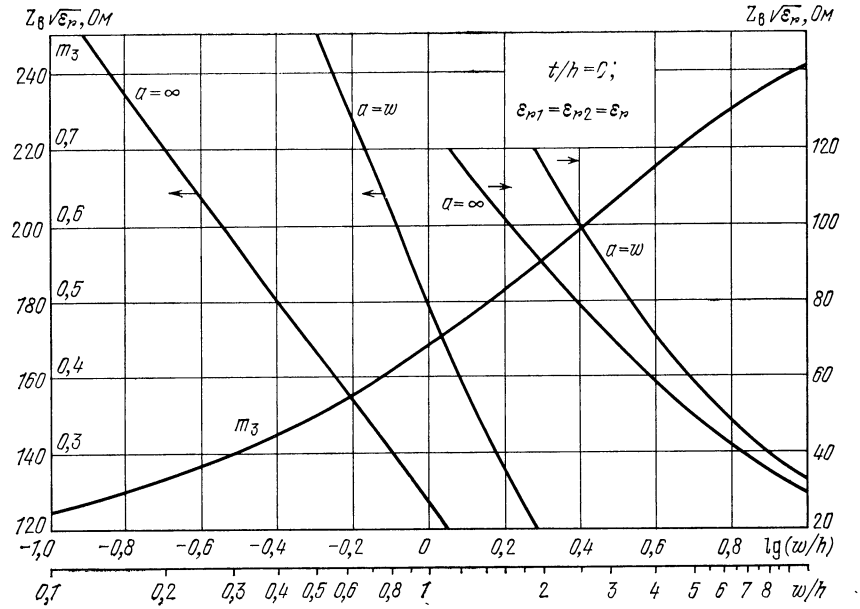



Рис. 2.38

С погрешностью не более 0,6% [2.24] $Z_в$ НПЛ определяется по формулам [2.25]:

1) при $w/h < 2$

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 60\,[\ln(8h/w) + w^2/(32h^2)]; \qquad (2.61)$$

2) при $w/h > 2$

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 120\pi\,[w/h + (2/\pi)\ln\{17{,}08\,(w/2h + 0{,}92)\}]^{-1}. \qquad (2.62)$$

Размеры НПЛ по заданному $Z_в$ определяются по формулам, имеющим максимальную погрешность 0,6% при $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 132$ Ом [2.24]:

1) при $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} \leqslant 132$ Ом

$$w/h = 1/r - 2\,[\ln(\pi/r - 2\ln 2) + 1]/\pi; \qquad (2.63)$$

2) $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} > 132$ Ом

$$w/h = 8e^{-2\pi r}, \qquad (2.64)$$

где $r = Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(120\pi)$.

**Пример 2.8.** Определить ширину полоски НПЛ, если $Z_в = 50$ Ом, $\varepsilon_r = 1$, $h = 1$ мм и $t = 0$. Так как $Z_в\sqrt{\varepsilon_r} = 50$ Ом, то согласно (2.63) $w/h = 120\pi/50 - 2\,[\ln(120\pi^2/50 - 2\ln 2) + 1]/\pi = 4{,}9$, т. е. $w = 4{,}9\cdot 1 = 4{,}9$ мм.

При $a < \infty$ $Z_в$ можно определить по методике, изложенной в [2.26]. Окончательные формулы из-за их громоздкости не приводятся. Сравнение результатов численного расчета $Z_в$ при $a = \infty$ и $a < \infty$ показывает, что $Z_в$ для рассматриваемых случаев практически совпадают при $a > 4w$, $t/h = 0$; это подтверждается и результатами экспериментального исследования НПЛ [2.12].

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях размеров и изменении $\varepsilon_r$ НПЛ определяется по формуле

$$\Delta Z_в/Z_в = m_1\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r + m_2\Delta w/w + m_3\Delta h/h + m_4\Delta t/t, \qquad (2.65)$$

где $m_1$, $m_2$, $m_4$ находятся из (2.27), а $m_3 = h\dfrac{\partial}{\partial h}(\ln Z_в)$.

Для рассматриваемой НПЛ $m_1 = -0{,}5$; $m_4 = 0$;

1) при $w/h < 2$

$$m_2 = -m_3 = -60\,[1 - (w/4h)^2]/Z_в\sqrt{\varepsilon_r};$$

2) при $w/h > 2$

$$m_2 = -m_3 = -(Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(120\pi))\,(w/h)\{1 + 1/[\pi\,(w/2h + 0{,}92)]\}.$$

Результаты расчета $m_3$ показаны на рис. 2.38. Относительное изменение $Z_в$ будет больше для линии с меньшим $Z_в$.

**НПЛ с полоской конечной толщины.** При $\sigma_м = \infty$, $t/h > 0$, $a = \infty$ [2.27]

$$Z_в\sqrt{\varepsilon_r}\,[\text{Ом}] \approx 30\pi^2\left|\operatorname{arcth}\frac{\Theta_1(\tilde{F}_1/2K,\ k)\,\Theta_4(v/2K,\ k)}{\Theta_4(\tilde{F}_1/2K,\ k)\,\Theta_1(v/2K,\ k)}\right|^{-1}, \qquad (2.66)$$

где параметры $v$ и $k$ находятся из следующей системы уравнений ($u = v/2K$):

$$-\frac{\pi w}{4h} = \frac{BE(k)}{\sqrt{1-k^2}} + \frac{\partial}{\partial v}\,[\ln\Theta_2(u,\ k)]\,K(k);$$

$$-\frac{\pi t}{2h} = \frac{B\,[K(k') - E(k')]}{\sqrt{1-k^2}} + \frac{\partial}{\partial v}\,[\ln\Theta_2(u,\ k)]\,K(k') + \frac{\pi v}{2K(k)};$$

$$B = [\Theta_1(u,\ k)\,\Theta_4(u,\ k)]/[\Theta_2(u,\ k)\,\Theta_3(u,\ k)];$$

$\Theta_1$ и $\Theta_2$ — тета-функции Якоби; $\tilde{F}_1$ — корень трансцендентного уравнения ($r = \tilde{F}_1/(2K)$)

$$\left[v - \frac{tK(k)}{h} - \frac{wK(k')}{2h}\right]\left\{\frac{\partial}{\partial F_1}\,[\ln\Theta_4(r,\ k)] + \sqrt{1-k^2}\,B_1\right\} -$$

$$-\frac{\pi w\tilde{F}_1}{4hK(k)} = \frac{1}{2}\ln\frac{\Theta_1(r+u,\ k)}{\Theta_1(r-u,\ k)},$$

в котором

$$B_1 = [\Theta_2(r,\ k)\,\Theta_3(r,\ k)]/[\Theta_1(r,\ k)\,\Theta_4(r,\ k)].$$

Результаты расчета по формуле (2.66) представлены на рис. 2.39. Сравнение результатов расчета для $t/h = 0$ с результатами расчета по точной формуле (2.58) показало [2.27], что максимальная погрешность вычислений составляет 12% при $w/h = 0{,}3$; 8% при $w/h = 0{,}4$; 5% при $w/h = 0{,}6$ и 2% при $w/h = 1$; увеличение $t/h$ уменьшает погрешность вычислений, что подтверждается экспериментально [2.27].

Отметим, что при $0 < t/h < 0{,}1$ $Z_в$ можно определить по (2.61), (2.62), подставив вместо $w/h$ величину $w'/h$ [2.5]:

1) при $w/h \leqslant 0{,}16$

$$w'/h = w/h + t\,[1 + \ln(4\pi w/t)]/(\pi h); \qquad (2.67)$$

2) при $w/h > 0{,}16$

$$w'/h = w/h + t\,[1 + \ln(2h/t)]/(\pi h). \qquad (2.68)$$

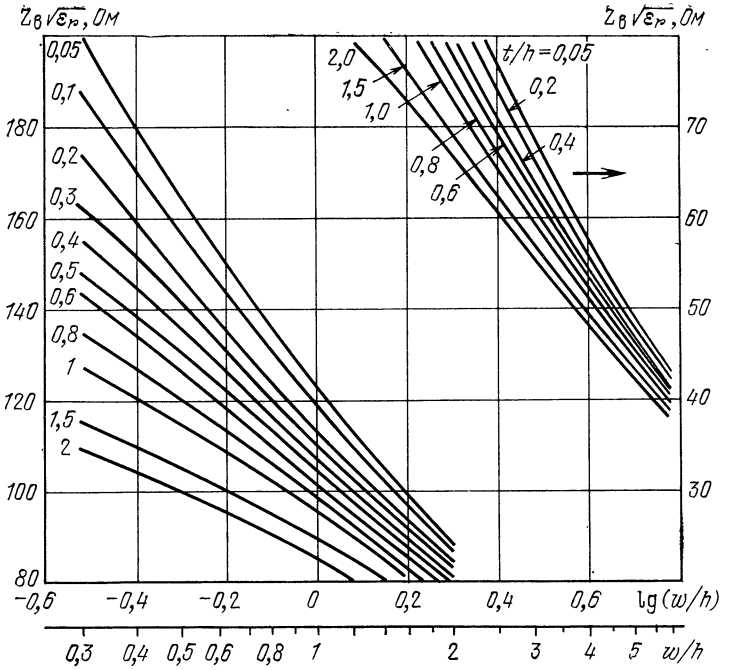



Рис. 2.39

**Пример 2.9.** Определить ширину полоски НПЛ, если $Z_в = 50$ Ом, $\varepsilon_r = 1$, $h = 1$ мм и $t = 0{,}075$ мм. Определяем $t/h = 0{,}075$. Так как $t/h < 0{,}1$, то согласно (2.63) $w'/h = 4{,}9$ (см. пример 2.8). Из (2.68) определяем $w/h = 4{,}9 - 0{,}075 \times \times [1 + \ln(2/0{,}075)]/\pi = 4{,}8$, т. е. $w = 4{,}8 \cdot 1 = 4{,}8$ мм.

Если $a < \infty$ и $t/h > 0$, $Z_в$ можно определять по (2.66) для $a$, удовлетворяющего неравенству из табл. 2.4. Приведенные в табл. 2.4 данные [2.27] получены экспериментально и позволяют определить минимальную ширину экрана, при которой $Z_в$ линии практически не отличается от $Z_в$ НПЛ с бесконечным экраном.

Таблица 2.4

**Ширина экрана однородной НПЛ**

| $t/h$ | $a/w$ при $w/h$, равном | | |
|---|---|---|---|
| | 1,06 | 1,6 | 3,2 |
| 0,5 | $\geqslant 9{,}5$ | $\geqslant 8$ | $\geqslant 6{,}5$ |
| 1,0 | $\geqslant 10$ | $\geqslant 8{,}5$ | $\geqslant 7{,}5$ |
| 1,5 | $\geqslant 12$ | $\geqslant 9{,}5$ | $\geqslant 8$ |

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях размеров и $\varepsilon_r$ НПЛ определяется по (2.65), где $m_1 = -0{,}5$;

1) при $w/h \leqslant 0{,}16$ и $t/h < 0{,}1$

$$m_2 = -(w/w')\,[1 + t/(\pi w)]\,A;$$

$$m_3 = A;\quad m_4 = -[t/(\pi w')]\ln(4\pi w/t)\,A;$$

2) при $0{,}16 < w/h \leqslant 2$ и $t/h < 0{,}1$

$$m_2 = -(w/w')\,A;\quad m_3 = [1 - t/(\pi w')]\,A;\quad m_4 = -[(t/(\pi w')]\ln(2h/t)\,A;$$

3) при $w/h > 2$ и $t/h < 0{,}1$

$$m_2 = -(w/h)\,D;\quad m_3 = (w'/h)\,(1 - t/\pi w')\,D;\quad m_4 = -[t/(\pi h)]\ln(2h/t)\,D,$$

где $A = [60/(Z_в\sqrt{\varepsilon_r})]\,[1 - (w'/4h)^2]$; $D = [Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(120\pi)]\,\{1 + 1/[\pi\,(w'/2h + 0{,}92)]\}$.

Результаты расчета показаны на рис. 2.40. Как следует из рисунка, при $t/h < 0,1$ основной вклад в изменение $Z_в$ вносят отклонения $w$ и $h$, причем относительное изменение $Z_в$ при одних и тех же отклонениях размеров будет больше для линий с меньшим $Z_в$.

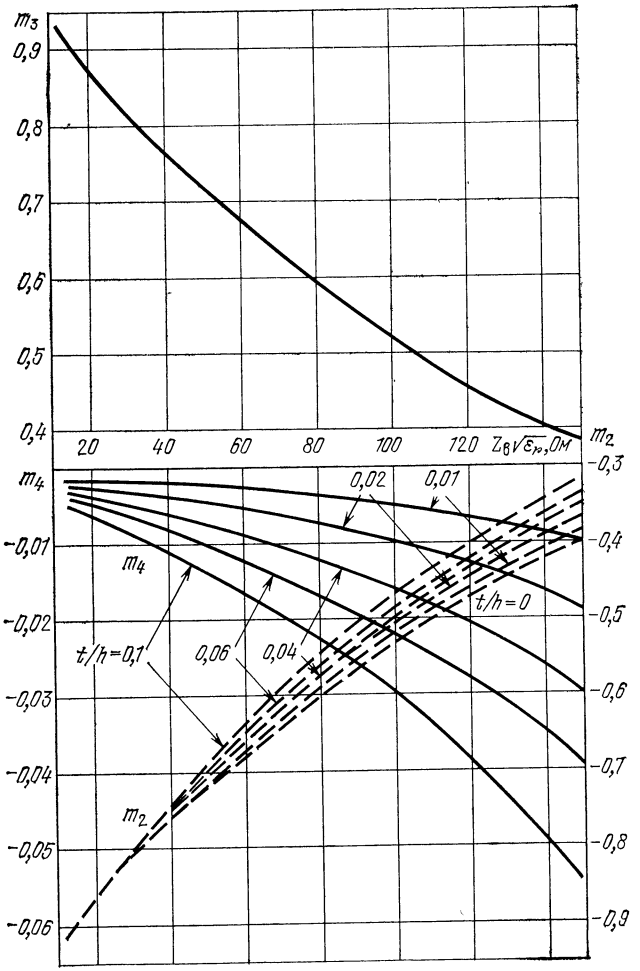



Рис. 2.40

**МПЛ с полоской нулевой толщины.** При $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$, $t/h = 0$, $a = \infty$ (см. рис. 2.37) $Z_в$ определяется по следующим формулам [2.25, 2.28]:

1) при $w/h \leqslant 1$

$$Z_в = (120/\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)})\,\{\ln(8h/w) + w^2/(32h^2) - (1/2)(\varepsilon_r - 1)[\ln(\pi/2) + \ln(4/\pi)/\varepsilon_r]/(\varepsilon_r + 1)\}; \quad (2.69)$$

2) при $w/h > 1$

$$Z_в = (60\pi/\sqrt{\varepsilon_r})\,[w/(2h) + 0,441 + 0,082(\varepsilon_r - 1)/\varepsilon_r^2 + (\varepsilon_r + 1)A/(2\pi\varepsilon_r)]^{-1}, \quad (2.70)$$

где $A = 1,451 + \ln[w/2h + 0,94]$. Погрешность расчета по (2.69) не превышает 1%, а по (2.70) — 2%.

Размеры МПЛ по заданному $Z_в$ определяют из следующих выражений [2.28]
1) при $d > 2,1$

$$w/h = 8/(e^d - 2e^{-d}); \qquad (2.71)$$

2) при $d \leqslant 2,1$

$$w/h = 2\,(d_1 - 1)/\pi - 2\ln(2d_1 - 1)/\pi + (\varepsilon_r - 1)\,[\ln(d_1 - 1) + 0,293 - 0,517/\varepsilon_r]/(\pi\varepsilon_r), \qquad (2.72)$$

где $d = (Z_в/60)\sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2} + (\varepsilon_r - 1)\,(0,226 + 0,12/\varepsilon_r)/(\varepsilon_r + 1)$; $d_1 = 60\pi^2\,(Z_в\sqrt{\varepsilon_r})$.

Погрешность вычислений по (2.71) не превышает 1%, по (2.72) — 2%; $Z_в$ МПЛ можно приближенно определить из (2.61), (2.62), подставив вместо $\varepsilon_r$ $\varepsilon_{эф0}$ [2.23]

$$2\varepsilon_{эф0} = \varepsilon_r + 1 + (\varepsilon_r - 1)\,(1 + 10h/w)^{-1/2}. \qquad (2.73)$$

Результаты расчета $Z_в$ представлены на рис. 2.41, 2.42; $Z_в$ МПЛ уменьшается при возрастании $w/h$ и при увеличении $\varepsilon_r$ подложки, причем влияние $\varepsilon_r$ уменьшается с ростом $w/h$, что объясняется увеличением концентрации энергии

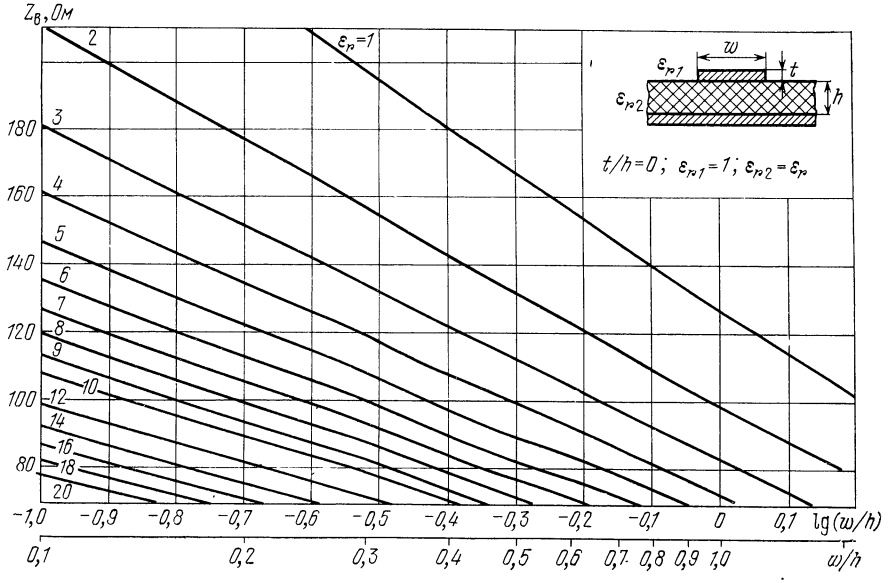



Рис. 2.41

электромагнитного поля в диэлектрике подложки. Из графиков (см. рис. 2.40, 2.41) легко определить $\varepsilon_{эф\,0} = (Z_в^1/Z_в^\varepsilon)^2$, где $Z_в^1 = Z_в$ при $\varepsilon_{r2} = 1$, а $Z_в^\varepsilon = Z_в$ при $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$.

**Пример 2.10.** Определить ширину полоски МПЛ с $Z_в = 50$ Ом, $t = 0$, подложка из поликора ($\varepsilon_r = 9,6$) толщиной $h = 1$ мм. Найти фазовую скорость $v_ф$ квази-Т-волны без учета дисперсии. Определяем величину $d$, входящую в (2.71): $d = (50/60)\sqrt{(9,6 + 1)/2} + (9,6 - 1)\,(0,226 + 0,12/9,6)\,/\,(9,6 + 1) = 2,11$. Так как $d > 2,1$, из (2.71) находим $w/h = 8/(e^{2,11} - 2e^{-2,11}) = 1$, т. е. $w = 1$ мм. Из (2.73) находим $\varepsilon_{эф0} = [9,6 + 1 + (9,6 - 1)/\sqrt{1 + 10/1}]/2 = 6,6$, тогда $v_ф = 3\cdot10^8/\sqrt{6,6} = 1,168\cdot10^8$ м/с.

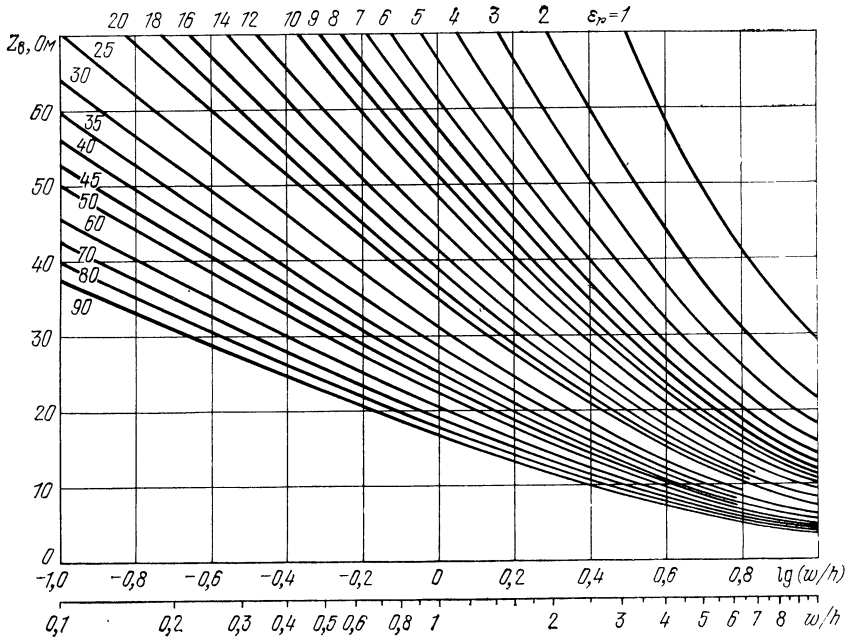



**Рис. 2.42.**

Относительное изменение $Z_в$ при небольших регулярных отклонениях размеров и $\varepsilon_r$ подложки МПЛ определяется по (2.65), где $m_4 = 0$;

1) при $w/h < 1$

$$m_1 = -\varepsilon_r/2\,(\varepsilon_r+1) - [60/(Z_в\sqrt{2})]\,\varepsilon_r\,\{2\ln(\pi/2) - [(\varepsilon_r^2 - 2\varepsilon_r + 1)/\varepsilon_r^2] \times \ln(4/\pi)\}/(\varepsilon_r+1)^{5/2};$$

$$m_2 = -m_3 = -[120/(Z_в\sqrt{2}\sqrt{\varepsilon_r+1})] \times [1-(w/4h)^2];$$

2) при $w/h > 1$

$$m_1 = -0{,}5 + [Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(120\pi)] \times \{0{,}164\,(\varepsilon_r-2)/\varepsilon_r^2 + [1{,}451 + \ln(w/2h+0{,}94)]/(\pi\varepsilon_r)\};$$

$$m_2 = -m_3 = -[Z_в\sqrt{\varepsilon_r}/(120\pi)] \times (w/h)\,\{1+(\varepsilon_r+1)/[2\pi\varepsilon_r\,(w/2h+0{,}94)]\}.$$

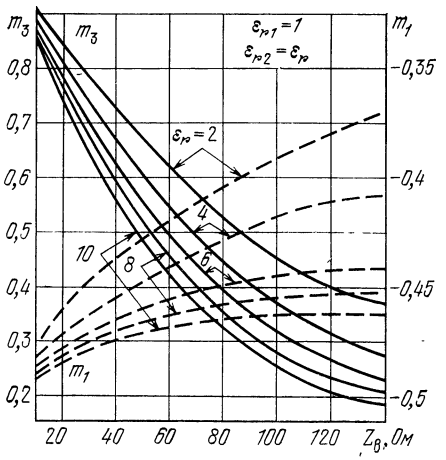



Рис. 2.43

Результаты расчета показаны на рис. 2.43. Влияние отклонений размеров и $\varepsilon_r$ подложки на $Z_в$ увеличивается при уменьшении $Z_в$. Для линии с $Z_в < 20$ Ом или при $\varepsilon_r > 10$ $m_1 = -0{,}5$.

Таблица 2.5

**Волновое сопротивление, Ом и эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ**

| $\frac{w}{h}$ | $\varepsilon_r=3,78$ | | | | | | $\varepsilon_r=9,6$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t/h=0$ | | $t/h=0,01$ | | $t/h=0,1$ | | $t/h=0$ | | $t/h=0,01$ | | $t/h=0,1$ | |
| | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ | $Z_в$ | $\varepsilon_{эф0}$ |
| 0,10 | 164,10 | 2,57 | 160,06 | 2,52 | 144,02 | 2,36 | 109,03 | 5,82 | 106,80 | 5,67 | 97,88 | 5,11 |
| 0,125 | 155,43 | 2,58 | 152,10 | 2,54 | 138,05 | 2,39 | 103,21 | 5,85 | 101,37 | 5,72 | 93,57 | 5,19 |
| 0,15 | 148,36 | 2,59 | 145,52 | 2,55 | 133,01 | 2,41 | 98,46 | 5,88 | 96,90 | 5,76 | 89,96 | 5,26 |
| 0,175 | 142,37 | 2,60 | 139,92 | 2,56 | 128,63 | 2,43 | 94,44 | 5,90 | 93,09 | 5,79 | 86,83 | 5,33 |
| 0,200 | 137,2 | 2,61 | 135,03 | 2,58 | 124,74 | 2,44 | 90,96 | 5,93 | 89,77 | 5,83 | 84,08 | 5,38 |
| 0,225 | 132,63 | 2,61 | 130,7 | 2,59 | 121,25 | 2,46 | 87,90 | 5,95 | 86,83 | 5,86 | 81,6 | 5,43 |
| 0,25 | 128,56 | 2,62 | 126,82 | 2,59 | 118,06 | 2,47 | 85,16 | 5,97 | 84,2 | 5,88 | 79,36 | 5,47 |
| 0,275 | 124,87 | 2,63 | 123,29 | 2,6 | 115,14 | 2,49 | 82,68 | 5,99 | 81,81 | 5,91 | 77,31 | 5,51 |
| 0,3 | 121,51 | 2,63 | 120,06 | 2,61 | 112,44 | 2,5 | 80,42 | 6,01 | 79,63 | 5,94 | 75,42 | 5,55 |
| 0,325 | 118,42 | 2,64 | 117,09 | 2,62 | 109,93 | 2,51 | 78,35 | 6,03 | 77,62 | 5,96 | 73,67 | 5,59 |
| 0,375 | 112,9 | 2,65 | 111,77 | 2,63 | 105,39 | 2,53 | 74,64 | 6,07 | 74,02 | 6,0 | 70,5 | 5,65 |
| 0,425 | 108,09 | 2,66 | 107,11 | 2,65 | 101,36 | 2,55 | 71,41 | 6,11 | 70,87 | 6,05 | 67,71 | 5,71 |
| 0,475 | 103,82 | 2,68 | 102,97 | 2,66 | 97,74 | 2,57 | 68,55 | 6,14 | 68,08 | 6,09 | 65,2 | 5,77 |
| 0,5 | 101,86 | 2,68 | 101,07 | 2,67 | 96,06 | 2,57 | 67,23 | 6,16 | 66,79 | 6,1 | 64,04 | 5,79 |
| 0,55 | 98,23 | 2,69 | 97,52 | 2,68 | 92,92 | 2,59 | 64,79 | 6,19 | 64,4 | 6,14 | 61,87 | 5,84 |
| 0,6 | 94,92 | 2,7 | 94,3 | 2,69 | 90,04 | 2,6 | 62,57 | 6,22 | 62,22 | 6,18 | 59,89 | 5,89 |
| 0,65 | 91,89 | 2,71 | 91,34 | 2,7 | 87,38 | 2,62 | 60,53 | 6,25 | 60,23 | 6,21 | 58,06 | 5,93 |
| 0,7 | 89,1 | 2,72 | 88,6 | 2,71 | 84,91 | 2,63 | 58,66 | 6,28 | 58,39 | 6,24 | 56,36 | 5,97 |
| 0,75 | 86,51 | 2,73 | 86,06 | 2,72 | 82,61 | 2,64 | 56,92 | 6,31 | 56,68 | 6,28 | 54,79 | 6,01 |
| 0,8 | 84,1 | 2,74 | 83,7 | 2,73 | 80,46 | 2,66 | 55,31 | 6,34 | 55,09 | 6,31 | 53,31 | 6,05 |
| 0,85 | 81,85 | 2,75 | 81,49 | 2,74 | 78,44 | 2,67 | 53,8 | 6,37 | 53,6 | 6,34 | 51,93 | 6,09 |
| 0,9 | 79,74 | 2,76 | 79,41 | 2,75 | 76,53 | 2,68 | 52,38 | 6,4 | 52,2 | 6,37 | 50,63 | 6,13 |
| 0,95 | 77,75 | 2,77 | 77,45 | 2,76 | 74,73 | 2,69 | 51,05 | 6,42 | 50,88 | 6,4 | 49,4 | 6,16 |
| 1,0 | 75,67 | 2,78 | 75,61 | 2,77 | 73,03 | 2,7 | 49,79 | 6,45 | 49,64 | 6,42 | 48,23 | 6,19 |
| 1,25 | 67,86 | 2,82 | 67,69 | 2,81 | 65,68 | 2,75 | 44,43 | 6,58 | 44,34 | 6,56 | 43,24 | 6,35 |
| 1,5 | 61,53 | 2,86 | 61,42 | 2,85 | 59,8 | 2,8 | 40,19 | 6,69 | 40,13 | 6,68 | 39,25 | 6,49 |
| 1,75 | 56,35 | 2,89 | 56,29 | 2,89 | 54,95 | 2,84 | 36,74 | 6,8 | 36,71 | 6,79 | 35,98 | 6,62 |
| 2,0 | 52,04 | 2,92 | 51,99 | 2,92 | 50,88 | 2,87 | 33,87 | 6,9 | 33,84 | 6,89 | 30,24 | 6,73 |
| 2,5 | 45,2 | 2,98 | 45,18 | 2,98 | 44,39 | 2,94 | 29,33 | 7,08 | 29,32 | 7,07 | 28,89 | 6,94 |
| 3,0 | 40,02 | 3,03 | 40,0 | 3,03 | 39,42 | 2,99 | 25,9 | 7,23 | 25,89 | 7,23 | 25,57 | 7,11 |
| 3,5 | 35,93 | 3,07 | 35,91 | 3,07 | 35,48 | 3,04 | 23,2 | 7,37 | 23,19 | 7,37 | 22,95 | 7,26 |
| 4,0 | 32,62 | 3,11 | 32,6 | 3,11 | 32,27 | 3,08 | 21,02 | 7,49 | 21,01 | 7,48 | 20,83 | 7,4 |
| 4,5 | 29,88 | 3,14 | 29,85 | 3,14 | 29,61 | 3,12 | 19,22 | 7,60 | 19,21 | 7,59 | 19,08 | 7,51 |
| 5,0 | 27,57 | 3,17 | 27,54 | 3,17 | 27,36 | 3,15 | 17,71 | 7,69 | 17,7 | 7,68 | 17,6 | 7,62 |
| 5,5 | 25,6 | 3,2 | 25,56 | 3,2 | 25,43 | 3,18 | 16,43 | 7,78 | 16,4 | 7,77 | 16,33 | 7,72 |
| 6,0 | 23,9 | 3,23 | 23,85 | 3,22 | 23,76 | 3,21 | 15,31 | 7,86 | 15,29 | 7,84 | 15,24 | 7,8 |
| 6,5 | 22,41 | 3,25 | 22,35 | 3,25 | 22,29 | 3,24 | 14,34 | 7,93 | 14,31 | 7,91 | 14,28 | 7,88 |
| 7,0 | 21,09 | 3,27 | 21,03 | 3,27 | 21,0 | 3,26 | 13,49 | 8,0 | 13,45 | 7,98 | 13,44 | 7,96 |
| 7,5 | 19,92 | 3,29 | 19,85 | 3,28 | 19,84 | 3,28 | 12,73 | 8,06 | 12,69 | 8,03 | 12,69 | 8,03 |
| 8,0 | 18,88 | 3,31 | 18,8 | 3,3 | 18,81 | 3,3 | 12,05 | 8,12 | 12,01 | 8,09 | 12,01 | 8,09 |
| 8,5 | 17,93 | 3,33 | 17,85 | 3,32 | 17,88 | 3,32 | 11,44 | 8,18 | 11,4 | 8,14 | 11,41 | 8,15 |
| 9,0 | 17,08 | 3,34 | 16,99 | 3,33 | 17,04 | 3,34 | 10,89 | 8,23 | 10,84 | 8,18 | 10,86 | 8,2 |
| 9,5 | 16,31 | 3,36 | 16,21 | 3,34 | 16,27 | 3,35 | 10,39 | 8,28 | 10,34 | 8,23 | 10,37 | 8,25 |
| 10,0 | 15,6 | 3,37 | 15,5 | 3,36 | 15,56 | 3,37 | 9,93 | 8,32 | 9,88 | 8,27 | 9,91 | 8,3 |

**МПЛ с полоской конечной толщины.** При $t/h > 0$, $a = \infty$, $f < 1$ ГГц $Z_в$ практически точно можно определить по методике, изложенной в [2.29], где анализ выполнен в квазистатическом приближении путем комбинации метода зеркальных отображений с методом функции Грина. Для получения конкретных результатов, представленных в табл. 2.5, применялись численные методы. Увеличение толщины полоски уменьшает $Z_в$, причем влияние толщины тем больше, чем меньше $w/h$ и $\varepsilon_r$ подложки. При $t/h < 0,005$ $Z_в$ допустимо определять по (2.69), (2.70), полагая $t/h = 0$. Для более толстых полосок $t/h \leqslant 0,08$ расчет $Z_в$ можно провести по (2.69), (2.70), заменив $w/h$ на $w'/h$ в соответствии с (2.67), (2.68); $\varepsilon_{эф0}$ определяется из (2.73). Погрешность вычислений $Z_в$ по указанной методике не превышает 2%.

При $2,5 < \varepsilon_r < 6$, $w/h < 1,25$ и $0,1 < t/w < 0,8$ $Z_в$ описывается с погрешностью, меньшей 5% [2.30], следующей эмпирической формулой:

$$Z_в = 60 \ln [4/(0,536w/h + 0,67t/h)]/\sqrt{0,475\varepsilon_r + 0,67}.$$

**Пример 2.11.** Определить ширину полоски МПЛ, рассмотренной в примере 2.9, если толщина полоски $t = 0{,}03$ мм. Найти фазовую скорость $v_ф$ квази-Т-волны без учета дисперсии. Из (2.71) находим $w'/h = 1$ (см. пример 2.10). Так как $t/h = 0{,}03$, то согласно (2.68) $w/h = 1 - 0{,}03\,[1 + \ln(2/0{,}03)]/\pi = 0{,}95$; $w = 0{,}95 \cdot 1 = 0{,}95$ мм. Из (2.73) определяем $\varepsilon_{эф\,0} = [9{,}6 + 1 + (9{,}6 - 1)/ \times \times \sqrt{1 + 10/0{,}95}]/2 = 6{,}57$ и $v_ф = 3 \cdot 10^8/\sqrt{6{,}57} = 1{,}17 \cdot 10^8$ м/с.

## ДИСПЕРСИЯ ОСНОВНОЙ ВОЛНЫ

Поскольку основной в МПЛ является гибридная волна, $v_ф$, $Z_в$ и другие характеристики линии зависят от частоты. Точно определить эти зависимости можно лишь в результате строгого решения соответствующей краевой задачи [2.32—2.37]. Получение конечных результатов, как правило, требует использования того или иного численного метода и практически невозможно без ЭВМ. Результаты расчета дисперсионных характеристик МПЛ, выполненные в [2.68], представлены на рис. 2.44, 2.45. Анализ результатов расчета и эксперимента позволяет сделать следующие выводы: $\varepsilon_{эф}$ увеличивается с ростом частоты от $\varepsilon_{эф\,0}$ при $f = 0$ до $\varepsilon_r$ при $f \to \infty$; скорость возрастания $\varepsilon_{эф}$ при изменении $f$ зависит от отношения мощности, переносимой волной в диэлектрике подложки, к мощности, переносимой в воздухе; чем больше указанное отношение, тем больше скорость возрастания $\varepsilon_{эф}$ при увеличении $f$. Поэтому наклон дисперсионной кривой увеличивается как при увеличении ширины полоски и $\varepsilon_r$ подложки, так и при уменьшении толщины подложки.

На основании обобщения многочисленных экспериментальных результатов получена следующая эмпирическая формула, позволяющая сравнительно просто учесть дисперсию основной волны в МПЛ [3.3]:

$$\varepsilon_{эф} = \{[(f/f_ω)^2 + 1]/[(f/f_ω)^2 + \sqrt{\varepsilon_r/\varepsilon_{эф0}}]\}^2\,\varepsilon_r, \qquad (2.74)$$

где $f_ω$ [ГГц] $= 3{,}5 + (16{,}2\varepsilon_r^{0,25})/(1 + 0{,}12w\varepsilon_r^{0,35}/h)$; $f$ — рабочая частота, ГГц; $\varepsilon_{эф0}$ определяется из (2.73). Сравнение с результатами численного расчета [2.36, 2.37] и экспериментального исследования [2.36, 2.38] показало, что при $\varepsilon_r < 12$ и $h \leqslant 1$ мм точность вычислений по (2.74) не хуже 2%. При $\varepsilon_r > 7 \ldots 8$ и $h > 1$ мм на участке наибольшей дисперсии погрешность вычислений по (2.74) увеличивается до 5%. Для сравнительно толстых подложек на участке наибольшей дисперсии можно использовать формулу, полученную в результате линейной аппроксимации данного участка на основе обобщения экспериментальных результатов [2.39, 2.40]:

1) при $w/h \leqslant 4$

$$\varepsilon_{эф} = \varepsilon_{эф0} + 11{,}8 \cdot 10^{-5}(\varepsilon_r^2 - 1)\,h\sqrt{Z_в\,w/h}\,(f - f_0); \qquad (2.75)$$

2) при $w/h > 4$

$$\varepsilon_{эф} = \varepsilon_{эф0} + 6{,}82 \cdot 10^{-5}(\varepsilon_r^2 - 1)\,h\sqrt{Z_в}\,(w/h)\,(f - f_0), \qquad (2.76)$$

где $f_0 = 0{,}956\sqrt{Z_в}/(\sqrt{h}\sqrt[4]{\varepsilon_r - 1})$; $f$ — рабочая частота, ГГц; $w$ и $h$ измеряются в миллиметрах; $\varepsilon_{эф0}$ и $Z_в$ рассчитываются по (2.61), (2.62), (2.73), причем если $0 < t/h < 0{,}1$, то следует заменить $w/h$ на $w'/h$ по (2.67), (2.68). Дисперсию по (2.75), (2.76) следует учитывать при $f > f_0$. Когда $f < f_0$, то $\varepsilon_{эф} = \varepsilon_{эф0}$. На рис. 2.46 приведены некоторые результаты расчета по (2.75), (2.76) и дано сравнение с результатами, полученными строгими методами (на рис. 2.46 отмечены кружками) или экспериментально (на рис. 2.46 нанесены крестиками). Графики *1*, *2*, *3* построены для $\varepsilon_r = 2{,}32$, $h = 0{,}76$ мм при $Z_в = 70$, 50, 35 Ом соответственно (экспериментальные результаты из [2.41]). Графики *4*, *5*, *8* построены для $\varepsilon_r = 8{,}875$, $h = 1{,}27$ мм и относительной ширины полоски 0,5; 1 и 4 соответственно (результаты строгого анализа из [2.36, 2.37]). График *6* построен для $\varepsilon_r = 9{,}9$, $h = 1{,}27$ мм и $w/h = 0{,}9$ (результаты строгого анализа из [2.36]). Графики *7* и *10* для $\varepsilon_r = 10{,}31$, $h = 0{,}64$ мм, $w/h = 1$ и 5 соответственно (результаты эксперимента из [2.36]). График *9* для $\varepsilon_r = 10{,}1$, $h = 1{,}27$ мм и $w/h = 2{,}5$

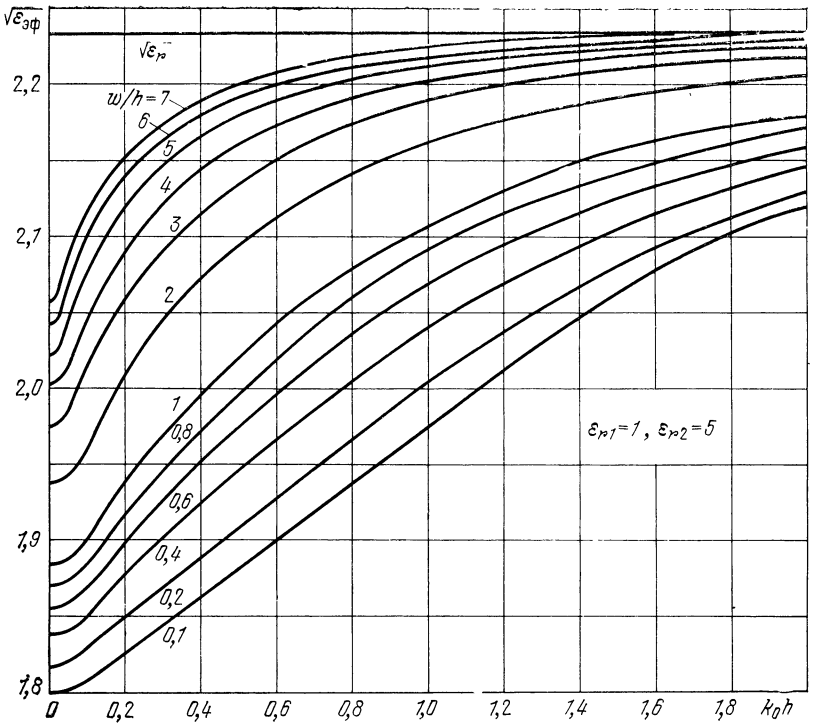



Рис. 2.44

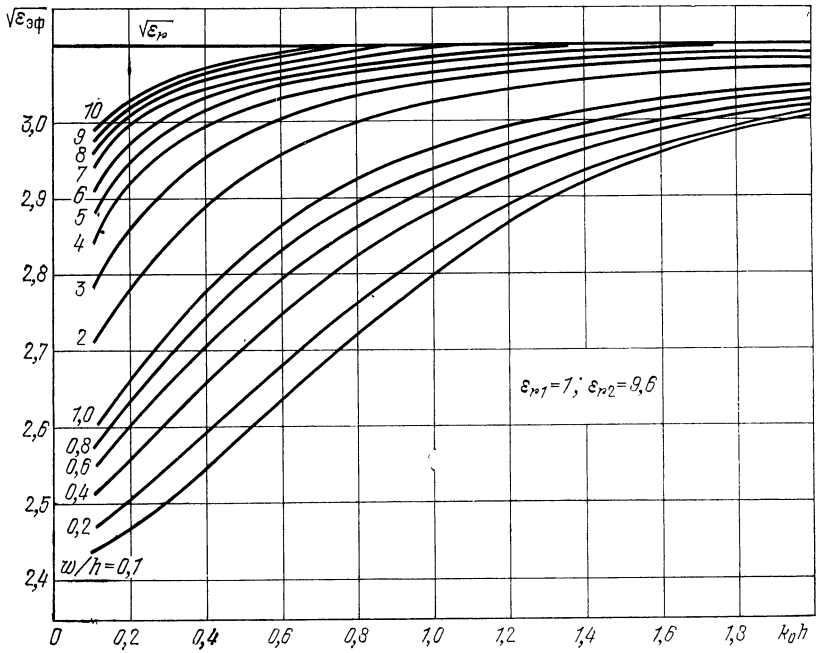



Рис. 2.45

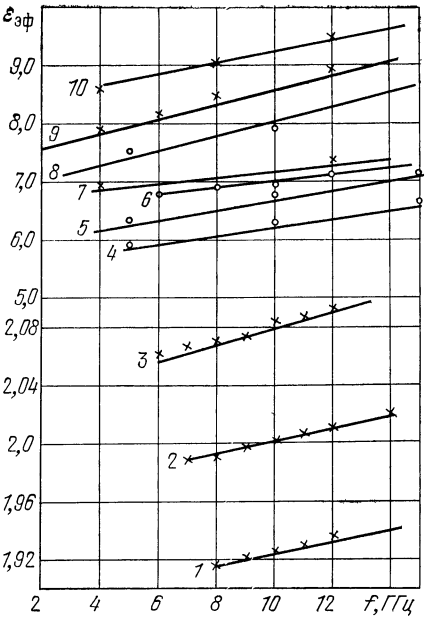



Рис. 2.46

(результаты эксперимента из (2.42)]. Сравнение показало, что при $f \leqslant 15$ ГГц, $0{,}5 \leqslant w/h \leqslant 13$, $0{,}5$ мм $\leqslant h \leqslant 3$ мм, $2 \leqslant \varepsilon_r \leqslant 12$ ошибка, возникающая при вычислении $\varepsilon_{эф}$ по (2.75), (2.76), не превышает 2%.

Конечная толщина полоски также влияет на дисперсию: ее увеличение приводит к некоторому уменьшению дисперсии. Однако на практике, особенно при малых $t/h$, этим эффектом можно пренебречь. Например, при $\varepsilon_r = 9{,}7$ значение $\varepsilon_{эф}$ при $t/h = 0$ отличается менее чем на 1% от $\varepsilon_{эф}$ при $t/h = 0{,}01$ [2.34].

На практике можно руководствоваться следующим правилом: в реальных линиях дисперсия основной волны почти не проявляется на частотах $f < 1$ ГГц, структура волны несущественно отличается от структуры Т-волны, основные характеристики МПЛ можно определять в квазистатическом приближении (см. «Волновое сопротивление», § 2.3); на частотах $f > 1$ ГГц основные характеристики МПЛ следует определять с учетом дисперсии.

**Пример 2.12.** Определить с учетом дисперсии $Z_в$ и $v_ф$ основной волны МПЛ, рассмотренной в примере 2.11, на частоте $f = 5$ ГГц. В данном случае $\varepsilon_{r2} = 9{,}6$; $h = 1$ мм; $t = 0{,}03$ мм; $w = 0{,}95$ мм; $w'/h = 1$ и $\varepsilon_{эф0} = 6{,}57$ (см. пример 2.11). Из (2.61) при $\varepsilon_{r2} = 1$ находим вспомогательную величину $Z_в^1 = 60\,[\ln(8/1) + 1/32\,] = 126{,}6$ Ом. Определяем из (2.74):

$f_\omega = 3{,}5 + (16{,}2 \cdot 9{,}6^{0,25})/(1 + 0{,}12 \cdot 0{,}95 \cdot 9{,}6^{0,35}) = 26{,}28$ ГГц, $\varepsilon_{эф} = 9{,}6 \times \{[(5/26{,}28^2) + 1]/[(5/26{,}28)^2 + \sqrt{9{,}6/6{,}57}]\}^2 = 6{,}65$ ($\varepsilon_{эф}$ можно также найти из графиков на рис. 2.45); $Z_в = Z_в^1/\sqrt{\varepsilon_{эф}} = 126{,}6/\sqrt{6{,}65} = 49{,}1$ Ом; $v_ф = 3 \times 10^8/\sqrt{6{,}65} = 1{,}163 \cdot 10^8$ м/с.

## СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

При $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$, $\sigma_м = \infty$ и $a = \infty$ основной волной в НПЛ является Т-волна, составляющие **E** и **H** которой можно определить из (2.37). Для $t/h = 0$ и широких полосок ($w/h > 1$) методом конформного отображения получены следующие формулы [2.15]:

$$E_x(x, y) = Ue^u \sin v/(hr),$$

$$E_y(x, y) = -U(1 + e^u \cos v)/(hr),$$

где $r = 1 + 2e^u \cos v + e^{2u}$; $U$ — разность потенциалов между полоской и экраном, В; переменные $u$ и $v$ связаны с координатами $x$ и $y$ (рис. 2.47) соотношениями $\pi x/h = e^u \cos v + u + 1$, $\pi y/h = e^u \sin v + v$.

На поверхности экрана ($y = 0$, т. е. при $v = 0$)

$$|E_y| = U/[h(1 + e^u)].$$

На поверхности полоски, обращенной в сторону экрана ($y = h - 0$, $x \leqslant 0$, $\pi x/h = -(e^{-|u|} + |u| - 1)$),

$$|E_y| = U/[h(1 - e^{-|u|})];$$

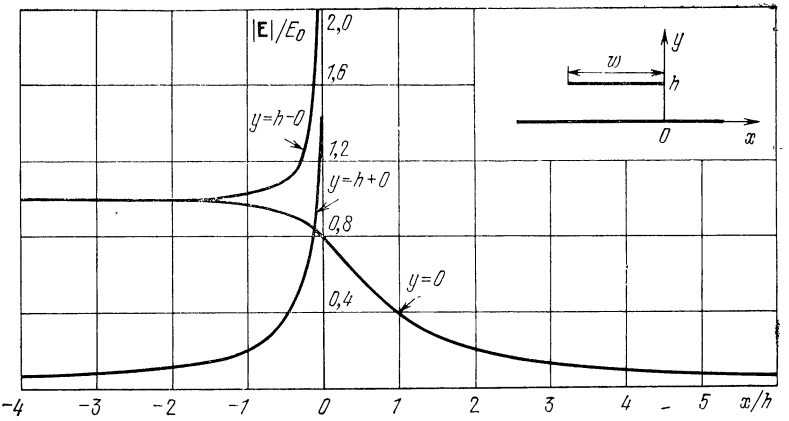



Рис. 2.47

на обратной поверхности полоски ($y = h + 0$, $x \leqslant 0$, $\pi x/h = -(e^{|u|} - |u| - 1)$)

$$|E_y| = U/[h\,(e^{|u|} - 1)].$$

Результаты расчета показаны на рис. 2.47. Как и для СПЛ, напряженность электрического поля достигает максимального значения вблизи края полоски, т. е. при $x \to 0$ $|E_y| \to \infty$, что обусловлено повышенной концентрацией электрических зарядов в этом месте. При удалении от края полоски напряженность электрического поля уменьшается и стремится или к нулю на внешней поверхности полоски ($y = h + 0$), или к напряженности поля плоского конденсатора $E_0 = U/h$ на внутренней поверхности полоски. Распределение плотности поверхностного заряда и плотности поверхностного тока на проводниках линии имеет такой же вид, как и распределение электрического поля (см. рис. 2.47).

На рис. 2.48 показана структура силовых линий электрического и магнитного полей в поперечном сечении НПЛ, рассчитанная по вышеприведенным формулам и хорошо согласующаяся с экспериментально измеренной [2.12].

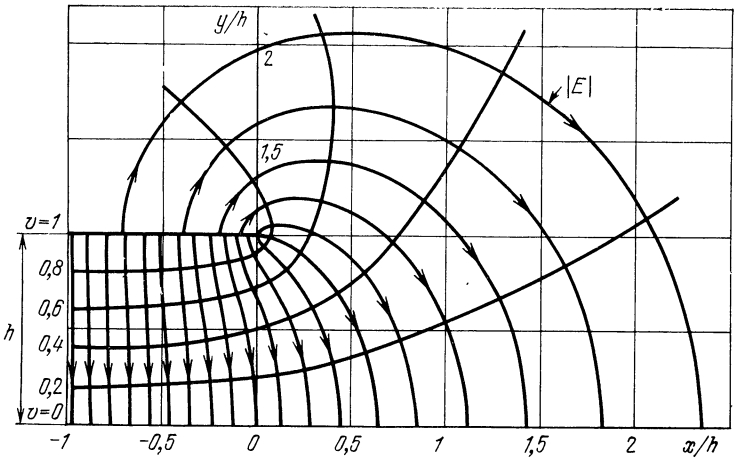



Рис. 2.48

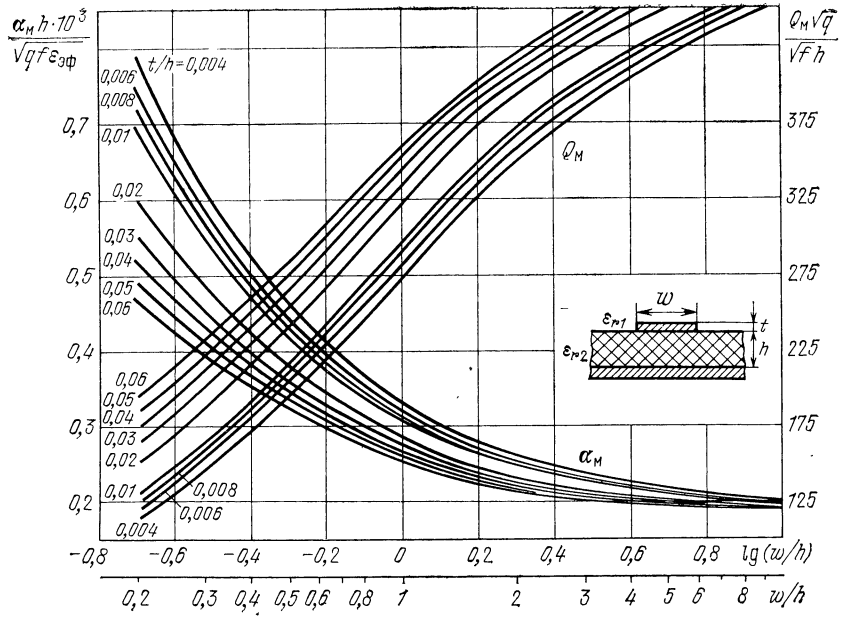



Рис. 2.49

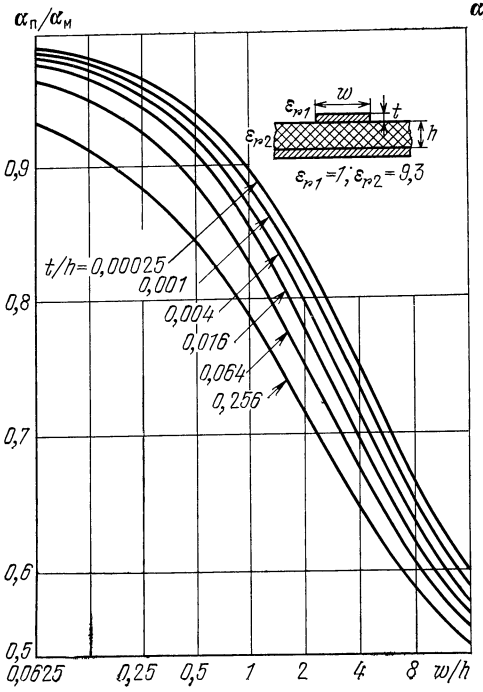



Рис. 2.50

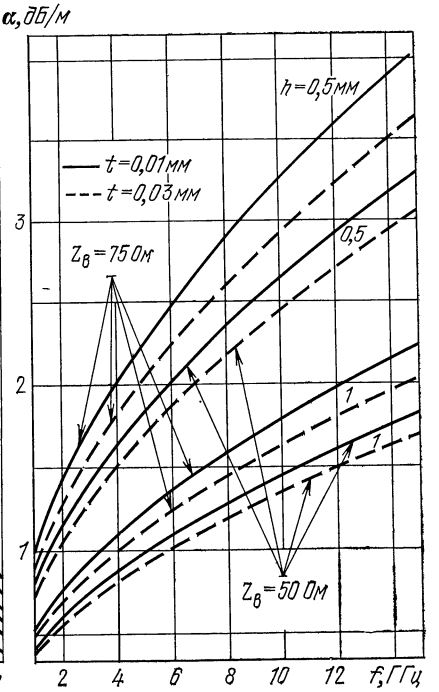



Рис. 2.51

Если общие потери в НПЛ относительно невелики, то коэффициент затухания основной волны описывается формулой (2.38). Коэффициент затухания $\alpha_д$ [дБ/м] определяется:

1) для однородной НПЛ ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$, $a = \infty$) по формуле (2.39);

2) для МПЛ ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$, $\varepsilon_{r1} = 1$, $a = \infty$) [2.43] по формуле

$$\alpha_д = 91\sqrt{\varepsilon_{эф}}\, f\, (\mathrm{tg}\,\delta)_{эф}, \qquad (2.77)$$

где $(\mathrm{tg}\,\delta)_{эф} = \mathrm{tg}\,\delta\{1 + (A - 1)/[\varepsilon_r \times (A + 1)]\}^{-1}$; $A = \sqrt{1 + 10h/w}$; $f$ — частота, ГГц.

Коэффициент затухания $\alpha_м$ определяется по следующим приближенным формулам [2.44, 2.45]:

1) при $w/h \leqslant 0{,}16$

$$\alpha_м h\ [дБ] \approx 0{,}0114rs\,\{p + h\,[\ln[4\pi w/t) + t/w]/(\pi w')\}; \qquad (2.78)$$

2) при $0{,}16 < w/h \leqslant 2$

$$\alpha_м h\ [дБ] \approx 0{,}0114rsl_1; \qquad (2.79)$$

3) при $w/h > 2$

$$\alpha_м h\ [дБ] \approx 0{,}0716rl_1\,[w'/h + w'/(\pi hd)]\,[w'/h + 2\ln(17{,}08d)/\pi]^{-1}, \qquad (2.80)$$

где $r = \sqrt{qf}/Z_в$; $s = 1 - [w'/(4h)]^2$; $p = 1 + h/w'$; $d = w'/(2h) + 0{,}94$; $l_1 = p + h\,[\ln(2h/t) - t/h]/(\pi w')$.

В формулах (2.78)—(2.80) $f$ — частота, ГГц; $q$ определяется из табл. 1.6, а $w'/h$ — из (2.67), (2.68). Результаты расчета представлены на рис. 2.49. На том же рисунке нанесена зависимость $Q_м\sqrt{q}/(h\sqrt{f})$, где $Q_м$ — собственная добротность полуволнового резонатора, выполненного на НПЛ; $f$ в ГГц; $h$ в мм.

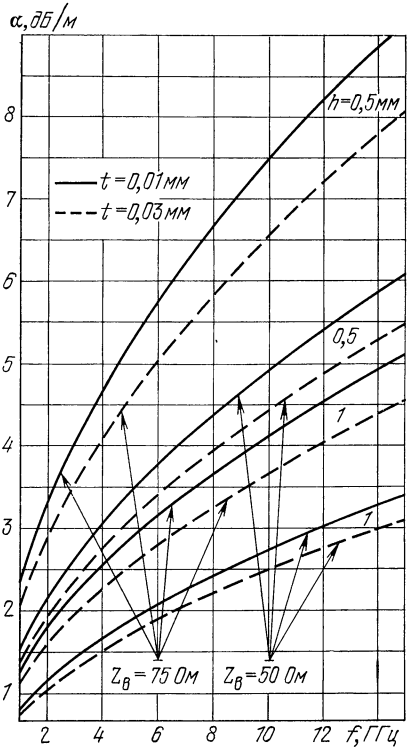



Рис. 2.52

Затухание в проводниках НПЛ увеличивается при уменьшении ширины полоски и ее толщины, т. е. при увеличении $Z_в$. На рис. 2.50 показана полученная методом интегральных уравнений [2.70] зависимость от размеров МПЛ отношения коэффициента затухания, обусловленного потерями в полоске $\alpha_п$, к величине $\alpha_м$. На рис. 2.51, 2.52 приведены частотные зависимости $\alpha$ для МПЛ с $Z_в = 50$ и 75 Ом, имеющей подложку из плавленного кварца (рис. 2.51) или из поликора (рис. 2.52), для двух значений толщины полоски. При расчете предполагалось, что проводники выполнены из меди.

**Пример 2.13.** Определить на частоте $f = 1$ ГГц $\alpha$ и $Q_0$ МПЛ, рассмотренной в примере 2.11, если полоски выполнены из меди ($q = 1$). В данном случае (см. пример 2.11) $w = 0{,}95$ мм; $h = 1$ мм; $t = 0{,}03$ мм; $\varepsilon_r = 9{,}6$; $\mathrm{tg}\,\delta = 10^{-4}$; $Z_в = 50$ Ом; $w'/h = 1$ и $\varepsilon_{эф0} = 6{,}57$. Рассчитаем вспомогательные величины: $r/h = \sqrt{1\cdot 1}/(50\cdot 0{,}001) = 20$; $s = 1 - (1/4)^2 = 0{,}938$; $p = 1 + 1 = 2$; $l_1 = 2 + 1\,[\ln(2/0{,}03) - 0{,}03]/\pi = 3{,}327$. Согласно (2.79) $\alpha_м = 0{,}0114\cdot 20\cdot 0{,}938 \times 3{,}327 = 0{,}71$ дБ/м. Из (2.77) определяем $A = \sqrt{1 + 10/0{,}95} = 3{,}395$; $(\mathrm{tg}\,\delta)_{эф} = 10^{-4}/\{1 + (3{,}395 - 1)/[9{,}6\,(3{,}395 + 1)]\} = 0{,}946\cdot 10^{-4}$, т. е. $\alpha_д =$

$= 91 \cdot \sqrt{6{,}57} \cdot 1 \cdot 0{,}946 \cdot 10^{-4} = 0{,}022$ дБ/м. Полный коэффициент затухания $\alpha = 0{,}71 + 0{,}022 = 0{,}732$ дБ/м. Частичные и полная добротности

$$\beta = 2\pi/\Lambda = 2\pi\sqrt{\varepsilon_{эф0}}/\lambda\,[м] = 2\pi\sqrt{6{,}57} \cdot 1 \cdot 10^9/3 \cdot 10^8 = 53{,}7\ м^{-1};$$

$$Q_м = 8{,}68\beta/(2\alpha_м) = 53{,}7 \cdot 8{,}68/(2 \cdot 0{,}71) = 328;\ Q_д = 1/(\mathrm{tg}\,\delta)_{эф} = 10\,571;$$

$$Q_0 = Q_м Q_д/(Q_м + Q_д) = 318.$$

## ПРЕДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

НПЛ по сравнению с полыми и коаксиальными волноводами работает при существенно более низких уровнях мощности. Это обусловлено значительной концентрацией энергии поля вблизи края полоски, малым зазором между полоской и экраном, рассеянием мощности в диэлектрике линии, а также малой шириной полоски.

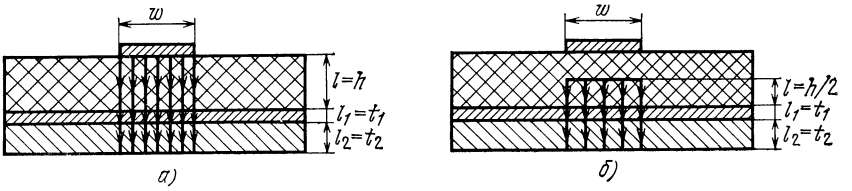



Рис. 2.53

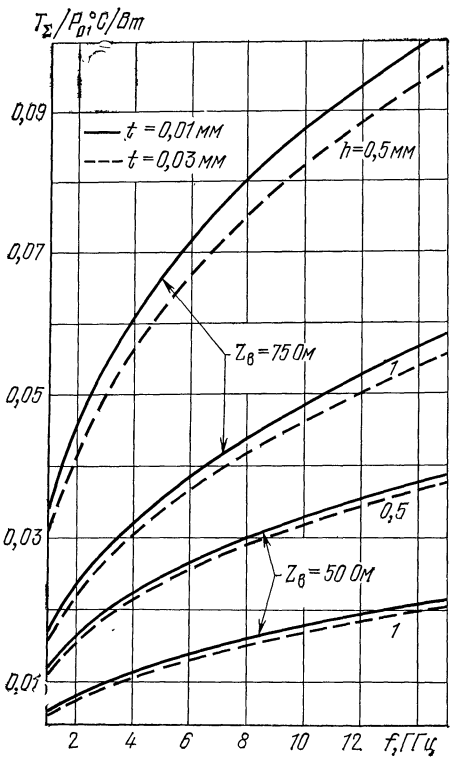



Рис. 2.54

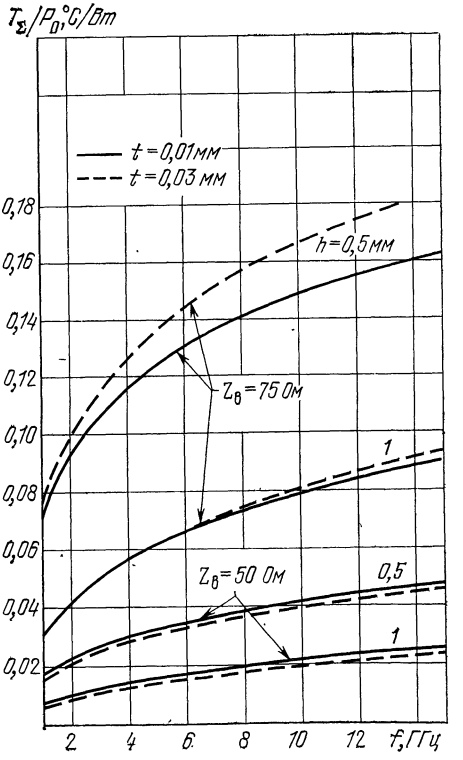



Рис. 2.55

**Импульсная мощность.** Как и для СПЛ, макетирование [2.16] во многих случаях является единственно возможным при разработке НПЛ, обладающей относительно высокой электрической прочностью. Сведения, имеющиеся в литературе по экспериментальному и теоретическому определениям предельной мощности чрезвычайно неполны и отрывочны и не позволяют дать какие-либо общие рекомендации. Исходя из общих физических соображений можно утверждать, что для увеличения предельной мощности следует закруглять края полоски, увеличивать ее толщину, адгезию с подложкой и расстояние между полоской и экраном, а также использовать линию с меньшим $Z_в$. Предельную импульсную мощность НПЛ можно повысить, заполнив линию диэлектриком при тех же ограничениях, что и для СПЛ.

**Средняя непрерывная мощность.** Максимальная средняя мощность, которую можно передать по МПЛ, оценивается по методике, описанной в § 2.2, для следующей модели МПЛ (рис. 2.53): экран линии состоит из тонкого токонесущего слоя толщиной $t_1$ и сравнительно толстой алюминиевой пластины толщиной

Таблица 2.6

**Предельная средняя мощность, Вт, МПЛ (диэлектрик ФАФ-4) при $T_{ср}=20$ °С и различных значениях $h$, мм; $t$, мм**

| $f$, ГГц | $h=0,5$ | | $h=1$ | | $h=1,5$ | | $h=2$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t=0,01$ | $t=0,03$ | $t=0,01$ | $t=0,03$ | $t=0,01$ | $t=0,03$ | $t=0,01$ | $t=0,03$ |
| | | | | $Z_в=50$ Ом | | | | |
| 1 | 1527 | 1618 | 2660 | 2795 | 3548 | 3707 | 4271 | 4441 |
| 2 | 1033 | 1090 | 1727 | 1806 | 2241 | 2328 | 2639 | 2730 |
| 3 | 817 | 859 | 1330 | 1387 | 1695 | 1756 | 1971 | 2032 |
| 4 | 690 | 724 | 1101 | 1145 | 1386 | 1432 | 1569 | 1642 |
| 5 | 605 | 634 | 949 | 985 | 1183 | 1220 | 1351 | 1388 |
| 6 | 543 | 568 | 840 | 871 | 1037 | 1069 | 1178 | 1208 |
| 7 | 495 | 517 | 757 | 784 | 927 | 954 | 1048 | 1074 |
| 8 | 457 | 477 | 691 | 715 | 842 | 865 | 946 | 969 |
| 9 | 426 | 444 | 638 | 659 | 772 | 793 | 865 | 885 |
| 10 | 399 | 416 | 594 | 613 | 715 | 734 | 798 | 816 |
| 11 | 377 | 393 | 557 | 574 | 668 | 685 | 743 | 759 |
| 12 | 358 | 372 | 525 | 541 | 627 | 643 | 695 | 710 |
| 13 | 341 | 355 | 497 | 512 | 592 | 606 | 655 | 668 |
| 14 | 327 | 339 | 473 | 487 | 561 | 574 | 619 | 632 |
| 15 | 313 | 325 | 451 | 465 | 534 | 547 | 588 | 600 |
| | | | | $Z_в=75$ Ом | | | | |
| 1 | 701 | 760 | 1222 | 1310 | 1641 | 1745 | 1988 | 2102 |
| 2 | 478 | 516 | 803 | 856 | 1051 | 1110 | 1248 | 1310 |
| 3 | 380 | 409 | 623 | 661 | 802 | 744 | 940 | 983 |
| 4 | 323 | 346 | 519 | 549 | 659 | 692 | 766 | 799 |
| 5 | 284 | 304 | 449 | 474 | 565 | 592 | 652 | 679 |
| 6 | 256 | 273 | 399 | 420 | 498 | 521 | 571 | 593 |
| 7 | 234 | 249 | 361 | 379 | 447 | 466 | 510 | 529 |
| 8 | 216 | 230 | 331 | 347 | 407 | 424 | 462 | 478 |
| 9 | 202 | 214 | 306 | 321 | 374 | 389 | 423 | 438 |
| 10 | 190 | 201 | 285 | 299 | 347 | 361 | 301 | 404 |
| 11 | 180 | 190 | 268 | 280 | 325 | 335 | 365 | 377 |
| 12 | 171 | 181 | 253 | 264 | 305 | 317 | 342 | 352 |
| 13 | 163 | 172 | 240 | 250 | 289 | 299 | 322 | 332 |
| 14 | 156 | 165 | 228 | 238 | 274 | 284 | 305 | 315 |
| 15 | 150 | 158 | 218 | 228 | 264 | 270 | 290 | 299 |

Таблица 2.7

**Предельная средняя мощность, КВт, МПЛ (диэлектрик—плавленный кварц, $\varepsilon_r = 3{,}82$, tg $\delta = 10^{-4}$) при $T_{ср} = 20$ °С и различных значениях $h$, мм; $t$, мм**

| $f$, ГГц | $Z_в = 50$ Ом | | | | $Z_в = 75$ Ом | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $h = 0{,}5$ | | $h = 1$ | | $h = 0{,}5$ | | $h = 1$ | |
| | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ |
| 1 | 11,04 | 11,60 | 22,48 | 23,38 | 3,92 | 4,30 | 7,85 | 8,37 |
| 2 | 8,00 | 8,40 | 16,00 | 17,02 | 2,88 | 3,14 | 5,64 | 6,00 |
| 3 | 6,66 | 7,00 | 13,15 | 13,95 | 2,40 | 2,62 | 4,65 | 4,95 |
| 4 | 5,86 | 6,12 | 11,43 | 12,12 | 2,15 | 2,30 | 4,10 | 4,30 |
| 5 | 5,31 | 5,54 | 10,26 | 10,87 | 1,95 | 2,10 | 3,67 | 3,88 |
| 6 | 4,90 | 5,12 | 9,40 | 9,95 | 1,81 | 1,95 | 3,37 | 3,56 |
| 7 | 4,60 | 4,78 | 8,73 | 9,22 | 1,70 | 1,82 | 3,15 | 3,32 |
| 8 | 4,34 | 4,50 | 8,18 | 8,65 | 1,62 | 1,73 | 2,95 | 3,12 |
| 9 | 4,13 | 4,30 | 7,73 | 8,16 | 1,55 | 1,65 | 2,80 | 2,95 |
| 10 | 3,95 | 4,10 | 7,35 | 7,76 | 1,48 | 1,58 | 2,68 | 2,82 |
| 11 | 3,80 | 3,94 | 7,00 | 7,41 | 1,43 | 1,52 | 2,56 | 2,70 |
| 12 | 3,66 | 3,80 | 6,73 | 7,10 | 1,38 | 1,47 | 2,46 | 2,60 |
| 13 | 3,54 | 3,67 | 6,48 | 6,83 | 1,34 | 1,42 | 2,38 | 2,50 |
| 14 | 3,43 | 3,56 | 6,25 | 6,58 | 1,31 | 1,38 | 2,30 | 2,40 |
| 15 | 3,35 | 3,46 | 6,05 | 6,35 | 1,28 | 1,35 | 2,23 | 2,34 |

$t_2$. В результате рассеяния мощности $P_п$ в полоске и $P_д$ в диэлектрике подложки перпендикулярно направлению распространения волны возникает тепловой поток, из-за чего устанавливается разница температур между полоской и экраном, При этом максимальная температура диэлектрика будет в середине полоски, она определяется температурой внешней поверхности экрана и приращением температуры за счет протекания теплового потока. Поскольку тепловое сопротивление

Таблица 2.8

**Предельная средняя мощность, кВт, МПЛ (диэлектрик—поликор, $\varepsilon_r = 9{,}6$, tg $\delta = 10^{-4}$) при $T_{ср} = 20$ °С и различных значениях $h$, мм; $t$ мм**

| $f$, ГГц | $Z_в = 50$ Ом | | | | $Z_в = 75$ Ом | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $h = 0{,}5$ | | $h = 1$ | | $h = 0{,}5$ | | $h = 1$ | |
| | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ | $t = 0{,}01$ | $t = 0{,}03$ |
| 1 | 39,72 | 42,64 | 90,70 | 98,50 | 9,50 | 8,95 | 21,70 | 22,00 |
| 2 | 29,70 | 31,65 | 65,70 | 71,90 | 7,35 | 6,85 | 16,00 | 16,20 |
| 3 | 25,25 | 26,80 | 55,00 | 59,90 | 6,40 | 6,15 | 13,50 | 13,63 |
| 4 | 22,60 | 23,90 | 48,10 | 52,60 | 5,85 | 5,40 | 12,10 | 12,1 |
| 5 | 20,80 | 21,90 | 43,50 | 47,60 | 5,50 | 5,00 | 11,10 | 11,1 |
| 6 | 19,50 | 20,50 | 40,30 | 43,70 | 5,20 | 4,72 | 10,35 | 10,3 |
| 7 | 18,47 | 19,35 | 37,60 | 40,80 | 5,00 | 4,50 | 9,75 | 9,68 |
| 8 | 17,64 | 18,43 | 35,50 | 38,50 | 4,83 | 4,35 | 9,30 | 9,20 |
| 9 | 16,96 | 17,68 | 33,60 | 36,50 | 4,70 | 4,20 | 8,90 | 8,80 |
| 10 | 16,35 | 17,04 | 32,20 | 34,80 | 4,58 | 4,10 | 8,60 | 8,45 |
| 11 | 15,85 | 16,50 | 30,90 | 33,40 | 4,48 | 4,00 | 8,30 | 8,20 |
| 12 | 15,45 | 16,00 | 29,80 | 32,10 | 4,40 | 3,90 | 8,10 | 7,92 |
| 13 | 15,05 | 15,58 | 28,80 | 31,00 | 4,32 | 3,82 | 7,85 | 7,68 |
| 14 | 14,71 | 15,20 | 27,90 | 30,00 | 4,25 | 3,75 | 7,65 | 7,50 |
| 15 | 14,40 | 14,85 | 27,10 | 29,10 | 4,19 | 3,70 | 7,50 | 7,31 |

воздуха гораздо больше теплового сопротивления диэлектрика подложки, протекающий в воздухе тепловой поток будет чрезвычайно мал. Пренебрегая тепловым потоком в воздухе и расхождением теплового потока в диэлектрике, можно в первом приближении считать, что тепловые потоки, созданные $P_п$ (рис. 2.53, *а*) и $P_д$ (рис. 2.53, *б*), плоскопараллельны. Для рассматриваемой модели полное изменение температуры между внешней поверхностью экрана и полоской определяется по (2.46), где

$$\Delta T_1/P_0\,[°C/Вт] = R\,(\delta_д + 2\delta_п)\,h/2w; \qquad (2.81)$$

$$\Delta T_2/P_0\,[°C/Вт] = R_1\,(\delta_д + \delta_м)\,t_1/w; \qquad (2.82)$$

$$\Delta T_3/P_0\,[°C/Вт] = R_2\,(\delta_д + \delta_м)\,t_2/w; \qquad (2.83)$$

величины $R$, $R_1$, $R_2$, $\delta_д$, $\delta_п$, $\delta_м$ имеют тот же смысл, что и в (2.49)—(2.51); $\alpha_д$ и $\alpha_м$ определяются из (2.77)—(2.80). Предельный уровень средней мощности находится из (2.52) и обычно уменьшается в 1,5 ... 2 раза из-за приближенности используемого метода анализа.

На рис. 2.54, 2.55 приведены результаты расчета по формулам (2.46), (2.52), (2.81)—(2.83) для МПЛ, имеющей $Z_в = 50$ и 75 Ом с подложкой из плавленного кварца (рис. 2.54) или поликора (рис. 2.55), для двух значений толщины полоски. Предполагалось, что полоска и токонесущий слой экрана толщиной $t_1 = t$, выполнены из меди и $t_2 = 3$ мм. Результаты расчета предельной средней мощности приведены в табл. 2.6—2.8.

## ВОЛНЫ ВЫСШЕГО ТИПА

Для подавляющего большинства МПЛ, используемых на практике, первая и вторая волны высшего типа — $HE_1$ и $HE_2$. Строгое определение постоянной распространения волн высших типов связано с решением волнового уравнения для продольных составляющих полей при соответствующих граничных условиях [2.36, 2.68]. Результаты численного расчета [2.68] для волны $HE_1$ приведены на рис. 2.56 и 2.57.

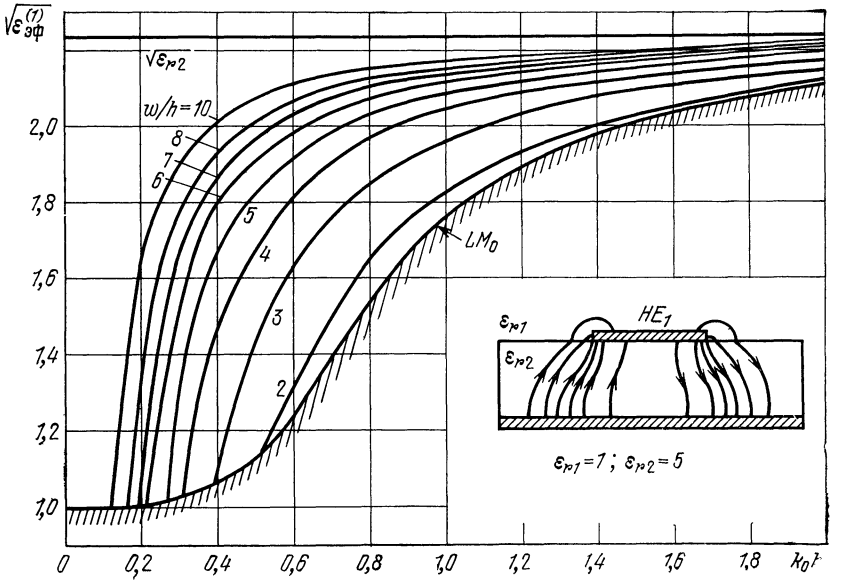



Рис. 2.56

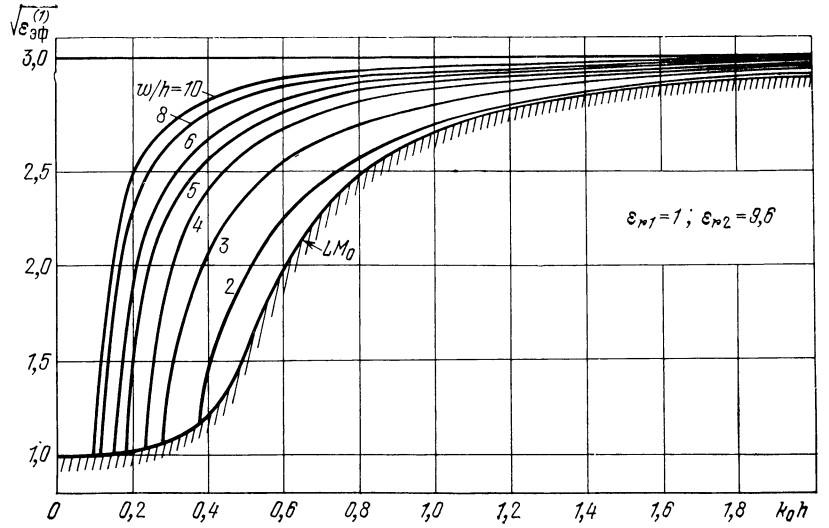



Рис. 2.57

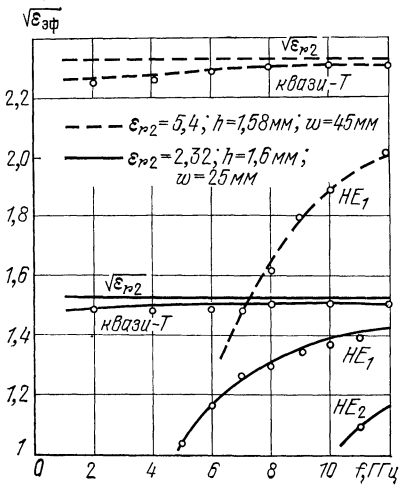



Рис. 2.58

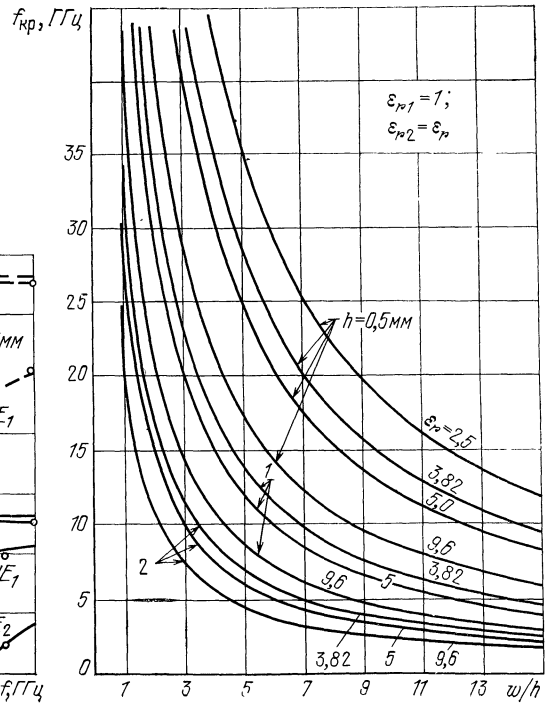



Рис. 2.59

Получение результата при строгом решении задачи, как правило, требует использования того или иного численного метода и применения ЭВМ. Опираясь на волноводную модель Олинера (§ 3.1), можно приближенно определить постоянную распространения $\beta^{(n)}$ первой ($n = 1$) и второй ($n = 2$) высших волн

$$\beta^{(n)}/k_0 = \sqrt{\varepsilon_{эф} - (n\lambda/2a_1)^2} = \sqrt{\varepsilon_{эф}^{(n)}}, \qquad (2.84)$$

где $a_1 = w + (w_{эф0} - w)/[1 + 2w\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda]$; $w_{эф0} = 120\pi h/(Z_в\sqrt{\varepsilon_{эф0}})$; $\varepsilon_{эф}$ находится из (2.74). Критическая частота определяется из условия $\beta^{(n)} = 0$ ($n = 1, 2$):

$$n\lambda_{кр} = 2a_1\sqrt{\varepsilon_{эф}}. \qquad (2.85)$$

На рис. 2.58 сравниваются результаты расчета по (2.84) и данные экспериментального исследования [2.47]. Погрешность не превышает 3 ... 4%. На рис. 2.59 показаны результаты расчета критической частоты первой волны высшего типа волноводной модели Олинера, соответствующей МПЛ с волной типа $HE_1$.

Критическая частота первой поверхностной волны $f_{кр}$ [ГГц], связанной с границей раздела диэлектрик—воздух, определяется по формуле [2.46]

$$f_{кр} = 75/(h\sqrt{\varepsilon_r - 1}), \qquad (2.86)$$

где $h$ в миллиметрах.

**Пример 2.14.** Определить максимальную ширину полоски в МПЛ, имеющей $h = 1$ мм и заполненной поликором ($\varepsilon_r = 9{,}6$), чтобы вплоть до частоты $f = 5$ ГГц по ней не распространялись волны высшего типа. По графику (см. рис. 2.59) при $f = f_{кр} = 5$ ГГц находим для $h = 1$ мм и $\varepsilon_r = 9{,}6$ $w/h = 8{,}75$. Волны высшего типа не распространяются, когда $f < f_{кр}$, т. е. $w/h < 8{,}75$ и $w < 8{,}75$ мм.

## 2.4. ЩЕЛЕВАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Щелевая полосковая линия (ЩПЛ), поперечное и продольное сечение которой изображены на рис. 2.60, представляет собой двухпроводную полосковую линию, в которой электромагнитная волна распространяется вдоль щели между проводящими поверхностями, нанесенными на одну сторону диэлектрика. На том же рисунке изображены силовые линии электрического (сплошные) и магнитного (штриховые) полей, а также линии тока (штрих-пунктирные). Макси-

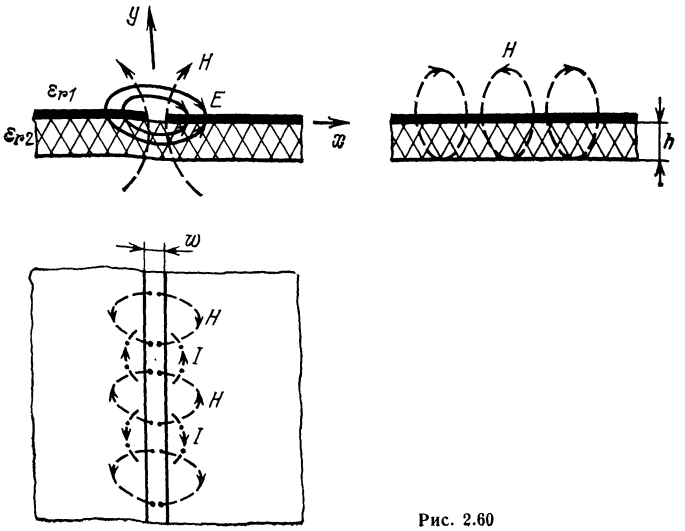



Рис. 2.60

мальное значение продольной компоненты напряженности электрического поля $E_z$ на порядок ниже минимального значения напряженности поперечной компоненты.

Все три компоненты напряженности магнитного поля сравнимы по значению. В этом смысле говорят, что основной тип волны в ЩПЛ — Н-волна. Поскольку продольные и поперечные компоненты Н сдвинуты по фазе на 90°,

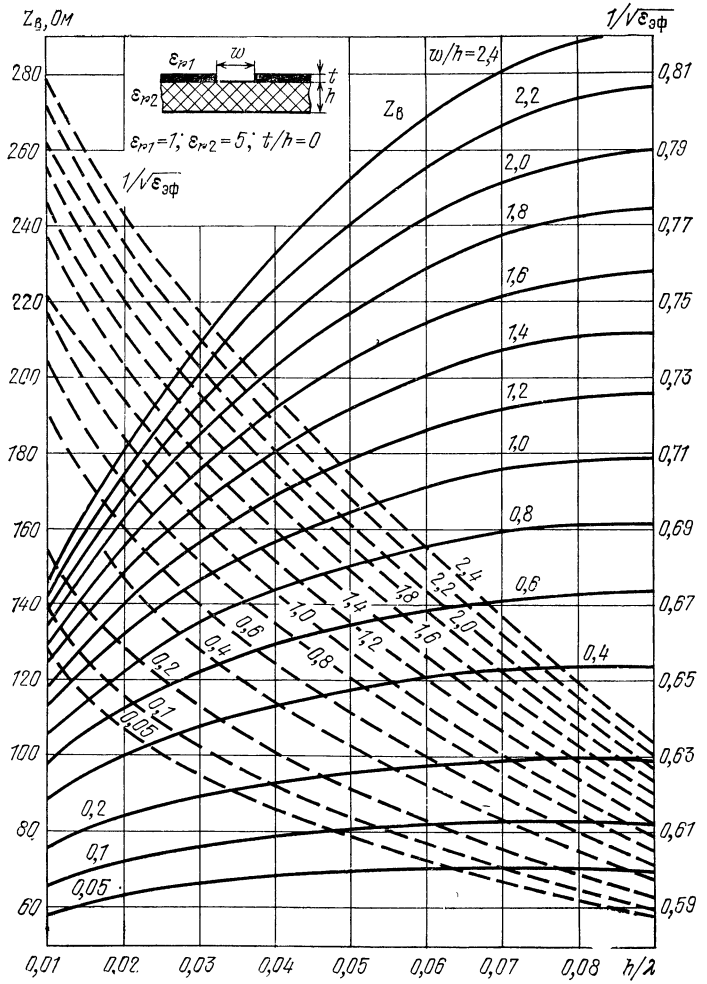



Рис. 2.61

магнитное поле в линии эллиптически поляризовано, что используется при создании невзаимных устройств с ферритовыми вкладышами. По сравнению с МПЛ в ЩПЛ: 1) более сильно проявляется дисперсия, т. е. $Z_в$ и $v_ф$ сильнее зависят от частоты; 2) выше $Z_в$ в рабочем диапазоне частот при одинаковых отношениях $w/h$; 3) удобнее монтаж навесных компонентов; 4) значительно ниже потери, так как ток в ЩПЛ рассредоточен по большей поверхности.

Расчет ЩПЛ, в отличие от МПЛ, в квазистатическом приближении невозможен, поскольку емкость между двумя металлическими полуплоскостями, образующими ЩПЛ, бесконечна. В [2.76] предложен метод расчета $Z_в$ и $n = \sqrt{\varepsilon_{эф}}$,

основанный на следующих предположениях: ни диэлектрик, ни металл не имеют омических потерь, металлические пластины бесконечно тонкие. Вместо щелевой линии рассматривается некоторый волновод, ограниченный идеально проводящими плоскостями $x = \pm a/2$ ($a \gg w$), между которыми располагается линия. Поле $E(x, y)$ в щели при $y = 0$ предполагается не зависящим от $x$. Волновое сопротивление определяется равенством $Z_в = U^2/2P$, где $U = E_x w$ в се-

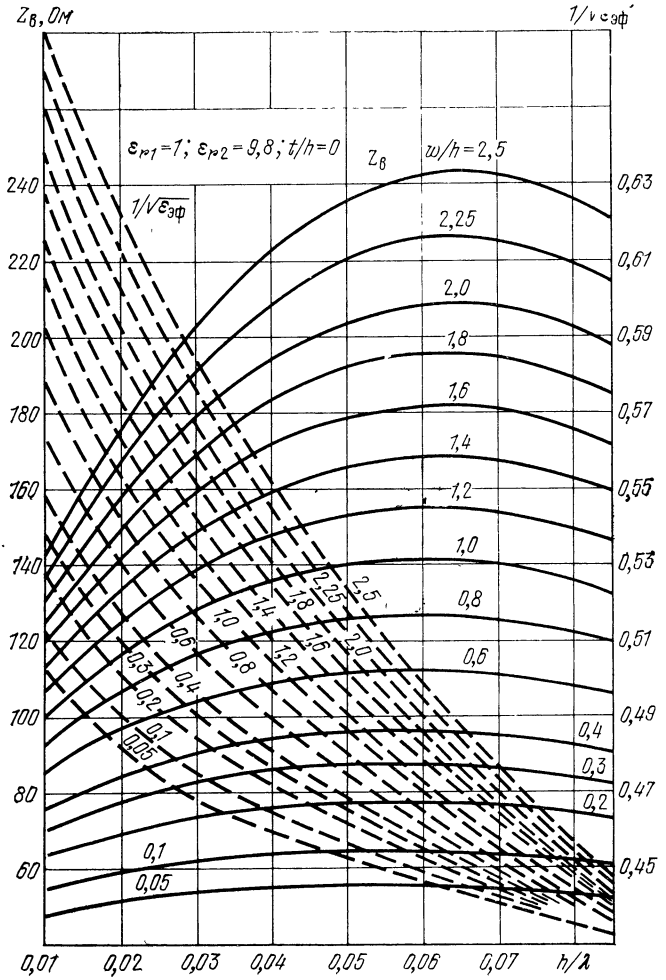



Рис. 2.62

чении $y = 0$; $P$ — мощность, переносимая волной. На рис. 2.61 и 2.62 приведены результаты расчета величин $Z_в$ и $1/n$ по формулам из [2.76]. Коэффициент замедления $n$ растет с частотой, поскольку поле все больше концентрируется в диэлектрике. Величина $Z_в$ имеет экстремум, поскольку, с одной стороны, она должна падать из-за повышения концентрации поля в диэлектрике, а с другой — должна расти от $Z_в = 0$ при $h/\lambda = 0$ (погонная емкость бесконечна), так как с ростом частоты повышается концентрация поля в зазоре. В рассмотренных случаях максимум $Z_в$ наблюдается при $\sqrt{\varepsilon_{r2}}h/\lambda \approx 0,1 \ldots 0,2$ и его положение слабо зависит от $w/h$.

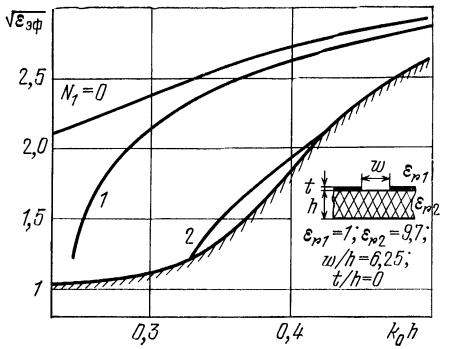
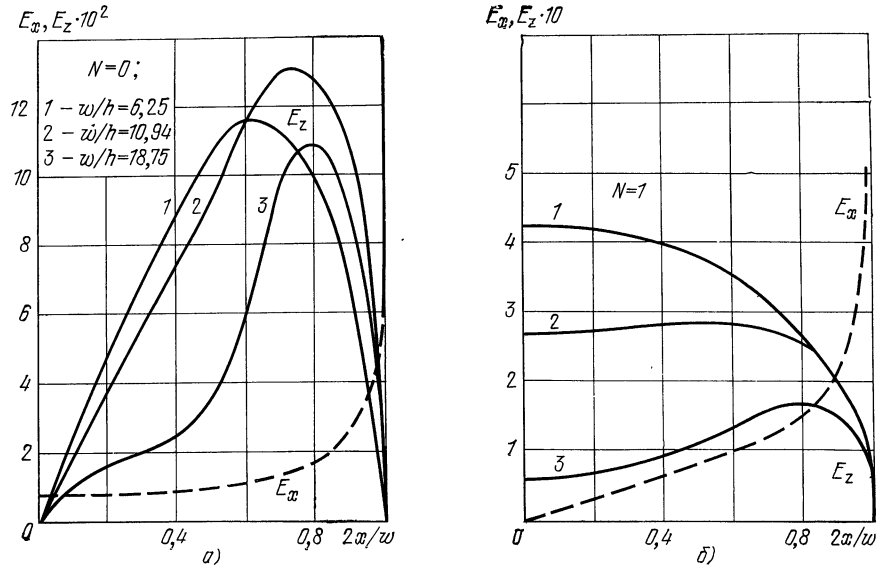



Рис. 2.63

Рис. 2.64



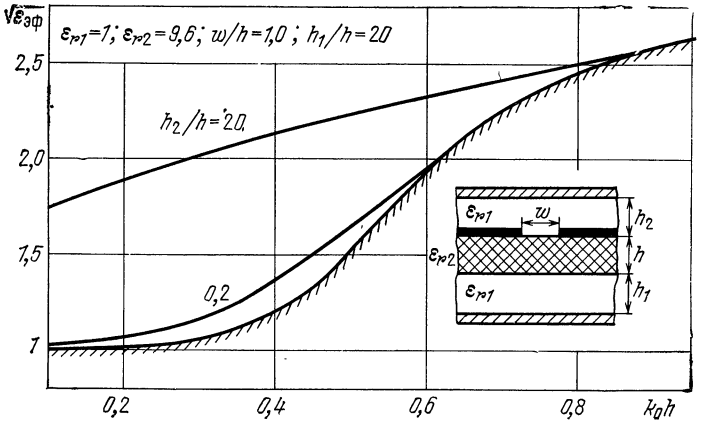




Рис. 2.65

Более полные результаты анализа щелевой линии получены в [2.9, 2.11], на основе метода интегральных уравнений [2.68]. В этих работах исследованы высшие типы волн в ЩПЛ, возникающие при ширине щели $w \gtrsim \lambda/2$, а также волны в экранированной ЩПЛ. Кривые дисперсии, соответствующие основному и высшим типам волн в ЩПЛ, нанесены на рис. 2.63, где $N_1 = 0, 1, 2$ — номер типа, сплошной линией со штриховкой нанесена дисперсионная характеристика волновода, состоящего из слоя диэлектрика толщиной $h$, покрытого с одной стороны металлом. Неизлучающимся волнам дискретного спектра соответствует область над этой кривой. Распределение продольных и поперечных компонент напряженности электрического поля по ширине щели приведено на рис. 2.64.

Основная и все волны высшего типа в ЩПЛ имеют высокочастотную отсечку, соответствующую точкам пересечения дисперсионных кривых ЩПЛ и двуслойного волновода (рис. 2.65). При $w/h \leq 2$ длина волны отсечки определяется соотношением $\lambda_{кр} \simeq 2{,}43\sqrt{\varepsilon_{r2}}\,h$. С ростом $w$ значение $\lambda_{кр}$ смещается в сторону коротких волн. Если расстояния до экранов $h_1$ и $h_2$ конечны, то при $h_2 \ll h$ наблюдается существенное смещение $\lambda_{кр}$ в сторону длинных волн. Оно определяется в основном расстоянием до верхнего экрана и слабо зависит от $h_1$. С уменьшением $h_1$, $h_2$ наряду с коротковолновой появляется длинноволновая отсечка. Когда $h_1 \to 0$, кривая дисперсии основной волны приближается к соответствующей кривой волны $LM_0$ в диэлектрическом волноводе. При $h_1 = 0$ в области замедлений $n > n_{LM_0}$ в линии не существует неизлучающихся типов волн.

## 2.5. КОПЛАНАРНАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ

Копланарная полосковая линия (КПЛ) представляет собой трехпроводную полосковую линию передачи, в которой электромагнитная волна распространяется вдоль щелей между проводящими поверхностями, находящимися

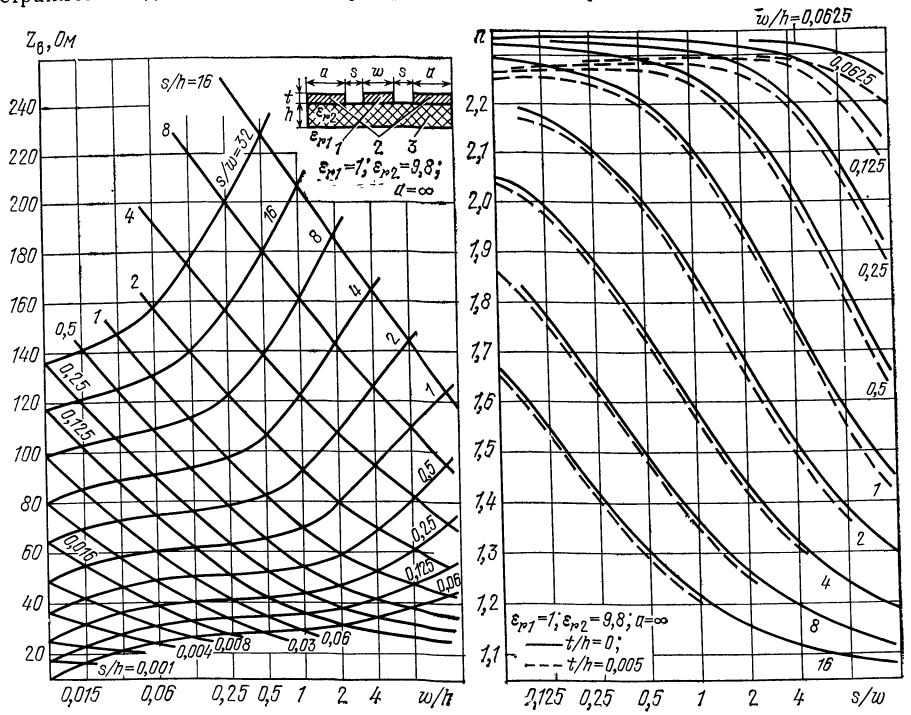



Рис. 2.66 Рис. 2.67

в одной плоскости [2.1]. На рис. 2.66 показано поперечное сечение КПЛ, где *1* — полоска; *2* — экран; *3* — подложка из диэлектрика с параметрами $\varepsilon_{r2}$, $\mu_{r2}$, $\sigma_{д2}$; окружающее пространство полностью заполнено диэлектриком с параметрами $\varepsilon_{r1}$, $\mu_{r1}$, $\sigma_{д1}$, $t/h = 0{,}005$. Токонесущие поверхности выполнены из металла проводимостью $\sigma_м$. Обычно $\varepsilon_{r2} > \varepsilon_{r1}$.

В КПЛ основной является волна квази-Т. Кроме того, в ней возможны волны высшего типа, которые присущи ЩПЛ (см. § 2.4) и которые становятся излучающимися (трансформируются в волну диэлектрического волновода), если

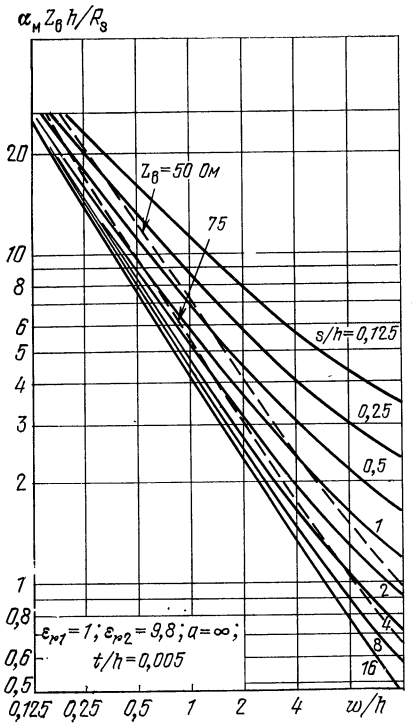



Рис. 2.68

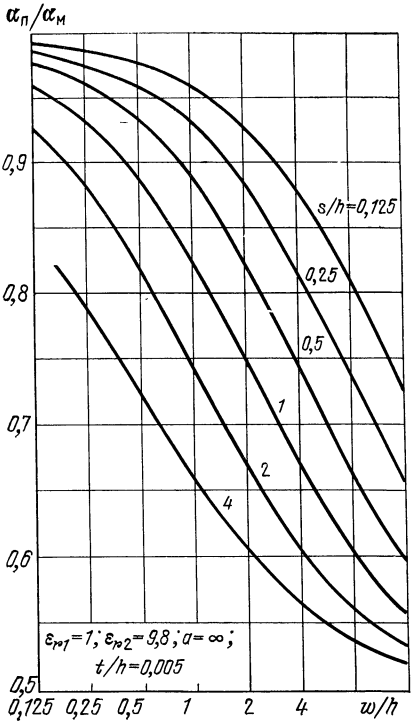



Рис. 2.69

свободную поверхность диэлектрика металлизировать. Справочные данные для широко применяемой линии без экрана получены в квазистатическом приближении и справедливы при $\lambda > 8\sqrt{\varepsilon_{r2}}\,h$ и $\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_{r2}}\,s$, т. е. когда влияние дисперсии мало.

При $\varepsilon_{r1} = 1$, $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$, $\varepsilon_{r2} = \varepsilon_r$, $t/h = 0$, $a = \infty$ $Z_в$ определяется из следующей приближенной формулы, полученной в предположении бесконечно толстой подложки [2.10]:

$$Z_в\sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2} \approx 30\pi/K_1(k), \qquad (2.87)$$

где $k = (1 + 2s/w)^{-1}$.

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов, полученных по (2.87), показало [2.10], что при $\varepsilon_r > 9$ и $h > s$ толщина подложки практически не влияет на характеристики КПЛ, и рекомендуется выбирать $h > 2s$ [2.10]. При тех же условиях, но когда $a \neq \infty$ [2.48],

$$Z_в\sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2} = 60\pi/K_1(k); \qquad (2.88)$$

$k$ определяется из выражения

$$\sqrt{1-k^2}=r\,|\sqrt{r^2-p^2}-\sqrt{r^2-q^2}\,|/(p\sqrt{r^2-q^2}+q\sqrt{r^2-p^2}),$$

где $2r=(w/2+s+a)^2$, $q=(w/2+s)-r$, $p=w^2/4-r$.
Уменьшение ширины экранирующих полосок приводит к возрастанию $Z_в$; например, при $\varepsilon_r=6$ и изменении $a$ от $\infty$ до $w$ величина $Z_в$ возрастает на $\approx 10\%$. В рассматриваемом приближении ($\varepsilon_{r1}/\varepsilon_{r2}>9$, $h\geqslant 2s$) $n^2=\varepsilon_{эф0}$ определяется по формуле [2.10]

$$n^2=\varepsilon_{эф0}=(\varepsilon_{r1}+\varepsilon_{r2})/2.$$

Основные характеристики КПЛ, рассчитанные при $\mu_{r1}=\mu_{r2}=1$ методом интегральных уравнений [2.68], представлены на рис. 2.66—2.69. При $t/h=0$ коэффициент $n$ стремится к $\sqrt{(\varepsilon_{r2}+1)/2}$, если $s/w\to 0$ и $w/h\to 0$. При

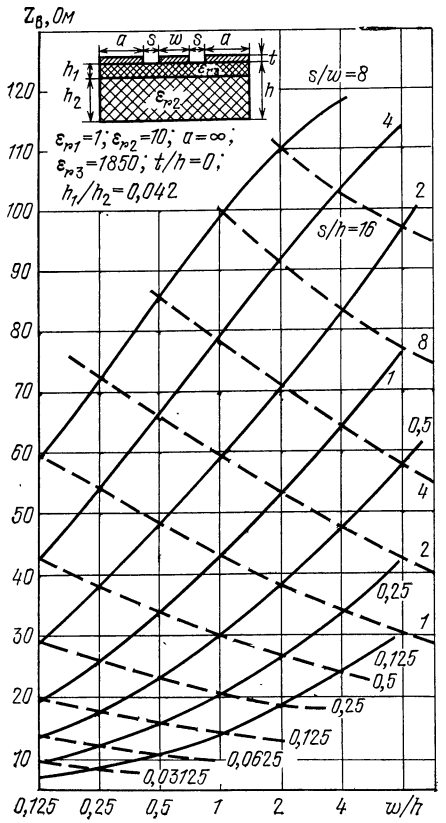



Рис. 2.70

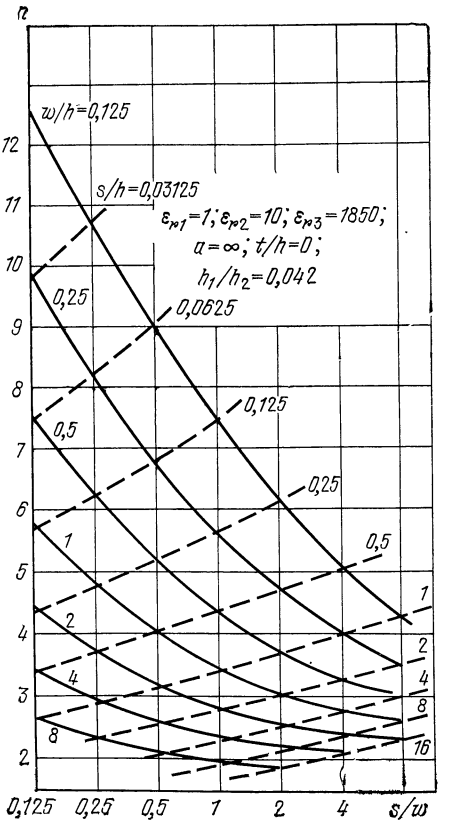



Рис. 2.71

$t/h\neq 0$ и малых $w/h$ зависимость коэффициента замедления $n$ от $s/w$ имеет экстремум (см. рис. 2.67), не превышающий $\sqrt{(\varepsilon_{r2}+1)/2}$. Подобный ход графика объясняется тем, что торцевые поверхности полоски и экрана находятся в воздухе, поэтому при $t/h\neq 0$ увеличивается концентрация энергии между торцевыми поверхностями проводников. Соответственно доля энергии в диэлектрике подложки уменьшается, что и приводит к уменьшению $n$. На рис. 2.68 показана зависимость $\alpha_м Z_в h/R_s$ от размеров линии. На рис. 2.69 показана зависимость

отношения потерь в полоске к общим потерям в металлических проводниках от размеров КПЛ. При сравнительно узких полосках и малых зазорах основная доля потерь обусловлена потерями в полоске КПЛ.

На рис. 2.70, 2.71 приведены расчетные зависимости $Z_в$ и $n$ для КПЛ на слоистой подложке. Верхний слой имеет большую диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{r3}$ и малую толщину (например, тонкий слой сегнетоэлектрика [2.62]), нижний слой более толстый и $\varepsilon_{r2} \ll \varepsilon_{r3}$. При $\varepsilon_{r2} = 9{,}8$, $w/h < 0{,}25$ и $s/w < 2$ погрешность определения замедления как $\sqrt{(\varepsilon_{r2}+1)/2}$ не превышает 2%, если только толщина полоски равна нулю. Такая же погрешность получается при расчетах по формулам (2.87)—(2.90). Более точный анализ, основанный на строгом решении электродинамической задачи[1], при $w/h \to 0$ и $s/w < 1$ приводит к результату

$$\varepsilon_{эф} = \varepsilon_{эф0} - |p| + \sqrt{p^2 + (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})^2/4}, \tag{2.89}$$

где $p = M/[k_1(w+2s)]^2$; $k_1 = 2\pi\sqrt{\varepsilon_{r1}}/\lambda$;

$M = \ln[(1 - \sqrt{(w+s)/(w+2s)})/128]$. Обычно $|p| \gg 1$, тогда

$$\varepsilon_{эф} \approx \varepsilon_{эф0} + (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})^2 [k_1(w+2s)]^2/8|M|. \tag{2.90}$$

Наличие второго слагаемого в (2.90) и величины $p$ в (2.89) связано с дисперсией в КПЛ. При $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2}$, когда КПЛ вырождается в плоскую двухпроводную линию, $\varepsilon_{эф} = \varepsilon_{эф0}$ и дисперсия исчезает. С другой стороны, чем больше разность $|\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}|$, тем существенней влияние дисперсии.

## 2.6. СВЯЗАННЫЕ ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ

### ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Волны в линии, содержащей две и более полосок, описываются телеграфными уравнениями (2.1) и матрицей проводимости (2.14). Наиболее часто используются связанные линии из двух одинаковых полосок с плоскостью (рис. 2.72) или осью (2.73) симметрии, матрицы частичных емкостей которых имеют структуру

$$[C_\varepsilon] = \begin{bmatrix} C^\varepsilon_{11} & -C^\varepsilon_{12} \\ -C^\varepsilon_{12} & C^\varepsilon_{11} \end{bmatrix}; \quad [C_{1/\mu}[ = \begin{bmatrix} C^\mu_{11} & -C^\mu_{12} \\ -C^\mu_{12} & C^\mu_{11} \end{bmatrix}. \tag{2.91}$$

В этих линиях нормальными волнами являются четная ($U_1 = U_2$) и нечетная ($U_1 = -U_2$). Волновое сопротивление $Z_{вe}$ четной волны и ее коэффициент замедления $n_e$ выражаются через частичные емкости:

$$Z_{вe}\,[Ом] = 120\pi/\sqrt{(C^\varepsilon_{11} - C^\varepsilon_{12})(C^\mu_{11} - C^\mu_{12})}; \tag{2.92}$$

$$n_e = \sqrt{(C^\varepsilon_{11} - C^\varepsilon_{12})/(C^\mu_{11} - C^\mu_{12})}. \tag{2.93}$$

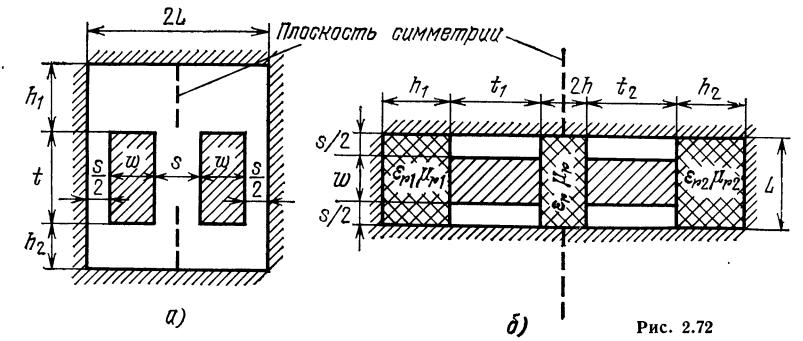



Рис. 2.72

[1] Результат получен В. И. Вольманом, М. Ю. Гайстером и П. Цесликом.

Волновое сопротивление нечетной волны $Z_{во}$ и ее коэффициент замедления $n_0$ описываются теми же формулами, если везде знаки минус заменить на плюс и букву *e* на букву *o*. Величины, характеризующие четную волну, снабжены нижним индексом *e* (even), а нечетную — *o* (odd), верхний индекс ε — диэлектрическая проницаемость среды и подложки.

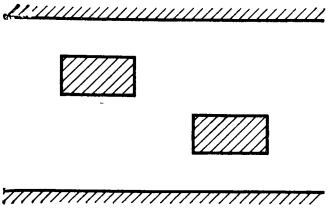


Рис. 2.73

В табл. 2.9 приведены значения краевых емкостей, полученных методом конформных отображений [2.72—2.74], для пяти областей, изображенных на рис. 2.74. На рисунке штриховой линией обозначены магнитные стенки, а сплошной линией со штриховкой — электрические. Краевая емкость определена как разность полной емкости между экраном шириной $L$ и полоской шириной $w$ и емкости, вычисляемой по формуле для плоского конденсатора с расстоянием между обкладками $s/2$ при условии, что размеры полоски и экрана в направлении

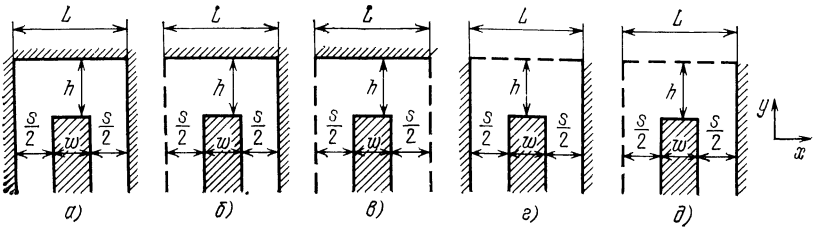



Рис. 2.74

$y$ стремятся к бесконечности. В таблицах использованы обозначения $\nu = s/L$ и $\eta = 2h/L$, и по ним можно рассчитывать частичные емкости, коэффициенты замедления и волновые сопротивления различных линий передачи. Рассмотрим ряд примеров.

**Пример 2.15.** Определить $Z_в$ линии (рис. 2.75, *а*) при $t/s = 1$; $\nu = 0{,}5$; $\eta_1 = 2h_1/L = 2$; $\eta_2 = 2h_2/L = 1$. По табл. 2.9 для $C_a$, полагая $\eta = \eta_1$, находим $C_{a1} = 2{,}104$, а при $\eta = \eta_2$ $C_{a2} = 2{,}272$. Для области шириной $s/2$ емкость находим по формуле плоского конденсатора: $C_1 = 4t/s + C_{a1} + C_{a2} = 8{,}376$. Согласно (2.6) $Z_в = 45$ Ом.

Погрешность расчета емкостей максимальна при ширине полоски $w = 0$, т. е. $\nu = s/L = 1$, и убывает с ростом $t$. Так, при $t/s$, равных 1,5; 1 и 0,5, она не превышает 0,8; 3,8 и 16,8% соответственно. При $\eta > 8$ краевая емкость практически не зависит от $\eta$. Поэтому значения $h$ могут быть сколь угодно большими.

**Пример 2.16.** Определить $Z_в$ и $n$ для линии на (рис. 2.75, *б*), имеющей те же размеры, что в примере 2.15, но расположенной на подложке высотой $h_2$ с $\varepsilon_r = 14$, $\mu_r = 0{,}8$. Полагаем, что проницаемость $\varepsilon_r$ влияет только на $C_{a2}$, которая возрастает в $\varepsilon_r$ раз. Тогда $C_\varepsilon = (4t/s) + C_{a1} + \varepsilon_r C_{a2} = 37{,}9$; $C_{1/\mu} = (4t/s) + C_{a1} + (1/\mu_r)\, C_{a2} = 8{,}94$. Согласно (2.9) и (2.12) $Z_в \simeq 20{,}5$ Ом и $n = \sqrt{\varepsilon_{эф}} \approx 2{,}11$.

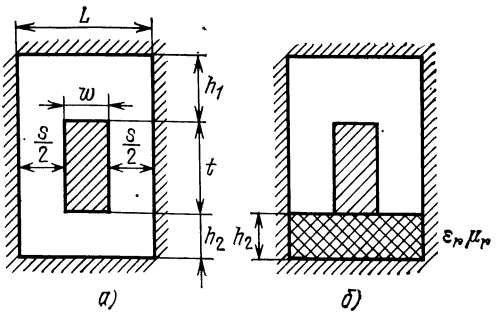



Рис. 2.75

**Пример 2.17.** Определить $Z_{ве}$ и $Z_{во}$ линии (см. рис. 2.72, *а*) при

Таблица 2.9

**Краевые емкости для областей, изображенных на рис. 2.74**

| $\nu$ | $C$ для $\eta$, равного | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2 | 4 | 8 |
| | | | | $C_а$ | | | | |
| 0,1 | 15,52 | 8,60 | 5,52 | 4,44 | 4,24 | 4,20 | 4,20 | 4,20 |
| 0,2 | 14,00 | 7,52 | 4,60 | 3,536 | 3,360 | 3,324 | 3,312 | 3,312 |
| 0,3 | 12,60 | 6,62 | 4,00 | 2,996 | 2,828 | 2,796 | 2,788 | 2,788 |
| 0,4 | 11,16 | 6,00 | 3,536 | 2,600 | 2,444 | 2,412 | 2,404 | 2,404 |
| 0,5 | 9,76 | 5,28 | 3,116 | 2,272 | 2,132 | 2,104 | 2,100 | 2,096 |
| 0,55 | 9,04 | 4,92 | 2,920 | 2,128 | 1,996 | 1,972 | 1,964 | 1,964 |
| 0,60 | 8,32 | 4,56 | 2,728 | 1,992 | 1,808 | 1,844 | 1,836 | 1,836 |
| 0,65 | 7,56 | 4,24 | 2,544 | 1,860 | 1,748 | 1,724 | 1,716 | 1,716 |
| 0,70 | 6,84 | 3,880 | 2,360 | 1,736 | 1,628 | 1,609 | 1,604 | 1,604 |
| 0,75 | 6,12 | 3,528 | 2,176 | 1,612 | 1,516 | 1,496 | 1,492 | 1,492 |
| 0,80 | 6,44 | 3,172 | 1,996 | 1,488 | 1,404 | 1,388 | 1,384 | 1,384 |
| 0,85 | — | — | — | 1,368 | 1,292 | 1,276 | 1,272 | 1,272 |
| | | | | $C_б$ | | | | |
| 0,1 | 15,58 | 8,26 | 4,76 | 3,22 | 2,80 | 2,66 | 2,54 | 2,54 |
| 0,2 | 14,36 | 7,58 | 4,26 | 2,76 | 2,36 | 2,20 | 2,10 | 2,10 |
| 0,3 | 13,10 | 6,98 | 3,90 | 2,48 | 2,08 | 1,944 | 1,840 | 1,834 |
| 0,4 | 11,78 | 6,36 | 3,58 | 2,26 | 1,888 | 1,748 | 1,648 | 1,644 |
| 0,5 | 10,40 | 5,74 | 3,28 | 2,06 | 1,722 | 1,590 | 1,494 | 1,490 |
| 0,55 | 9,70 | 5,42 | 3,12 | 1,976 | 1,648 | 1,520 | 1,428 | 1,424 |
| 0,60 | 9,00 | 5,10 | 2,98 | 1,882 | 1,576 | 1,452 | 1,364 | 1,360 |
| 0,65 | 8,28 | 4,78 | 2,82 | 1,808 | 1,508 | 1,390 | 1,304 | 1,300 |
| 0,70 | 7,56 | 4,44 | 2,68 | 1,726 | 1,442 | 1,330 | 1,246 | 1,242 |
| 0,75 | 6,84 | 4,12 | 2,52 | 1,644 | 1,376 | 1,270 | 1,190 | 1,188 |
| 0,80 | 6,10 | 3,78 | 2,36 | 1,562 | 1,312 | 1,210 | 1,136 | 1,132 |
| 0,85 | — | — | — | 1,480 | 1,246 | 1,152 | 1,080 | 1,078 |
| | | | | $C_в$ | | | | |
| 0,1 | 15,63 | 7,90 | 3,975 | 1,994 | 1,330 | 0,9984 | 0,4996 | 0,2499 |
| 0,2 | 14,75 | 7,627 | 3,901 | 1,975 | 1,332 | 0,9936 | 0,4984 | 0,2496 |
| 0,3 | 13,62 | 7,229 | 3,783 | 1,943 | 1,308 | 0,9857 | 0,4964 | 0,2491 |
| 0,4 | 12,37 | 6,746 | 3,628 | 1,900 | 1,288 | 0,9745 | 0,4935 | 0,2484 |
| 0,5 | 11,51 | 6,205 | 3,441 | 1,846 | 1,263 | 0,9600 | 0,4898 | 0,2474 |
| 0,55 | 10,37 | 5,918 | 3,338 | 1,815 | 1,249 | 0,9515 | 0,4876 | 0,2468 |
| 0,60 | 9,68 | 5,622 | 3,229 | 1,781 | 1,232 | 0,9422 | 0,4851 | 0,2462 |
| 0,65 | 8,98 | 5,320 | 3,115 | 1,745 | 1,215 | 0,9319 | 0,4824 | 0,2455 |
| 0,70 | 8,27 | 5,010 | 2,996 | 1,706 | 1,196 | 0,9207 | 0,4794 | 0,2447 |
| 0,75 | 7,56 | 4,695 | 2,873 | 1,665 | 1,176 | 0,9085 | 0,4760 | 0,2439 |
| 0,80 | 6,84 | 4,374 | 2,746 | 1,620 | 1,153 | 0,8951 | 0,4723 | 0,2429 |
| 0,85 | 6,12 | 4,050 | 2,610 | 1,573 | 1,129 | 0,8804 | 0,4682 | 0,2418 |
| | | | | $C_г$ | | | | |
| 0,10 | 1,6728 | 2,4724 | 3,3208 | 3,9940 | 4,160 | 4,192 | 4,204 | 4,204 |
| 0,20 | 1,0152 | 1,6728 | 2,4612 | 3,1108 | 3,2704 | 3,3048 | 3,3136 | 3,3140 |
| 0,30 | 0,7256 | 1,2652 | 1,9796 | 2,5932 | 2,7452 | 2,7780 | 2,7804 | 2,7864 |
| 0,40 | 0,5640 | 1,0152 | 1,6560 | 2,2240 | 2,3666 | 2,3960 | 2,4040 | 2,4064 |
| 0,50 | 0,4608 | 0,8464 | 1,4184 | 1,9344 | 2,0632 | 2,0908 | 2,0980 | 2,0980 |

| ν | C для η, равного | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2 | 4 | 8 |
| 0,55 | 0,4220 | 0,7812 | 1,3208 | 1,8084 | 1,9304 | 1,9564 | 1,9632 | 1,9632 |
| 0,60 | 0,3892 | 0,7252 | 1,2328 | 1,6916 | 1,8064 | 1,8308 | 1,8372 | 1,8372 |
| 0,65 | 0,3612 | 0,6760 | 1,1540 | 1,5824 | 1,6888 | 1,7116 | 1,7176 | 1,7176 |
| 0,70 | 0,3368 | 0,6328 | 1,0808 | 1,4780 | 1,5764 | 1,5976 | 1,6032 | 1,6032 |
| 0,75 | 0,3156 | 0,5940 | 1,0124 | 1,3776 | 1,4676 | 1,4868 | 1,4916 | 1,4916 |
| 0,80 | 0,2968 | 0,5584 | 0,9472 | 1,2788 | 1,3604 | 1,3776 | 1,3820 | 1,3824 |
| 0,85 | | | | 1,1804 | 1,2528 | 1,2684 | 1,2724 | 1,2724 |
| | $C_д$ | | | | | | | |
| 0,10 | 0,8364 | 1,2362 | 1,3308 | 2,098 | 2,322 | 2,438 | 2,538 | 2,542 |
| 0,20 | 0,5076 | 0,8364 | 1,2302 | 1,6600 | 1,881 | 1,9946 | 2,094 | 2,098 |
| 0,30 | 0,3628 | 0,6326 | 0,9964 | 1,406 | 1,6224 | 1,7336 | 1,830 | 1,8346 |
| 0,40 | 0,2820 | 0,5076 | 0,8364 | 1,2282 | 1,4384 | 1,5458 | 1,639 | 1,6434 |
| 0,50 | 0,2304 | 0,4234 | 0,7206 | 1,0924 | 1,2944 | 1,3979 | 1,4862 | 1,4904 |
| 0,55 | 0,2110 | 0,3908 | 0,6736 | 1,035 | 1,2322 | 1,3324 | 1,4188 | 1,4230 |
| 0,60 | 0,1946 | 0,3628 | 0,6324 | 0,9830 | 1,1748 | 1,2722 | 1,356 | 1,3598 |
| 0,65 | 0,1806 | 0,3386 | 0,5958 | 0,9352 | 1,1212 | 1,2154 | 1,2964 | 1,3000 |
| 0,70 | 0,1684 | 0,3174 | 0,5630 | 0,8908 | 1,0708 | 1,1614 | 1,2392 | 1,2428 |
| 0,75 | 0,1578 | 0,2984 | 0,5336 | 0,8492 | 1,0224 | 1,0894 | 1,1836 | 1,1872 |
| 0,80 | 0,1486 | 0,2820 | 0,5068 | 0,8096 | 0,9754 | 1,0584 | 1,1290 | 1,1324 |
| 0,85 | | | | 0,7712 | 0,9290 | 1,0076 | 1,0744 | 1,0774 |

$\nu = s/L = 0{,}5$; $t/s = 1$; $\eta_1 = 2h_1/L = 2$; $\eta_2 = 2h_2/L = 1$. Нечетной волне соответствует электрическая стенка в плоскости симметрии: по табл. 2.9 находим $C_{а1} = 2{,}104$ и $C_{а2} = 2{,}272$. Четной волне соответствуют магнитная стенка в плоскости симметрии и емкости $C_{б1} = 1{,}159$ и $C_{б2} = 2{,}06$. В результате $C_e = 2\,(t/s) + C_{б1} + C_{б2} = 5{,}65$ и $C_o = 4\,(t/s) + C_{а1} + C_{а2} = 8{,}38$. В соответствии с (2.6) $Z_{вe} = 66{,}7$ Ом и $Z_{вo} = 45$ Ом. Таблица 2.9 позволяет рассчитывать линию, изображенную на рис. 2.72, *а*, при сколь угодно больших значениях $\eta_1$ или $\eta_2$, поскольку краевая емкость $C_а$ практически не зависит от $\eta$ при $\eta \geqslant 8$.

**Пример 2.18.** Определить $Z_{вe}$, $Z_{вo}$, $n_e$ и $n_o$ для линии, рассмотренной в примере 2.17, но в которой область высотой $h_2$ заполнена средой с $\varepsilon_r = 14$ и $\mu_r = 0{,}8$. Имеем:

$$C_{\varepsilon e} = (2t/s) + C_{б1} + \varepsilon_r C_{б2} = 32{,}4; \quad C_{\varepsilon 0} = (4t/s) + C_{а1} + \varepsilon_r C_{а2} = 37{,}9;$$

$$C_{1/\mu e} = (2t/s) + C_{б1} + (1/\mu_r) C_{б2} = 6{,}17; \quad C_{1/\mu 0} = (4t/s) + C_{а1} + (1/\mu_r) C_{а2} = 8{,}94.$$

В соответствии с (2.9) $Z_{вe} \approx 26{,}7$ Ом; $Z_{вo} \approx 20{,}5$ Ом, а согласно (2.12) $n_e \approx 2{,}3$; $n_o \approx 2{,}11$.

Линия, изображенная на рис. 2.72, *б*, в общем случае не содержит плоскости симметрии между полосками. Поэтому для нее лишены физического смысла понятия четной и нечетной волн. При расчете следует пользоваться общими соотношениями (2.1) и (2.14), в которые входят матрицы (2.3) и (2.8) при $N = 2$. Пусть области с размерами $h_1$, $h_2$ и $2h$ заполнены средами с $\varepsilon_{r1}$, $\mu_{r1}$, $\varepsilon_{r2}$, $\mu_{r2}$ и $\varepsilon_r$, $\mu_r$ соответственно. Элементы матрицы $[C_\varepsilon]$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} C^{\varepsilon}_{11} &= (4t_1/s) + \varepsilon_{r1} C_{а1} + \varepsilon_r (C_а + C_г)/2; \\ C^{\varepsilon}_{22} &= (4t_2/s) + \varepsilon_{r2} C_{а2} + \varepsilon_r (C_а + C_г)/2; \\ C^{\varepsilon}_{12} &= \varepsilon_r (C_а - C_г)/2, \end{aligned} \tag{2.94}$$

в которых индексами 1 и 2 при $C_а$ отмечены краевые емкости в областях с размерами $h_1$ и $h_2$. Емкости $C_а$ и $C_г$ без численных индексов определены для области с размером $2h$. Элементы матрицы $[\mathbf{C}_{1/\mu}]$ вычисляются по формулам (2.94), если $\varepsilon_{r1}$, $\varepsilon_{r2}$ и $\varepsilon_r$ заменить соответственно на $1/\mu_{r1}$; $1/\mu_{r2}$ и $1/\mu_r$.

**Пример 2.19.** Определить $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ и $[\mathbf{C}_{1/\mu}]$ для линии на рис. 2.72, *б* при $\varepsilon_{r1} = 14$; $\mu_{r1} = 0{,}8$; $\varepsilon_{r2} = 9{,}8$; $\mu_{r2} = 1$; $\varepsilon_r = 1$; $\mu_r = 1$; $\nu = s/L = 0{,}5$; $\eta_1 = 2h_1/L = 1$; $\eta_2 = 2h_2/L = 0{,}5$; $t_1/s = 1$; $t_2/s = 1{,}5$. По табл. 2.9 находим $C_{а1} = 2{,}272$; $C_{а2} = 2{,}104$; $C_а = 3{,}116$; $C_г = 1{,}42$. Согласно (2.94)

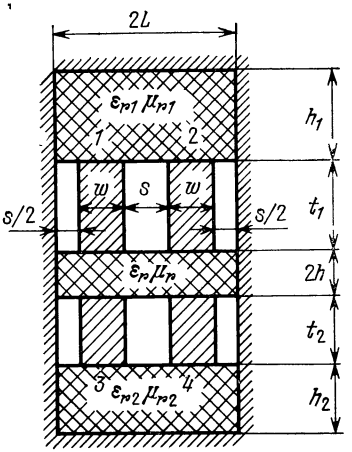



Рис. 2.76

$$[\mathbf{C}_\varepsilon] = \begin{bmatrix} 37{,}08 & -0{,}85 \\ -0{,}85 & 28{,}90 \end{bmatrix};$$

$$[\mathbf{C}_{1/\mu}] = \begin{bmatrix} 9{,}11 & -0{,}85 \\ -0{,}85 & 10{,}54 \end{bmatrix}.$$

**Пример 2.20.** Определить $Z_{вe}$, $Z_{вo}$, $n_e$ и $n_o$ для линии на рис. 2.72, *б* для случая, когда между полосками имеется плоскость симметрии, при следующих параметрах: $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1$; $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$; $\varepsilon_r = 14$; $\mu_r = 0{,}8$; $\nu = s/L = 0{,}5$; $\eta = 2h/L = 0{,}5$; $\eta_1 = \eta_2 = 2h_1/L = 2h_2/L = 1$; $t_1/s = t_2/s = 1$. В соответствии с табл. 2.9 $C_{а1} = C_{а2} = 2{,}272$; $C_а = 3{,}116$; $C_г = 1{,}42$. Согласно (2.94) $C^\varepsilon_{11} = C^\varepsilon_{22} = 38{,}50$; $C^\varepsilon_{12} = C^\varepsilon_{21} = -11{,}90$; $C^\mu_{11} = C^\mu_{22} = 9{,}56$ и $C^\mu_{12} = C^\mu_{21} = -1{,}06$. Подставляя частичные емкости в (2.92) и (2.93), находим $Z_{вo} = 16{,}2$ Ом; $Z_{вe} = 25{,}1$ Ом; $n_o = 2{,}2$; $n_e = 3{,}1$.

По формулам (2.94) можно рассчитать линию и при $h_1 = h_2 = \infty$, полагая $\eta_1 = \eta_2 = 8$, ибо при $\eta > 8$ краевые емкости практически не зависят от $\eta$.

Для линии, изображенной на рис. 2.76, матрица $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ описывается (2.3) при $N = 4$, где

$$\begin{aligned}
C^\varepsilon_{22} &= C^\varepsilon_{11} = 3(t_1/s) + \varepsilon_{r1}(C_{а1} + C_{б1})/2 + \varepsilon_r(C_а + C_б + C_г + C_д)/4;\\
C^\varepsilon_{44} &= C^\varepsilon_{33} = 3(t_2/s) + \varepsilon_{r2}(C_{а2} + C_{б2})/2 + \varepsilon_r(C_а + C_б + C_г + C_д)/4;\\
C^\varepsilon_{12} &= (t_1/s) + \varepsilon_{r1}(C_{а1} - C_{б1})/2 + \varepsilon_r(C_а - C_б + C_г - C_д)/4;\\
C^\varepsilon_{34} &= (t_2/s) + \varepsilon_{r2}(C_{а2} - C_{б2})/2 + \varepsilon_r(C_а - C_б + C_г - C_д)/4;\\
C^\varepsilon_{24} &= C^\varepsilon_{13} = \varepsilon_r(C_а + C_б - C_г - C_д)/4;\quad C^\varepsilon_{23} = C^\varepsilon_{14} = \varepsilon_r(-C_а + C_б + C_г - C_д)/4.
\end{aligned} \tag{2.95}$$

Элементы матрицы $[\mathbf{C}_{1/\mu}]$ получаются из (2.95) заменой $\varepsilon_r$, $\varepsilon_{r1}$ и $\varepsilon_{r2}$ соответственно на $1/\mu_r$, $1/\mu_{r1}$ и $1/\mu_{r2}$.

**Пример 2.21.** Определить матрицу $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ линии на рис. 2.76 при $\varepsilon_{r1} = 14$; $\mu_{r1} = 0{,}8$; $\varepsilon_{r2} = 9{,}8$; $\mu_{r2} = 1$; $\varepsilon_r = 1$; $\mu_r = 1$; $t_1/s = 1$; $t_2/s = 1{,}5$; $\nu = s/L = 0{,}5$; $\eta_1 = 2h_1/L = 1$; $\eta_2 = 2h_2/L = 2$; $\eta = 2h/L = 0{,}5$.

По табл. 2.9 находим $C_{а1} = 2{,}272$; $C_{а2} = 2{,}132$; $C_а = 3{,}116$; $C_{б1} = 2{,}06$; $C_{б2} = 1{,}590$; $C_б = 3{,}28$; $C_г = 1{,}42$; $C_д = 0{,}72$. Подставляя в (2.95), находим

$$[\mathbf{C}_\varepsilon] = \begin{bmatrix} 34{,}8 & -2{,}7 & -1{,}1 & -0{,}2 \\ -2{,}7 & 34{,}8 & -0{,}2 & -1{,}1 \\ -1{,}1 & -0{,}2 & 24{,}9 & -4{,}3 \\ -0{,}2 & -1{,}1 & -4{,}3 & 24{,}9 \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{C}_{1/\mu}] = \begin{bmatrix} 7{,}8 & -1{,}3 & -1{,}1 & -0{,}2 \\ -1{,}3 & 7{,}8 & -0{,}2 & -1{,}1 \\ -1{,}1 & -0{,}2 & 8{,}5 & -1{,}9 \\ -0{,}2 & -1{,}1 & -1{,}9 & 8{,}5 \end{bmatrix}.$$

Таблица 2.9 позволяет рассчитать матрицы частичных емкостей и для линий, состоящих из $N$ одинаковых полосок. Различают два типа линий. В первой из них полоски отстоят на произвольном расстоянии друг от друга и от боковых стенок экрана (рис. 2.77, *а*), а магнитодиэлектрики могут быть расположены между ними. Однако должна существовать плоскость симметрии, пересекающая все полоски. Вторая линия состоит из периодически расположенных полосок, причем крайние отстоят от боковых стенок на расстояние $s/2$, равное половине расстояния между полосками (рис. 2.77, *б*). В этом случае нет необходимости в указанной плоскости симметрии. Магнитодиэлектрик может быть расположен

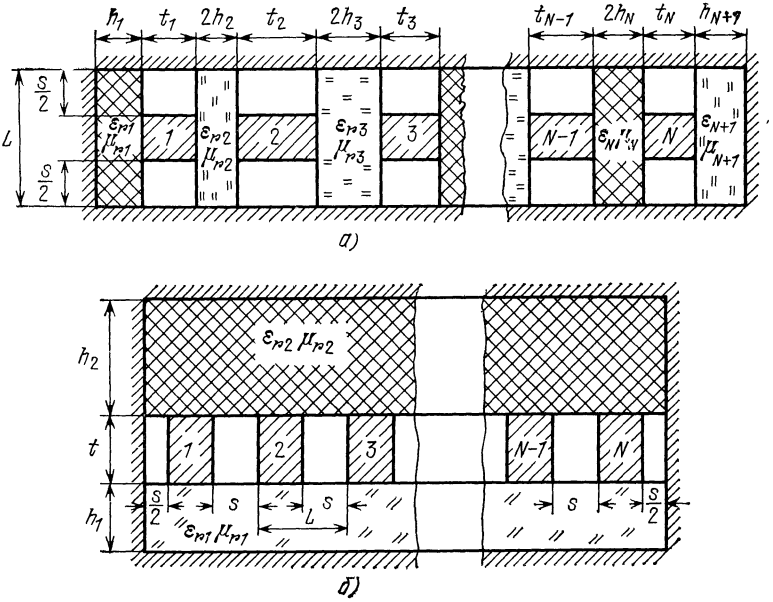



Рис. 2.77

над либо под полосками либо с обеих сторон. В матрице $[C_\varepsilon]$ достаточно сохранить элементы, соответствующие собственной емкости $C^\varepsilon_{pp}$ каждой полоски ($p=1, \ldots, N$) и взаимные емкости соседних полосок $C^\varepsilon_{p-1,\,p}$. Для линии, изображенной на рис. 2.77, *б*, целесообразно учесть емкости через одну полоску $C^\varepsilon_{p-2,\,p}$. Для линии на рис. 2.77, *а* ($C^\varepsilon_{p-2,\,p} \approx 0$)

$$C^\varepsilon_{11}=4t_1/s+\varepsilon_{r1}C_{a1}+\varepsilon_{r2}(C_{a2}+C_{r2})/2;\quad C^\varepsilon_{NN}=(4t_N/s)+\varepsilon_{rN+1}C_{aN+1}+$$
$$+\varepsilon_{rN}(C_{aN}+C_{rN})/2; \qquad (2.96)$$
$$C^\varepsilon_{pp}=(4t_p/s)+\varepsilon_{rp}(C_{ap}+C_{rp})/2+\varepsilon_{rp+1}(C_{ap+1}+C_{rp+1})/2,\ p=2, \ldots, N-1;$$
$$C^\varepsilon_{p-1,\,p}=\varepsilon_{rp}(C_{ap}-C_{rp})/2,\ p=2,\ldots,N.$$

Элементы матрицы $[C_{1/\mu}]$ вычисляются по (2.96) после замены $\varepsilon_{rp}$ на $1/\mu_{rp}$. Для линии, изображенной на рис. 2.77, *б* в силу периодичности

$$C^\varepsilon_{11}=C^\varepsilon_{NN};\ C^\varepsilon_{22}=C^\varepsilon_{N-1,\,N-1};\ C^\varepsilon_{pp}=C^\varepsilon_{qq},\ 2<p,\ q<N-1;$$
$$C^\varepsilon_{p-1,\,p}=C^\varepsilon_{q-1,\,q},\ C^\varepsilon_{p-2,\,p}=C^\varepsilon_{q-2,\,q}$$

и для всех возможных $p$ и $q$

$$C^{\varepsilon}_{11}=3\,(t/s)+\varepsilon_{r1}\,(C_{а1}+C_{б1})/2+\varepsilon_{r2}\,(C_{а2}+C_{б2})/2;$$

$$C^{\varepsilon}_{22}=2\,(t/s)+\varepsilon_{r1}\,(3C_{а1}+2C_{б1}+3C_{в1})/8+\varepsilon_{r2}\,(3C_{а2}+2C_{б2}+3C_{в2})/8;$$

$$C^{\varepsilon}_{pp}=2\,(t/s)+\varepsilon_{r1}\,(C_{а1}+2C_{б1}+C_{в1})/4+\varepsilon_{r2}\,(C_{а2}+2C_{б2}+C_{в2})/4,\ 2<p<N-1; \tag{2.97}$$

$$C^{\varepsilon}_{12}=(t/s)+\varepsilon_{r1}\,(C_{а1}-C_{в1})+\varepsilon_{r2}\,(C_{а2}-C_{в2});$$

$$C^{\varepsilon}_{13}=\varepsilon_{r1}\,(2C_{б1}-C_{а1}-C_{в1})/8+\varepsilon_{r2}\,(2C_{б2}-C_{а2}-C_{в2})/8.$$

Элементы матрицы $[C_{1/\mu}]$ вычисляются по тем же формулам (2.97) после замены величин $\varepsilon_{rp}$ соответствующими значениями $1/\mu_{rp}$.

Таблица 2.9 позволяет рассчитать матрицы частичных емкостей для линий, содержащих два и более рядов по $N$ полосок (рис. 2.78). Линия на рис. 2.78, *а*

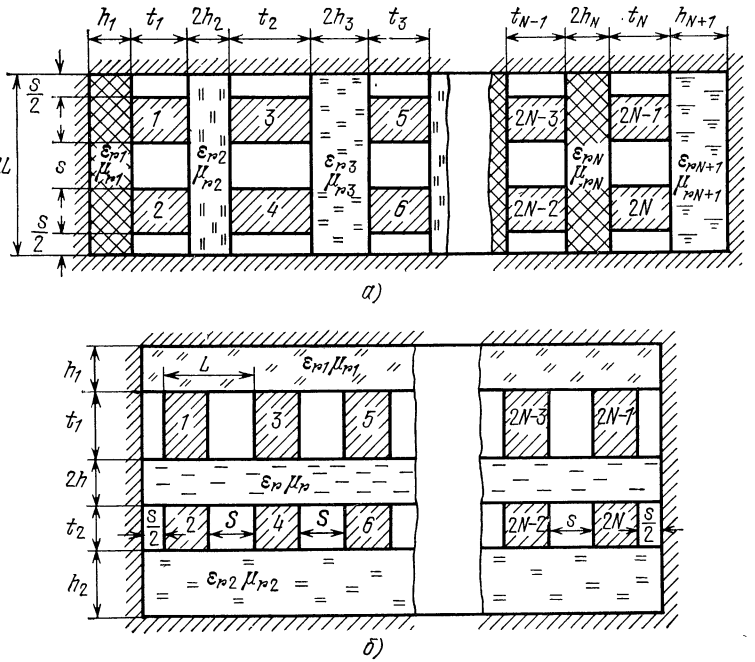



Рис. 2.78

имеет плоскость симметрии между двумя рядами полосок, а расстояние между рядами вдвое больше, чем расстояние от каждого ряда до экрана. Для такой линии учитываем емкости только между соседними полосками:

$$C^{\varepsilon}_{11}=C^{\varepsilon}_{22}=3\,(t_1/s)+(C_{а1}+C_{б1})/2+(C_{а2}+C_{б2}+C_{г2}+C_{д2})/4;$$

$$C^{\varepsilon}_{2N-1,\,2N-1}=C^{\varepsilon}_{2N,\,2N}=3\,(t_N/s)+\varepsilon_{rN+1}\,(C_{аN+1}+C_{бN+1})/2+$$
$$+\varepsilon_{rN}\,(C_{аN}+C_{бN}+C_{гN}+C_{дN})/4;$$

$$C^{\varepsilon}_{12}=(t_1/s)+\varepsilon_{r1}\,(C_{а1}-C_{б1})/2+\varepsilon_{r2}\,(C_{а2}-C_{б2}+C_{г2}-C_{д2})/4;$$

$$C^{\varepsilon}_{2N-1,\,2N}=(t_N/s)+\varepsilon_{rN+1}(C_{\text{а}N+1}-C_{\text{б}N+1})/2+\varepsilon_{rN}(C_{\text{а}N}-C_{\text{б}N}+$$
$$+C_{\text{г}N}-C_{\text{д}N})/4; \qquad (2.98)$$

$$C^{\varepsilon}_{2q,\,2q}=C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q-1}=3\,(t_q/s)+(\varepsilon_{rq}/4)\,(C_{\text{а}q}+C_{\text{б}q}+C_{\text{г}q}+C_{\text{д}q})+$$
$$+\varepsilon_{rq+1}(C_{\text{а}q+1}+C_{\text{б}q+1}+C_{\text{г}q+1}+C_{\text{д}q+1}),\quad q=2,\ \ldots,N-1;$$

$$C^{\varepsilon}_{2q,\,2(q+1)}=C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q-1}=(\varepsilon_{rq+1}/4)\,(C_{\text{а}q+1}+C_{\text{б}q+1}-C_{\text{г}q+1}+C_{\text{д}q+1}),$$
$$q=1,\ \ldots,N-1;$$

$$C^{\varepsilon}_{2q,\,2q+1}=C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2(q+1)}=(\varepsilon_{rq+1}/4)\,(-C_{\text{а}q+1}+C_{\text{б}q+1}+C_{\text{г}q+1}-C_{\text{д}q+1}),$$
$$q=1,\ \ldots,N-1;$$

$$C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q}=(t_q/s)+(\varepsilon_{rq}/4)\,(C_{\text{а}q}-C_{\text{б}q}+C_{\text{г}q}-C_{\text{д}q})+$$
$$+(\varepsilon_{rq+1}/4)\,(C_{\text{а}q+1}-C_{\text{б}q+1}+C_{\text{г}q+1}-C_{\text{д}q+1}),\quad q=1,\ \ldots,N.$$

Остальные элементы матрицы $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ равны нулю. Здесь номер $q$ соответствует номеру, стоящему при $h_q$, $t_q$, $\varepsilon_{rq}$ и $\mu_{rq}$. Для вычисления $[\mathbf{C}_{1/\mu}]$ достаточно заменить $\varepsilon_{rq}$ на $1/\mu_{rq}$.

Линия, изображенная на рис. 2.78, *б*, содержит $N$ периодов, в каждом из которых имеется по две полоски с номерами $2q+1$ и $2q+2$, $q=0,\ldots,N-1$. Слои магнитодиэлектрика параллельны рядам полосок. Элементы матрицы $[\mathbf{C}_\varepsilon]$ удовлетворяют соотношению

$$C^{\varepsilon}_{2q+\alpha_1,\,2p+\alpha_2}=C_{2(N-q-1)+\alpha_1,\,2(N-p-1)+\alpha_2},$$

где $\alpha_1=1;\,2$; $\alpha_2=1;\,2$. Учитываем лишь частичные емкости соседних полосок и отстоящих через одну. Поэтому емкости одинаковы для всех полосок в середине линии $(1<q<N-2)$ и несколько отличны для крайних ($q=0,1$; $N-2$, $N-1$). При этом достаточно вычислить следующие элементы матрицы $[\mathbf{C}_\varepsilon]$:

$$C^{\varepsilon}_{\alpha\alpha}=3\,(t_\alpha/s)+(\varepsilon_{r\alpha}/2)\,(C_{\text{а}\alpha}+C_{\text{б}\alpha})+(\varepsilon_r/4)\,(C_{\text{а}}+C_{\text{б}}+C_{\text{г}}+C_{\text{д}});$$

$$C^{\varepsilon}_{2+\alpha,\,2+\alpha}=2(t_\alpha/s)+(\varepsilon_{r\alpha}/8)\,(3C_{\text{а}\alpha}+2C_{\text{б}\alpha}+3C_{\text{в}\alpha})+$$
$$+(\varepsilon_r/16)\,(3C_{\text{а}}+2C_{\text{б}}+3C_{\text{в}}+3C_{\text{г}}+2C_{\text{д}});$$

$$C^{\varepsilon}_{p,\,p}=2\,(t_\alpha/s)+(\varepsilon_{r\alpha}/4)\,(C_{\text{а}\alpha}+2C_{\text{б}\alpha}+C_{\text{в}\alpha})+(\varepsilon_r/8)\,(C_{\text{а}}+2C_{\text{б}}+C_{\text{в}}+C_{\text{г}}+2C_{\text{д}}),$$
$$p=2q+\alpha,\ q=2,\ \ldots,\ N-3; \qquad (2.99)$$

$$C^{\varepsilon}_{p,\,p+2}=(t_\alpha/s)+(\varepsilon_{r\alpha}/4)\,(C_{\text{а}1}-C_{\text{в}1})+(\varepsilon_r/8)\,(C_{\text{а}}-C_{\text{в}}+C_{\text{г}});$$

$$C^{\varepsilon}_{p,\,p+4}=(\varepsilon_{r\alpha}/8)\,(2C_{\text{б}\alpha}-C_{\text{а}\alpha}-C_{\text{в}\alpha})+(\varepsilon_r/16)\,(2C_{\text{б}}+2C_{\text{д}}-C_{\text{а}}-C_{\text{в}}-C_{\text{г}}),$$
$$p=2q+\alpha;\ q=0,\ \ldots,\ N-1;$$

$$C^{\varepsilon}_{12}=C^{\varepsilon}_{2N-1,\,2N}=(\varepsilon_r/4)\,(C_{\text{а}}+C_{\text{б}}-C_{\text{г}}-C_{\text{д}});$$

$$C^{\varepsilon}_{34}=C^{\varepsilon}_{2N-3,\,2N-2}=(\varepsilon_r/16)\,(3C_{\text{а}}+2C_{\text{б}}+3C_{\text{в}}-3C_{\text{г}}-2C_{\text{д}});$$

$$C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q}=(\varepsilon_r/8)\,(C_{\text{а}}+2C_{\text{б}}+C_{\text{в}}-2C_{\text{д}}-C_{\text{г}});$$

$$C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q+2}=C^{\varepsilon}_{2q+1,\,2q}=(\varepsilon_r/8)\,(C_{\text{а}}-C_{\text{в}}-C_{\text{г}});$$

$$C^{\varepsilon}_{2q-1,\,2q+4}=C^{\varepsilon}_{2q+2,\,2q}=(\varepsilon_r/16)\,(2C_{\text{б}}-2C_{\text{д}}-C_{\text{в}}+C_{\text{г}}).$$

Остальные элементы матрицы $[C_\varepsilon]$ полагаем равными нулю. Для вычисления $[C_{1/\mu}]$ достаточно заменить $\varepsilon_{r\alpha}$ на $1/\mu_{r\alpha}$. Диагональные элементы $[C_\varepsilon]$ должны быть положительными, а недиагональные — отрицательными, т. е. все $C^{\varepsilon}_{pq}$ в формулах (2.95)—(2.99) должны быть положительны. При вычислениях некоторые малые недиагональные элементы могут оказаться положительными. Это означает лишь, что полученные значения имеют порядок погрешности величин в табл. 2.9 и их следует положить равными нулю.

## СИММЕТРИЧНАЯ СВЯЗАННАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ ССПЛ1

Поперечное сечение однородной ССПЛ1 показано на рис. 2.82.

**Полоски нулевой толщины.** При $\sigma_м = \infty$, $t/b = 0$ и бесконечно широких экранирующих пластинах точное значение $Z_{во}$ и $Z_{ве}$ находят методом конформных отображений [2.76]:

$$Z_{ве}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=30\pi K_1(k_e);\quad Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=30\pi K_1(k_o), \tag{2.100}$$

где $k_e=\sqrt{1-(k'_e)^2}$; $k_o=\sqrt{1-(k'_o)^2}$;

$$k'_e=\operatorname{th}[\pi w/(2b)]\operatorname{th}[\pi(w+s)/(2b)];\quad k'_o=\operatorname{th}[\pi w/(2b)]\operatorname{cth}[\pi(w+s)/(2b)]. \tag{2.101}$$

Геометрические размеры ССПЛ1 по заданным $Z_{ве}$ и $Z_{во}$ определяют при помощи следующих соотношений [2.76]:

$$w/b=2\operatorname{arth}[\sqrt{k'_e k'_o}]/\pi;\quad s/b=2\operatorname{arth}\{\sqrt{k'_e}(1-k'_o)/[\sqrt{k'_o}(1-k'_e)]\}/\pi, \tag{2.102}$$

где $k'_o$ и $k'_e$ находят через $Z_{во}$ и $Z_{ве}$ из (2.100) с помощью (2.19), (2.20).

**Пример 2.22.** Определить $Z_{во}$ и $Z_{ве}$ для ССПЛ1 при $w = 1$ мм, $b = 4$ мм, $s = 0{,}5$ мм, если линия заполнена диэлектриком ФАФ-4. Из (2.101) определяем модули эллиптических интегралов:

$$k'_e = \operatorname{th}[3{,}14\cdot 1/(2\cdot 4)]\operatorname{th}[3{,}14(1{,}0+0{,}5)/(2\cdot 4)] = 0{,}1978;\ k'_o = \operatorname{th}[3{,}14\times$$
$$\times 1/(2\cdot 4)]\operatorname{cth}[3{,}14\cdot(1{,}0+0{,}5)/(2\cdot 4)] = 0{,}7061;\ k_e = \sqrt{1-0{,}1978^2} =$$
$$= 0{,}9802;\ k_o = \sqrt{1-0{,}7061^2} = 0{,}7081.$$

Тогда из (2.17)

$$K_1(k_e) = \ln[2(1+\sqrt{0{,}9802})/(1-\sqrt{0{,}9802})]/3{,}14 = 1{,}91;\ K_1(k_o) = \ln[2\times$$
$$\times(1+\sqrt{0{,}708})/(1-\sqrt{0{,}708})]/3{,}14 = 1{,}00.$$

Согласно (2.100) $Z_{ве} = 30\cdot 3{,}14\cdot 1{,}91/\sqrt{2{,}5} = 113{,}85$ Ом; $Z_{во} = 30\cdot 3{,}14\times$ $\times 1/\sqrt{2{,}5} = 59{,}61$ Ом.

Для приближенных оценок при $w/b \geqslant 0{,}35$ целесообразно использовать формулы [2.76]:

$$Z_{ве}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=60\pi/[2(w/b)+C_f+C_{fe}];\quad Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=$$
$$=60\pi/[2(w/b)+C_f+C_{fo}], \tag{2.103}$$

где $C_f$ определяется из (2.32) при $t/b = 0$;

$$C_{fe} = (2/\pi)\ln\{1+\operatorname{th}[\pi s/(2b)]\};\quad C_{fo} = (2/\pi)\ln\{1+\operatorname{cth}[\pi s/(2b)]\}. \tag{2.104}$$

При выводе формул (2.103) предполагалось, что полная погонная емкость одной полоски складывается из емкости плоского конденсатора $2C_p$, краевой емкости для одиночной СПЛ $2C_f$ и краевой емкости каждой полоски $2C_{fe}$ для четной волны или $2C_{fo}$ для нечетной:

$$C_e=2(C_p+C_f+C_{fe});\quad C_o=2(C_p+C_f+C_{fo}), \tag{2.105}$$

где $C_p = 2w/b$; $C_f$ определяется из (2.32) при $t/b = 0$, $C_{fe}$ и $C_{fo}$ — из (2.104). В табл. 2.9 $C_а$, $C_б$, $C_в$ соответствуют значению $C_{fo}$, вычисленному при различных расположениях электрических и магнитных стенок, а $C_г$, $C_д$ соответствуют $C_{fe}$. В частности, в (2.104) $C_{fo} = C_а$, а $C_{fe} = C_г$.

Геометрические размеры ССПЛ1 (при $w/b \geqslant 0{,}35$) по заданным $Z_{во}$ и $Z_{ве}$ определяются из следующих приближенных выражений [2.5]:

$$w/b \simeq [30\pi \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}/Z_{ве}] - [s/(2b)] + (1/\pi) \ln \{{}^1/_2 \mathrm{ch}\, [\pi s/(2b)]\};$$

$$s/b \simeq -(1/\pi) \ln \{\mathrm{th}\, [15\pi^2 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}\, (1/Z_{во} - 1/Z_{ве})]\}. \qquad (2.106)$$

При расчете направленных ответвителей на связанных линиях обычно задают волновое сопротивление подводящих линий $Z_в$ и коэффициент связи между полосками $k_{св}$. В этом случае геометрические размеры ССПЛ1 определяются по следующим приближенным формулам [2.78]:

$$w/b \approx (30\pi/Z_в) \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \sqrt{(1 - k_{св})/(1 + k_{св})} - (s/2b) + (1/\pi) \ln [(1/2)\, \mathrm{ch}\, (\pi s/2b)];$$

$$s/b \approx (-1/\pi) \ln \{\mathrm{th}\, [30\pi^2 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}\, k_{св}/(Z_в \sqrt{1 - k_{св}^2})]\}. \qquad (2.107)$$

**Пример 2.23.** Определить геометрические размеры ССПЛ1 при $t/b = 0$, если $Z_{ве} = 150$ Ом, $Z_{во} = 50$ Ом, $b = 4$ мм, линия заполнена диэлектриком ФАФ-4 ($\varepsilon_r = 2{,}5$). Из (2.100) определяем отношение эллиптических интегралов

$$K_1(k_e) = 150 \sqrt{2{,}5}/(30 \cdot 3{,}14) = 2{,}516; \quad K_1(k_o) = 50 \sqrt{2{,}5}/(30 \cdot 3{,}14) = 0{,}839.$$

По (2.19) и (2.20) находим модули эллиптических интегралов:

$$k_e = [(e^{3{,}14 \cdot 2{,}516} - 2)/(e^{3{,}14 \cdot 2{,}516} + 2)]^2 = 0{,}997;$$

$$k_o = \sqrt{1 - [(e^{3{,}14/0{,}839} - 2)/(e^{3{,}14/0{,}839} + 2)]^4} = 0{,}561;$$

$$k_e' = \sqrt{1 - 0{,}997^2} = 0{,}077; \quad k_o' = \sqrt{1 - 0{,}561^2} = 0{,}828.$$

Из (2.102) находим

$$w/b = (2/3{,}14)\ \mathrm{arth} \sqrt{0{,}077 \cdot 0{,}828} = 0{,}164; \quad s/b = (2/3{,}14)\ \mathrm{arth}\, \{\sqrt{0{,}077} \times$$

$$\times (1 - 0{,}828)/[\sqrt{0{,}828}\, (1 - 0{,}077)]\} = 0{,}036,$$

т. е. $w = 0{,}164 \cdot 4 = 0{,}66$ мм; $s = 0{,}036 \cdot 4 = 0{,}14$ мм.

**Полоски конечной толщины.** При $\sigma_м = \infty$, $t/b \neq 0$ $Z_{во}$ и $Z_{ве}$ ССПЛ1 можно определить по формулам (2.103), где $C_f$ определяется выражением (2.32), а краевые емкости внутренних краев полосок для четной и нечетной волн рассчитываются по формулам и графикам из [2.31] (см. также [2.5, 2.27, 2.72]).

Предельным случаем полоски конечной толщины является $w/t = 0$. При этом справедливы формулы [2.79]

$$Z_{ве} \sqrt{\varepsilon_r/\mu_r} = 60\pi K_1(k); \quad Z_{во} \sqrt{\varepsilon_r/\mu_r} = 94\pi/[(b/s) \arccos k - \ln k], \qquad (2.108)$$

где $k$ — определяется из соотношения

$$\frac{t}{b} = \frac{2}{\pi} \left\{ \mathrm{arctg} \left[ \frac{k'}{k} \sqrt{\frac{1 - (k'/k)(s/b)}{1 + (k'/k)(s/b)}} \right] - \frac{s}{b}\, \mathrm{arth} \sqrt{\frac{1 - (k'/k)(s/b)}{1 + (k'/k)(s/b)}} \right\}. \qquad (2.109)$$

Приведенные формулы справедливы для всех значений $t/b$ и $s/b$ при условии $t/s > 1$. Погрешность вычислений не превышает нескольких процентов. Формулы (2.108) и (2.109) удобны для определения размеров линии по заданным $Z_{ве}$, $Z_{во}$, $\varepsilon_r$, $\mu_r$.

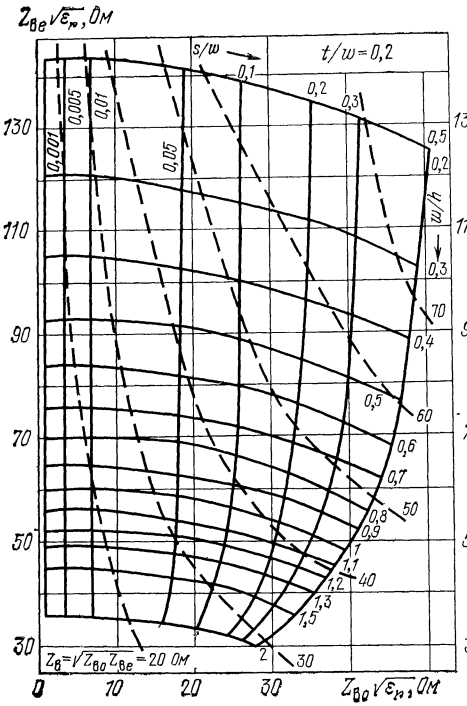



Рис. 2.79

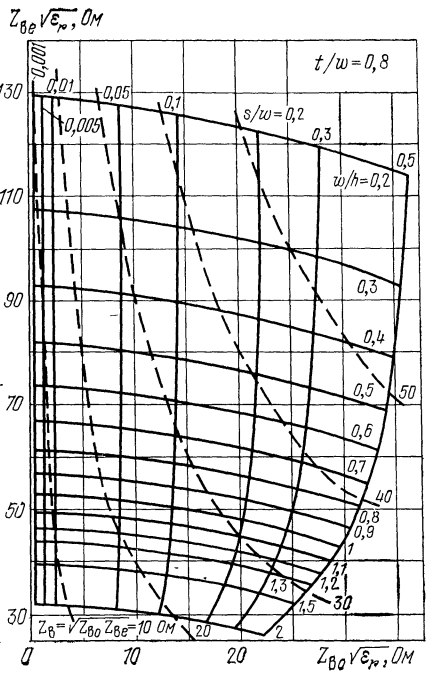



Рис. 2.80

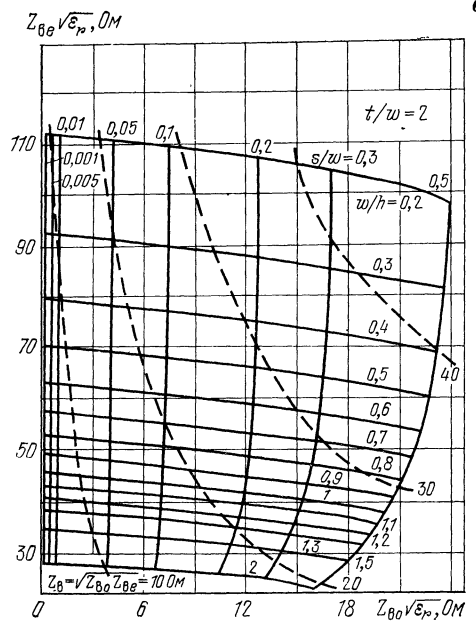



Рис. 2.81

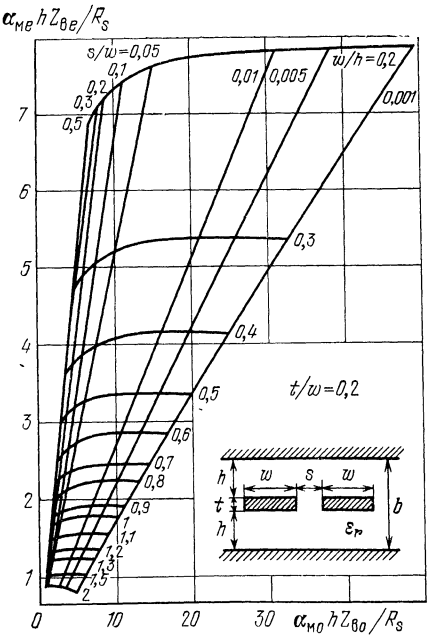



Рис. 2.82

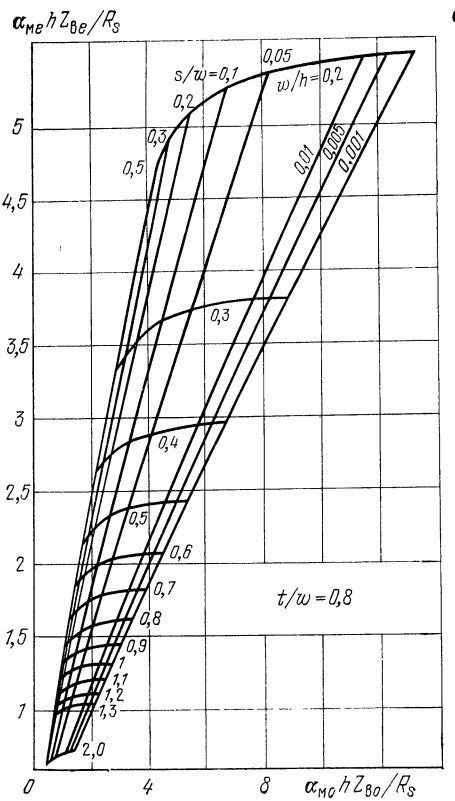



Рис. 2.83

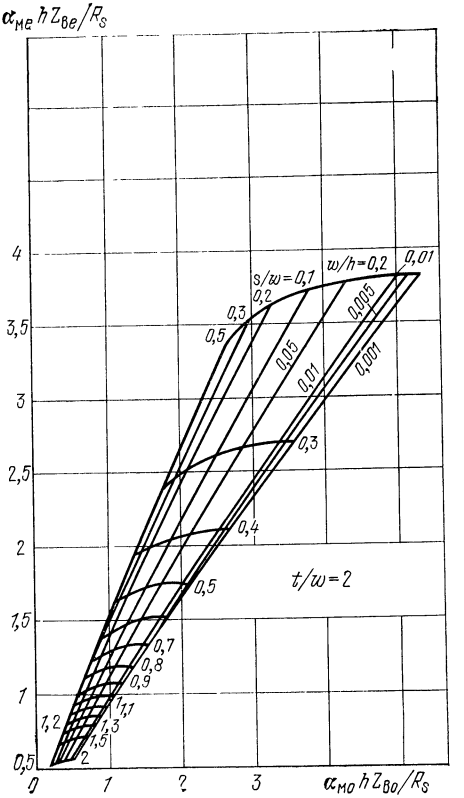



Рис. 2.84

**Пример 2.24.** Определить геометрические размеры ССПЛ1 для $w/t = 0$ при $Z_{Be} = 100$ Ом; $Z_{Bo} = 25$ Ом, если $b = 6$ мм и линия заполнена ФАФ-4 ($\varepsilon_r = 2{,}5$). Согласно (2.108) и (2.20)

$$K_1(k) = 100\sqrt{2{,}5}/(60\cdot 3{,}14) = 0{,}839;$$

$$k = \sqrt{1-[(e^{3{,}14/0{,}839}-2)/(e^{3{,}14/0{,}839}+2)]^4} = 0{,}561;$$

$$k' = 0{,}828; \quad k'/k = 1{,}476.$$

Тогда из (2.108)

$$s/b = \arccos\{0{,}561/[94\cdot 3{,}14/(25\cdot\sqrt{2{,}5}) + \ln 0{,}561]\} = 0{,}14$$

и из (2.109)

$$\frac{t}{b} = \frac{2}{3{,}14}\left[\operatorname{arctg}\left(1{,}476\sqrt{\frac{1-1{,}476\cdot 0{,}14}{1+1{,}476\cdot 0{,}14}}\right) - \right.$$

$$\left. -0{,}14\operatorname{arth}\sqrt{\frac{1-1{,}476\cdot 0{,}14}{1+1{,}476\cdot 0{,}14}}\right] = 0{,}46.$$

Следовательно, $s = 0{,}14\cdot 6 = 0{,}84$ мм и $t = 0{,}46\cdot 6 = 2{,}7$ мм.

Для $w/t \neq 0$ $Z_{ве}$ и $Z_{во}$ определяются по формулам [2.79]

$$Z_{ве}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=60\pi/\{K_1(k)+[2(w/b)/(1-t/b)]\};$$
$$Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}=94\pi/\{(b/s)\arccos k-\ln k+\pi(w/b)/(1-t/b)\}, \qquad (2.110)$$

где $k$ находится из уравнения (2.109). Погрешность вычислений не превышает нескольких процентов при любых $w/t$. Некоторые результаты численного расчета $Z_{ве}$ и $Z_{во}$, $\alpha_{ме}$, и $\alpha_{мо}$ для ССПЛ1, полученные на ЭВМ методом интегральных уравнений [2.68], приведены на рис. 2.79—2.84.

## СИММЕТРИЧНАЯ СВЯЗАННАЯ ПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ ССПЛ2

Поперечное сечение однородной ССПЛ2 показано на рис. 2.85. При $t/b = 0$ и $w/b > 0{,}35\,(s/b)$ [2.5]

$$Z_{ве}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}\approx 60\pi/K_1(k);\quad Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}\approx 94\pi\,(s/b)/\mathrm{arth}\,k, \qquad (2.111)$$

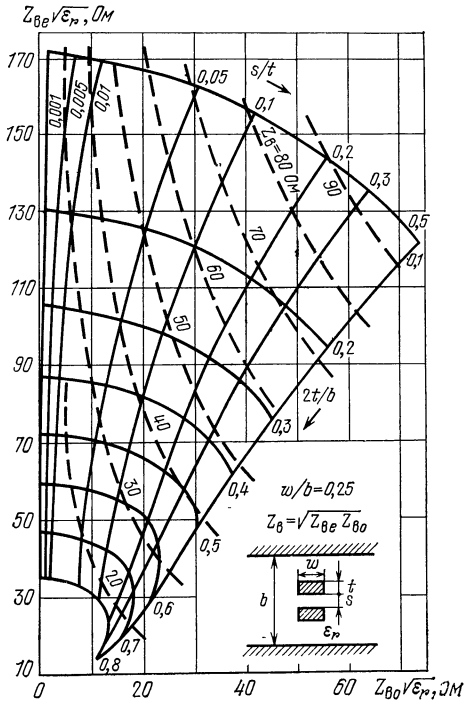



Рис. 2.85

где $k$ определяется из соотношений $k=\sqrt{1-(k')^2}$ и

$$\frac{w}{b}=\frac{2}{\pi}\left[\mathrm{arth}\sqrt{\frac{k(k-s/b)}{1-ks/b}}-\frac{s}{b}\,\mathrm{arth}\sqrt{\frac{k-sb}{k(1-ks/b)}}\right]. \qquad (2.112)$$

При $w/b \geqslant 0{,}35\,(1-s/b)$ и $t/b=0$ [2.5]

$$Z_{ве}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}\approx 60\pi/[(w/b)/(1-s/b)+C_{fe}]; \qquad (2.113)$$

$$Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}\approx 60\pi/[(w/b)/(1-s/b)+(w/b)/(s/b)-C_{fo}];$$

$$C_{fe}=0{,}4413-M;\quad C_{fo}=(b/s)\,M; \qquad (2.114)$$

$$M=(1/\pi)\,[(1-s/b)\ln(1-s/b)+(s/b)\ln(s/b)]/(1-s/b).$$

Когда $w/b \geqslant 0{,}35\,(1-s/b)$ и $w/b \geqslant 0{,}35 s/b$ [2.80],

$$s/b=(Z_{во}/Z_{ве})-[0{,}4413 Z_{во}\sqrt{\varepsilon_r/\mu_r}/(60\pi)],\quad w/b=(60\pi\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}/Z_{ве})-C_{fe}(1-s/b), \qquad (2.115)$$

где $C_{fe}$ определяется из (2.114).

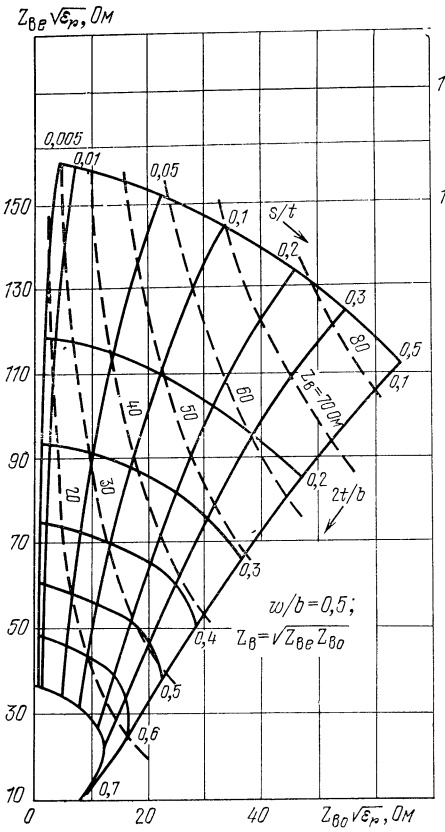



Рис. 2.86

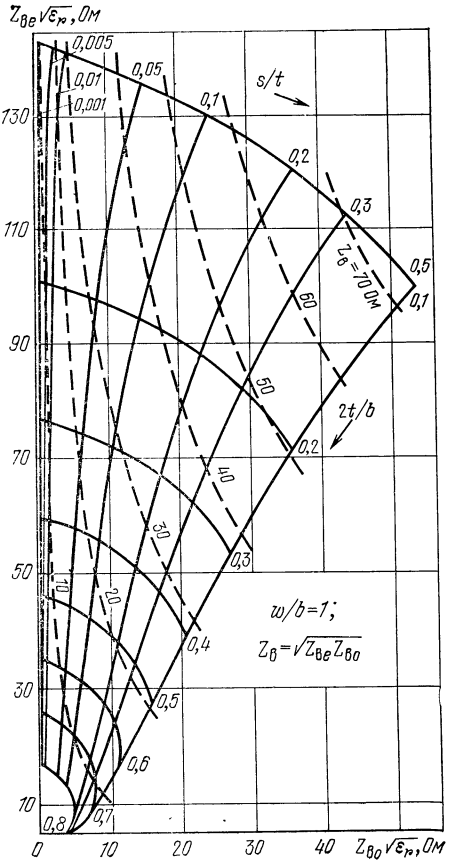



Рис. 2.87

Для полосок конечной толщины в [2.13] приведены формулы, аналогичные (2.111) с соответствующей коррекцией. Некоторые результаты численного расчета $Z_{ве}$ и $Z_{во}$ для ССПЛ2 с полосками конечной толщины, полученные на ЭВМ методом интегральных уравнений [2.68], приведены на рис. 2.85 — 2.87.

## СВЯЗАННЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ (СМПЛ)

Результаты расчета $Z_{ве}$, $Z_{во}$ и $Z_в$ для СМПЛ, полученные в квазистатическом приближении методом интегральных уравнений [2.59], приведены на рис. 2.88—2.90. На рис. 2.91 дано распределение плотности тока $j_s$ по ширине полоски для четной и нечетной волн. В квазистатическом приближении поперечных компонент тока нет. В отличие от МПЛ, здесь наблюдается асимметрия распределения тока по ширине полосок.

Квазистатический расчет [2.75] $Z_{ве}$ и $Z_{во}$ можно произвести по приближенным формулам (2.69) и (2.70), если для четной и нечетной волн ввести эквивалентные размеры $(w/h)_e = (2/\pi)\,\mathrm{arch}\,[(2H - g + 1)/(g + 1)]$.

При $\varepsilon_r \leqslant 6$

$$\left(\frac{w}{h}\right)_o = \frac{2}{\pi}\,\mathrm{arch}\,\frac{2H-g-1}{g-1} + \frac{4/\pi}{1+(\varepsilon_r/2)}\,\mathrm{arch}\left(1+2\frac{w}{s}\right);$$

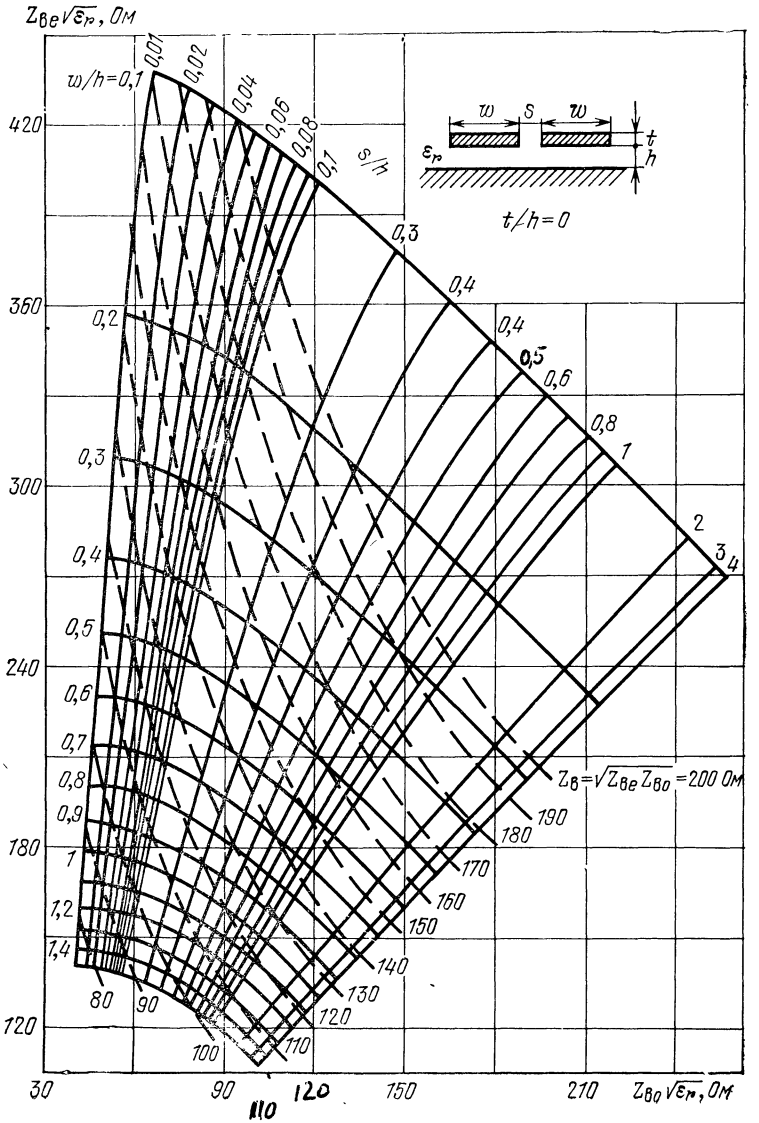

$Z_{Be}\sqrt{\varepsilon_r}$, Ом
w/h=0,1
0,01
0,02
0,04
0,06
0,08
0,1
s/h
0,3
0,4
0,4
0,5
0,6
0,8
1
2
3
4
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
1,2
1,4
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
$Z_B=\sqrt{Z_{Be}Z_{Bo}}$=200 Ом
w
s
w
t
h
$\varepsilon_r$
t/h=0
420
360
300
240
180
120
30
90
120
150
210
$Z_{Bo}\sqrt{\varepsilon_r}$, Ом
110

Рис. 2.88

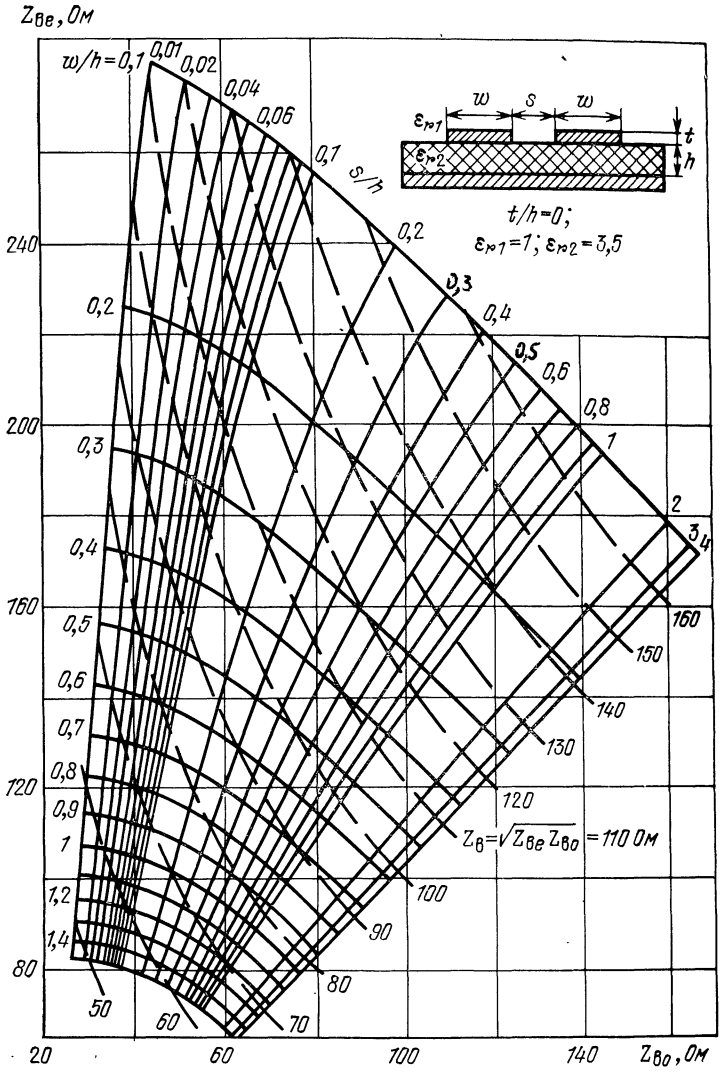

Zвe, Ом
w/h=0,1
0,01
0,02
0,04
0,06
0,1
s/h
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,8
1
2
3
4
w
s
w
εr1
εr2
t
h
t/h=0;
εr1=1; εr2=3,5
240
200
160
120
80
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
1,2
1,4
50
60
70
80
90
100
120
130
140
150
160
Zв=√ZвeZвo=110 Ом
20
60
100
140
Zвo, Ом

Рис. 2.89

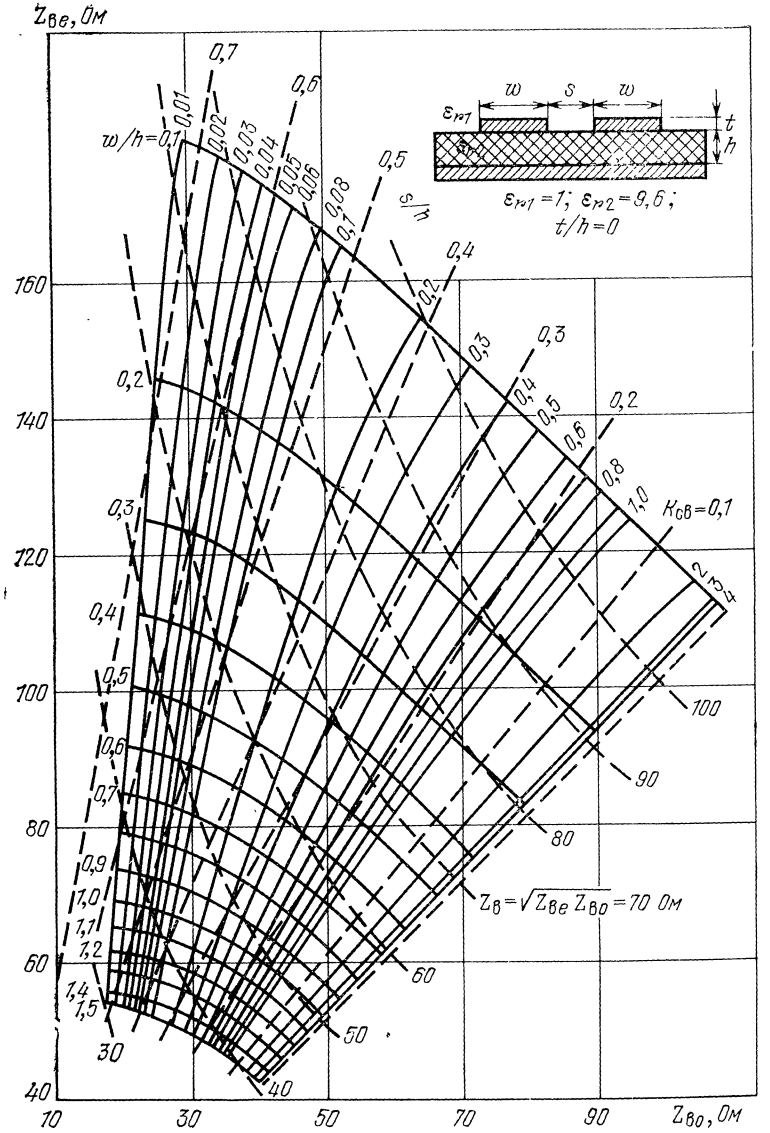

Zвe, Ом
Zвo, Ом
w/h=0,1
s/h
w
s
t
h
εr1
εr2
εr1=1; εr2=9,6;
t/h=0
Kсв=0,1
Zв=√(Zвe Zвo)=70 Ом
160
140
120
100
80
60
40
10
30
50
70
90

Рис. 2.90

при $\varepsilon_r \geqslant 6$

$$\left(\frac{w}{h}\right)_o = \frac{2}{\pi}\,\mathrm{arch}\,\frac{2H-g-1}{g-1} + \frac{1}{\pi}\,\mathrm{arch}\left(1+2\frac{w}{s}\right); \qquad (2.116)$$

$$g = \mathrm{ch}\,\frac{\pi s}{2h}; \quad H = \mathrm{ch}\left(\frac{\pi w}{h} + \frac{\pi s}{2h}\right).$$

Порядок расчета $Z_{\text{в}e}$ и $Z_{\text{в}o}$: зная $w$, $h$, $s$, по (2.116) сначала вычисляем $g$ и $H$, затем с учетом $\varepsilon_r$ $(w/h)_e$ и $(w/h)_o$; $Z_{\text{в}e}$ и $Z_{\text{в}o}$ находим из (2.69) или (2.70). Сравнение с результатами расчета по методу, описанному в [2.59], показывает, что погрешность зависит от $s/w$ и $\varepsilon_r$. При $s/w = 1$ и $\varepsilon_r = 9{,}6$, погрешность 1,5%, а при $s/w = 0{,}05$ — 23%, т. е. расчет носит уже ориентировочный характер.

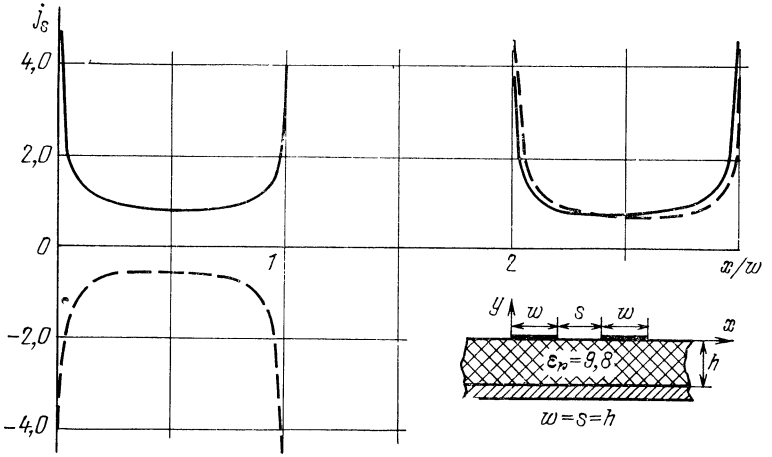



Рис. 2.91

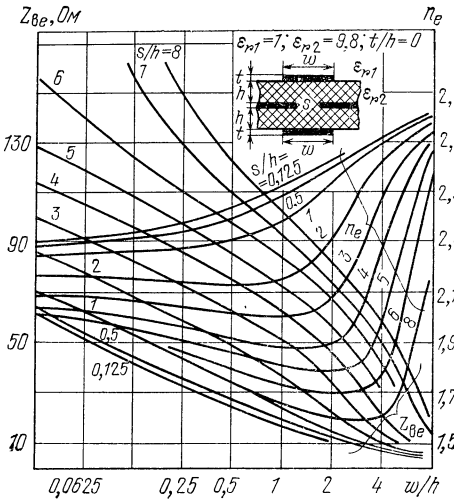



Рис. 2.92

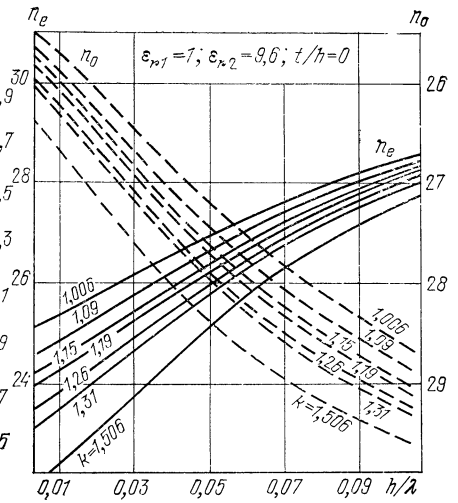



Рис. 2.93

## МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ, СВЯЗАННЫЕ ЧЕРЕЗ ЩЕЛЬ

Линия представляет собой ЩПЛ, помещенную между слоями диэлектрика толщиной $h$, на свободные поверхности слоев нанесены проводящие полоски (рис. 2.92). В такой линии возможны четные и нечетные квази-Т-волны полосковой линии, волна щелевой линии, волны непрерывного спектра в слое диэлектрика (см. рис. 2.5), а также волны полосковой и щелевой линии высшего типа, когда по ширине полоски или щели поле меняет знак. Такая классификация несколько условна, поскольку поле волн полосковой линии возмущается щелью, а поле волн щелевой линии — полосками.

При бесконечно тонком экране, в котором прорезана щель, характеристики основной (квази-Т-) и высших нечетных волн не отличаются от характеристик МПЛ. В частности, $Z_{во}$ для волн квази-Т можно определить по формулам (2.69), (2.70) и графикам (рис. 2.41, 2.42), поделив полученные результаты на 2, коэффициент затухания $\alpha_{мо}$ — по формулам (2.78)—(2.80) и графикам (см. рис. 2.49—2.52). На рис. 2.92 приводятся характеристики $Z_{ве}$ и $n_e$ только для четной волны квази-Т, полученные в квазистатическом приближении [2.70]. Они справедливы при $\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_r}w$; $\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_r}\,s$; $\lambda > 8\sqrt{\varepsilon_r}\,h$, когда еще малы поправки на

Рис. 2.95

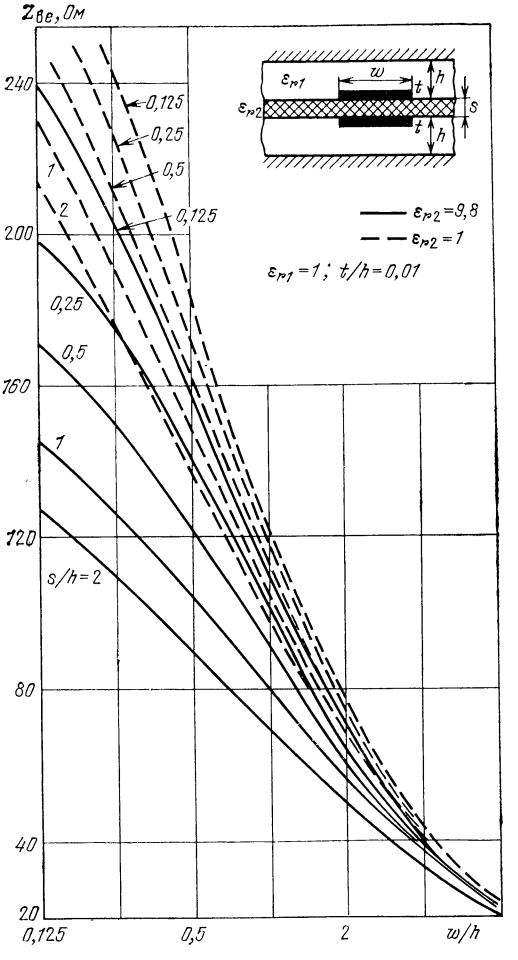
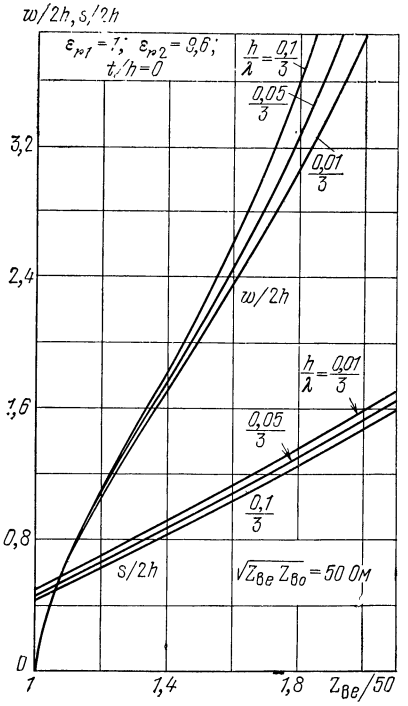



Рис. 2.94



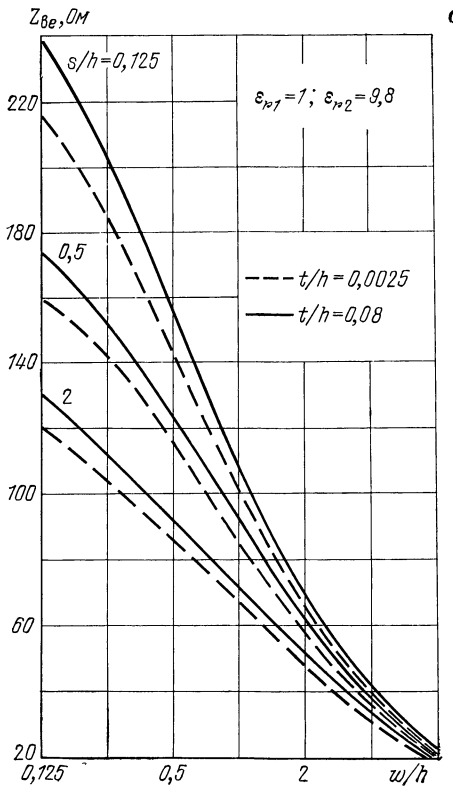



Рис. 2.96

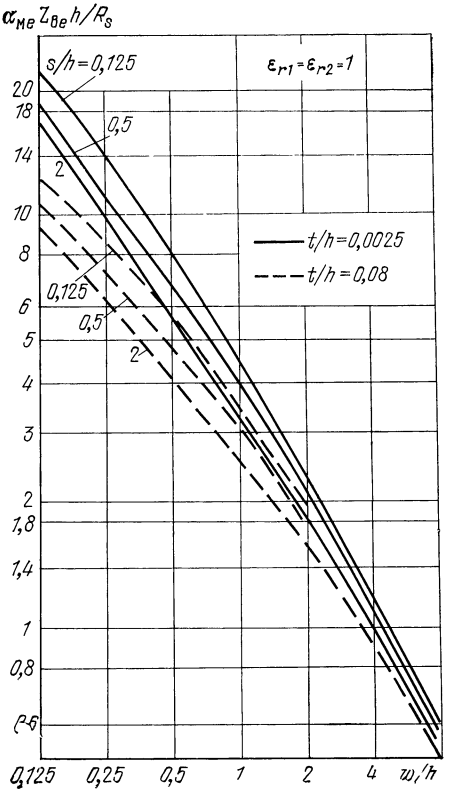



Рис. 2.97

дисперсию. Расчет дисперсионных характеристик (рис. 2.93) четной $n_e$ $(h/\lambda)$ и нечетной $n_o$ $(h/\lambda)$ волн в МПЛ, связанных через щель, проведен в [2.81]. В качестве параметра используется величина $k = Z_{Be}/50$. Ей соответствуют размеры $s/2h$ и $w/2h$, которые определены с помощью рис. 2.94 при $h/\lambda = 0{,}01/3$. Величина $Z_{Be}$ определена через квазистатическое значение $Z_{Beo}$: $Z_{Be} = Z_{Beo}/n_e$.

## ВЫСОКОДОБРОТНАЯ ЛИНИЯ

Поперечное сечение линии показано на рис. 2.95. Она получается из ССПЛ2, если между полосками поместить слой диэлектрика. В такой линии возможны четные и нечетные квази-Т-волны; $Z_{Bo}$ и $n_o$ определяются по формулам (2.69), (2.70), справедливым для МПЛ. Полученное значение $Z_{Bo}$ следует разделить на 2. Величину $\alpha_{Mo}$ также можно определить с помощью данных для МПЛ, если пренебречь потерями в достаточно удаленных экранах и учесть долю потерь в полоске (см. рис. 2.50). На практике обычно используется четная волна. Для нее результаты расчета $Z_{Be}$ и $\alpha_{Me}$ приведены на рис. 2.95—2.97 [2.70]. Потери для четной волны значительно меньше, чем в МПЛ, так как при одинаковых $Z_B$ у этой линии полоска значительно шире, чем у МПЛ. Результаты справедливы, пока мала дисперсия ($\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_r}\, s$; $\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_r}\, w$, $\lambda > 4\sqrt{\varepsilon_r}\, h$).

Глава 3

# НЕОДНОРОДНОСТИ И ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

## 3.1. ЭФФЕКТИВНАЯ ШИРИНА ПОЛОСКИ

Понятие «эффективная ширина» вводится на основе модели Олинера [3.1] и широко используется при анализе разнообразных неоднородностей в СПЛ и НПЛ. Модель основана на сравнении волновых сопротивлений реальной линии и однородно заполненного волновода с магнитными боковыми стенками, у которого в поперечной плоскости распределение электрических и магнитных полей равномерное. На поверхности магнитной стенки касательная составляющая магнитного поля равна нулю. Эффективная ширина центральной полоски совпадает с шириной эквивалентного волновода, когда волновое сопротивление линии и волновода равны.

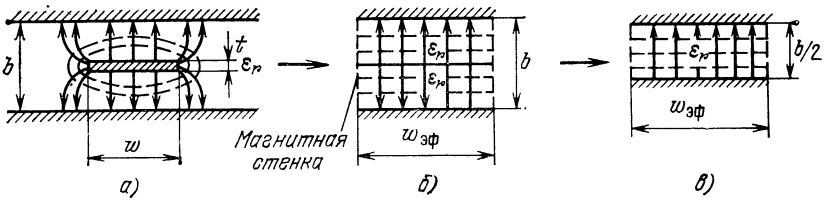



Рис. 3.1

На рис. 3.1, *а*, *б* изображена структура электромагнитного поля СПЛ и модели Олинера для СПЛ. Так как в СПЛ диэлектрическое заполнение однородное, то диэлектрическая проницаемость среды в модели и линии равны. Волновое сопротивление линии на рис. 3.1, *б* вычисляется по формуле

$$Z_{\text{в эф}} = 30\pi b/(\sqrt{\varepsilon_r}\, w_{\text{эф}}). \tag{3.1}$$

Сравнивая (3.1) с выражениями для $Z_{\text{в}}$ СПЛ, приведенными в [3.2], [2.5], получаем выражения для эффективной ширины:

1) при $t/b = 0$ и $Z_{\text{в}} < 100$ Ом

$$w_{\text{эф}}/b = w/b + (2/\pi)\ln 2; \tag{3.2}$$

2) при $t/b = 0$, $w/b \leqslant 0{,}5$

$$w_{\text{эф}}/b = \pi/\ln\left[2\left(1+\sqrt{k}\right)/\left(1-\sqrt{k}\right)\right], \tag{3.3}$$

где $k^2 = 1 - \text{th}^2(\pi w/2b)$;

3) при $w/(b-t) \geqslant 0{,}35$ и $t/b \leqslant 0{,}25$

$$\frac{w_{\text{эф}}}{b} = \frac{w}{b(1-t/b)} + \frac{1}{\pi}\left\{\frac{2}{1-t/b}\ln\left(\frac{1}{1-t/b}+1\right) - \left(\frac{1}{1-t/b}-1\right)\ln\left(\frac{1}{(1-t/b)^2}-1\right)\right\}; \tag{3.4}$$

4) при $w/(b-t) < 0{,}35$ и $t/b < 0{,}25$

$$w_{эф}/b = \pi/\{2 \ln [4b/(\pi d_0)]\}, \tag{3.5}$$

где $d_0/w = 0{,}5 + 0{,}8t/w - 0{,}12\,(t/w)^2$.

Построение модели Олинера для НПЛ (рис. 3.2, *а*) несколько усложняется, так как диэлектрическое заполнение неоднородно. Поэтому на первом этапе вводится понятие $\varepsilon_{эф}$, как это сделано в § 2.3, т. е. НПЛ с неоднородным диэлектрическим заполнением ставится в соответствие НПЛ с однородным заполнением (рис. 3.2, *б*). Величина $\varepsilon_{эф}$ определяется из условия равенства фазовых скоростей волн в обеих линиях. Линия, являющаяся моделью Олинера для НПЛ,

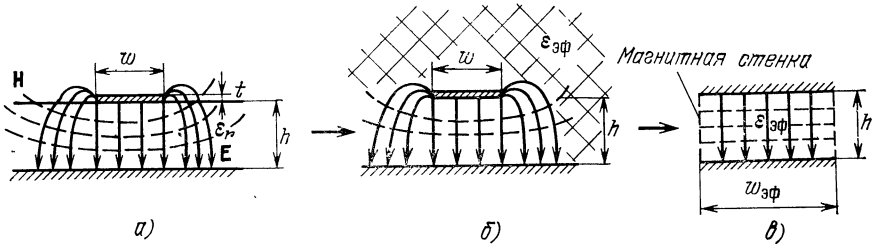



Рис. 3.2

изображена на рис. 3.2, *в*. Эффективная ширина НПЛ для модели Олинера определяется из равенства волновых сопротивлений исходной линии и модели с поправкой на дисперсию диэлектрической проницаемости [3.3, 3.5, 3.6]:

$$w_{эф}/h = w/h + (w_{эф0} - w)/h/(1 + 2w\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda), \tag{3.6}$$

где

$$w_{эф0} = 120\pi h/(Z_в\sqrt{\varepsilon_{эф0}}); \tag{3.7}$$

$$Z_в = 120\pi h/\{\sqrt{\varepsilon_r}\,w\,[1 + 1{,}735\varepsilon_r^{-0{,}0724}\,(w/h)^{-0{,}836}]\}. \tag{3.8}$$

При $f \to 0$, $\varepsilon_{эф} \to \varepsilon_{эф0}$ и $w_{эф} \to w_{эф0}$, а при $f \to \infty$ $\varepsilon_{эф} \to \varepsilon_r$ и $w_{эф} \to w$.

Результаты расчета для НПЛ по формуле (3.6) сведены в табл. 3.1. Зависимости $\varepsilon_{эф}/\varepsilon_r$ от $w/h$ для разных частот приведены в § 2.3.

Вблизи неоднородности как в СПЛ, так и в НПЛ структура электромагнитного поля отличается от структуры того же поля в регулярной линии. Это обычно трактуется как появление высших типов волн. Для каждого типа волны, строго говоря, необходимо ввести свой эквивалентный волновод с $\varepsilon_{эф}^{(n)}$ и $w_{эф}^{(n)}$, отличающимися при разных $n$ друг от друга и от аналогичных параметров для низшей квази-Т-волны. Экспериментальное исследование, выполненное в [3.3, 3.4], показало, что различием эффективных ширин линий для всех типов волн можно практически пренебречь и

$$\varepsilon_{эф}^{(n)} = \varepsilon_{эф} - (n\lambda/2w_{эф})^2, \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots \tag{3.9}$$

Волне квази-Т соответствует значение $n = 0$. Дальнейшая нумерация осуществляется в соответствии с критической длиной волны. Выражение (3.9) можно использовать для определения критических длин волн высших типов. Так как при $\lambda \approx \lambda_{кр}$ $\varepsilon_{эф}^{(n)} \approx 0$, то для СПЛ

$$\lambda_{кр}^{(n)} = 2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/n;$$

для НПЛ

$$\lambda_{кр}^{(n)} = 2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}/n.$$

Последнее уравнение по существу трансцендентное, так как $\varepsilon_{эф}$ зависит от частоты.

Таблица 3.1

**Зависимость $w_{эф}/h$ от частоты $f$, ГГц**

| $f$ | $w_{эф}/h$ при $w/h$, равном | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 7,15 | 15,7 | 24,2 | 35,4 |
| | | | | | | | $\varepsilon_r=2,5$ | | | | | | | |
| 1 | 2,23 | 2,91 | 3,54 | 4,12 | 4,68 | 5,23 | 5,77 | 6,30 | 6,82 | 7,34 | 9,52 | 18,00 | 26,35 | 37,36 |
| 2 | 2,21 | 2,88 | 3,48 | 4,04 | 4,58 | 5,11 | 5,62 | 6,13 | 6,63 | 7,13 | 9,25 | 17,54 | 25,81 | 36,77 |
| 3 | 2,19 | 2,84 | 3,42 | 3,96 | 4,48 | 4,99 | 5,49 | 5,99 | 6,48 | 6,96 | 9,03 | 17,24 | 25,48 | 36,46 |
| 4 | 2,18 | 2,80 | 3,36 | 3,89 | 4,40 | 4,89 | 5,38 | 5,86 | 6,34 | 6,82 | 8,85 | 17,02 | 25,27 | 36,26 |
| 5 | 2,16 | 2,77 | 3,31 | 3,83 | 4,32 | 4,80 | 5,28 | 5,75 | 6,22 | 6,69 | 8,71 | 16,85 | 25,11 | 36,12 |
| 6 | 2,14 | 2,74 | 3,27 | 3,76 | 4,25 | 4,72 | 5,19 | 5,65 | 6,12 | 6,58 | 8,59 | 16,72 | 25,00 | 36,03 |
| 7 | 2,13 | 2,70 | 3,22 | 3,71 | 4,18 | 4,64 | 5,11 | 5,57 | 6,03 | 6,49 | 8,48 | 16,62 | 24,91 | 35,95 |
| 8 | 2,11 | 2,67 | 3,18 | 3,65 | 4,12 | 4,57 | 5,03 | 5,49 | 5,94 | 6,40 | 8,39 | 16,54 | 24,84 | 35,89 |
| 9 | 2,10 | 2,64 | 3,14 | 3,60 | 4,06 | 4,51 | 4,96 | 5,42 | 5,87 | 6,33 | 8,31 | 16,47 | 24,78 | 35,84 |
| 10 | 2,08 | 2,61 | 3,10 | 3,55 | 4,00 | 4,45 | 4,90 | 5,35 | 5,80 | 6,26 | 8,24 | 16,41 | 24,73 | 35,80 |
| 11 | 2,07 | 2,59 | 3,06 | 3,51 | 3,95 | 4,40 | 4,84 | 5,29 | 5,74 | 6,20 | 8,18 | 16,36 | 24,69 | 35,77 |
| 12 | 2,05 | 2,56 | 3,02 | 3,47 | 3,91 | 4,35 | 4,79 | 5,24 | 5,69 | 6,14 | 8,12 | 16,32 | 24,66 | 35,74 |
| | | | | | | | $\varepsilon_r=5,0$ | | | | | | | |
| 1 | 2,28 | 2,98 | 3,62 | 4,21 | 4,79 | 5,34 | 5,89 | 6,43 | 6,96 | 7,48 | 9,70 | 18,24 | 26,63 | 37,67 |
| 2 | 2,27 | 2,96 | 3,57 | 4,15 | 4,74 | 5,25 | 5,78 | 6,30 | 6,81 | 7,32 | 9,47 | 17,84 | 26,12 | 37,09 |
| 3 | 2,26 | 2,93 | 3,53 | 4,09 | 4,63 | 5,16 | 5,67 | 6,18 | 6,68 | 7,18 | 9,29 | 17,54 | 25,79 | 36,74 |
| 4 | 2,24 | 2,90 | 3,49 | 4,04 | 4,56 | 5,08 | 5,58 | 6,08 | 6,57 | 7,06 | 9,13 | 17,32 | 25,56 | 36,51 |
| 5 | 2,23 | 2,87 | 3,45 | 3,98 | 4,50 | 5,00 | 5,49 | 5,98 | 6,46 | 6,94 | 8,99 | 17,15 | 25,38 | 36,35 |
| 6 | 2,22 | 2,85 | 3,41 | 3,93 | 4,44 | 4,93 | 5,42 | 5,89 | 6,37 | 6,84 | 8,87 | 17,01 | 25,25 | 36,23 |
| 7 | 2,21 | 2,82 | 3,37 | 3,89 | 4,38 | 4,87 | 5,34 | 5,81 | 6,28 | 6,75 | 8,76 | 16,89 | 25,14 | 36,14 |
| 8 | 2,19 | 2,80 | 3,34 | 3,84 | 4,33 | 4,80 | 5,27 | 5,74 | 6,21 | 6,67 | 8,67 | 16,79 | 25,05 | 36,06 |
| 9 | 2,18 | 2,78 | 3,30 | 3,80 | 4,28 | 4,75 | 5,21 | 5,67 | 6,14 | 6,60 | 8,59 | 16,71 | 24,98 | 36,00 |
| 10 | 2,17 | 2,75 | 3,27 | 3,76 | 4,23 | 4,69 | 5,15 | 5,61 | 6,07 | 6,53 | 8,51 | 16,64 | 24,92 | 35,95 |
| 11 | 2,16 | 2,73 | 3,24 | 3,72 | 4,18 | 4,64 | 5,10 | 5,55 | 6,01 | 6,47 | 8,45 | 16,58 | 24,87 | 35,91 |
| 12 | 2,15 | 2,71 | 3,21 | 3,68 | 4,14 | 4,59 | 5,05 | 5,50 | 5,95 | 6,41 | 8,39 | 16,52 | 24,82 | 35,87 |
| | | | | | | | $\varepsilon_r=9,6$ | | | | | | | |
| 1 | 2,27 | 2,98 | 3,61 | 4,21 | 4,78 | 5,33 | 5,87 | 6,40 | 6,93 | 7,45 | 9,64 | 18,10 | 26,42 | 37,39 |
| 2 | 2,25 | 2,94 | 3,55 | 4,12 | 4,67 | 5,20 | 5,72 | 6,63 | 6,74 | 7,24 | 9,35 | 17,63 | 25,87 | 36,80 |
| 3 | 2,23 | 2,91 | 3,49 | 4,04 | 4,57 | 5,08 | 5,59 | 6,08 | 6,57 | 7,06 | 9,13 | 17,31 | 25,53 | 36,48 |
| 4 | 2,21 | 2,87 | 3,44 | 3,97 | 4,48 | 4,98 | 5,47 | 5,95 | 6,43 | 6,91 | 8,94 | 17,08 | 25,31 | 36,28 |
| 5 | 2,20 | 2,83 | 3,39 | 3,90 | 4,40 | 4,89 | 5,37 | 5,84 | 6,31 | 6,78 | 8,79 | 16,91 | 25,15 | 36,14 |
| 6 | 2,18 | 2,80 | 3,34 | 3,84 | 4,33 | 4,80 | 5,27 | 5,74 | 6,20 | 6,67 | 8,66 | 16,78 | 25,03 | 36,04 |
| 7 | 2,16 | 2,77 | 3,29 | 3,78 | 4,26 | 4,72 | 5,19 | 5,65 | 6,11 | 6,57 | 8,55 | 16,67 | 24,94 | 35,96 |
| 8 | 2,15 | 2,74 | 3,25 | 3,73 | 4,19 | 4,65 | 5,11 | 5,56 | 6,02 | 6,48 | 8,46 | 16,58 | 24,87 | 35,90 |
| 9 | 2,13 | 2,71 | 3,20 | 3,68 | 4,13 | 4,59 | 5,04 | 5,49 | 5,94 | 6,40 | 8,38 | 16,51 | 24,81 | 35,85 |
| 10 | 2,12 | 2,68 | 3,16 | 3,63 | 4,08 | 4,55 | 4,97 | 5,42 | 5,87 | 6,33 | 8,30 | 16,45 | 24,76 | 35,81 |
| 11 | 2,10 | 2,65 | 3,13 | 3,58 | 4,03 | 4,47 | 4,91 | 5,36 | 5,81 | 6,26 | 8,24 | 16,40 | 24,71 | 35,78 |
| 12 | 2,09 | 2,62 | 3,09 | 3,54 | 3,98 | 4,42 | 4,86 | 5,31 | 5,75 | 6,20 | 8,18 | 16,35 | 24,68 | 35,75 |

## 3.2. НЕОДНОРОДНОСТИ В СИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

### РАЗОМКНУТЫЙ НА КОНЦЕ ОТРЕЗОК

Общий вид неоднородности показан на рис. 3.3, эквивалентная схема неоднородности при $b < \lambda/(2\sqrt{\varepsilon_r})$ — на рис. 3.4. Толщина полоски считается равной нулю. Коэффициент отражения в сечении $T—T$ рассчитывается по формуле [3.9]

$$S_{11} = e^{-j\varphi}, \tag{3.10}$$

где

$$\varphi = (2b\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)\ln 2 + S_1(2b\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda) - 2S_1(b\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda); \tag{3.11}$$

$$S_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty}[\arcsin(x/n) - x/n]. \tag{3.12}$$

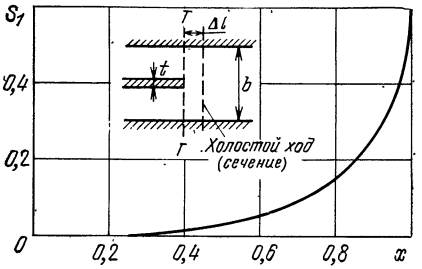



Рис. 3.3

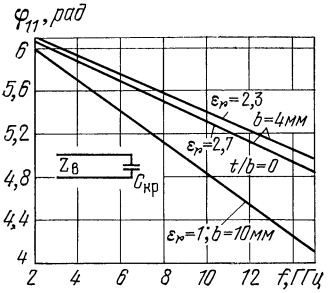



Рис. 3.4

График функции $S_1(x)$ приведен на рис. 3.3. При $2b/\lambda \ll 1$ формула (3.11) упрощается:

$$\varphi \approx (2b\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)\ln 2. \tag{3.13}$$

Концевую емкость удобно учитывать, вводя эквивалентное удлинение СПЛ

$$\Delta l = \lambda\varphi/(4\pi\sqrt{\varepsilon_r}). \tag{3.14}$$

Формулы (3.10), (3.11) получены в рамках модели Олинера и верны для линий с $Z_в < 100$ Ом. На рис. 3.4 приведена зависимость $\varphi$ для линий с различными $\varepsilon_r$.

### ПОВОРОТ ПОЛОСКИ

Поворот СПЛ на некоторый угол осуществляется с помощью изгиба центральной полоски. Различают поворот в виде единичного излома (рис. 3.6) и с согласующим зеркалом (рис. 3.5).

**Поворот в виде излома.** Эквивалентная схема неоднородности представлена на рис. 3.10. Отсчетные плоскости $T_1—T_1$, $T_2—T_2$ (рис. 3.6) сдвинуты на расстояние $(w_{эф} - w)/2\,\mathrm{tg}\,(\theta/2)$. Параметры эквивалентной схемы описываются выражениями [3.9]

$$\frac{X_a}{Z_в} = 2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda\,\{\psi[-1/2(1-\theta/\pi)] - \psi(-1/2)\};$$
$$\frac{X_b}{Z_в} = \frac{\lambda/w_{эф}}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}}\,\mathrm{ctg}\,\frac{\theta}{2}, \tag{3.15}$$

где

$$\psi(x) = -0{,}57722 + x\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n(n+x)}.$$

График функции $\psi(x)$ приведен на рис. 3.5. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются в соответствии с эквивалентной схемой по формулам, приведенным в § 5.2. Формулы (3.15) получены в рамках модели Олинера и верны при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda < 1$. На рис. 3.6—3.9 приведены зависимости от частоты модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ и его фазы для СПЛ с различными $Z_в$ и $\varepsilon_r$, рассчитанные по формулам, приведенным в § 5.2, для разных углов $\theta$. Величину $|S_{12}|$ можно найти как $|S_{12}| = \sqrt{1 - |S_{11}|^2}$, а $\varphi_{12} = \varphi_{11} + \pi/2$. На рис. 3.10—3.13 приведены аналогичные зависимости параметров эквивалентной схемы, рассчитанных по формулам (3.15).

**Поворот на 90° с согласующим зеркалом.** Общий вид поворота и его эквивалентная схема показаны на рис. 3.14, 3.15. Зависимости параметров эквивалентной схемы такого поворота для $2\pi w_{эф}/\lambda = (0{,}2 \ldots 0{,}65)\,\pi$ от параметров зерка-

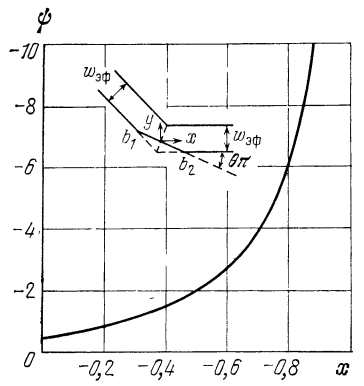



Рис. 3.5

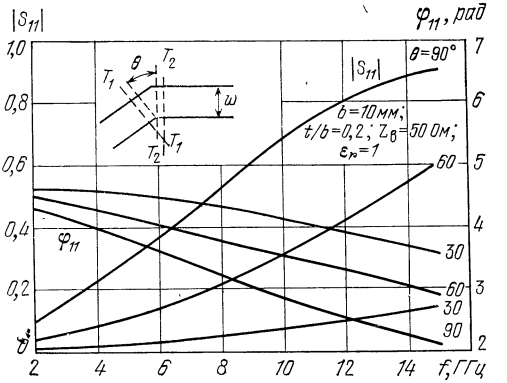



Рис. 3.6

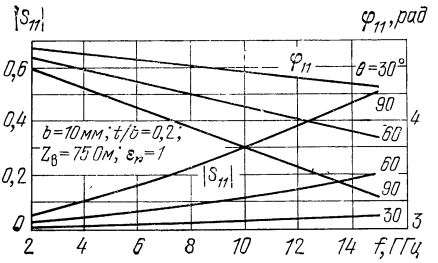



Рис. 3.7

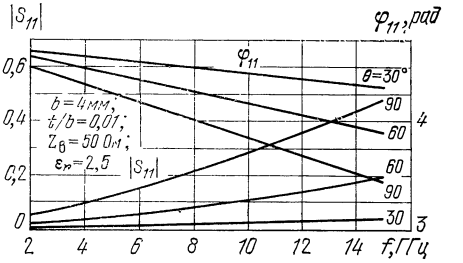



Рис. 3.8

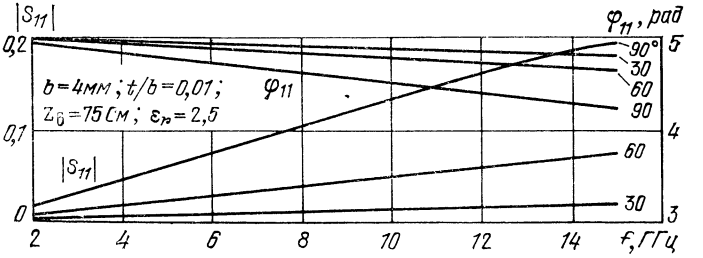



Рис. 3.9

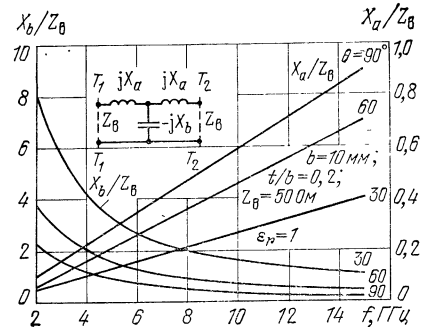



Рис. 3.10

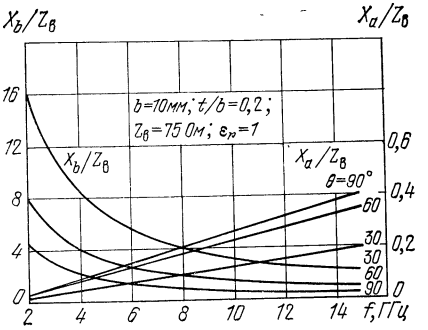



Рис. 3.11

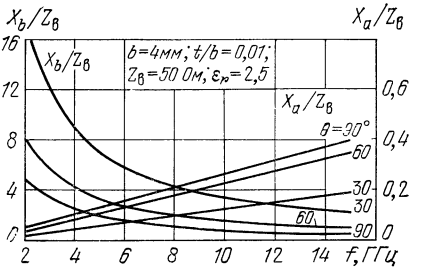



Рис. 3.12

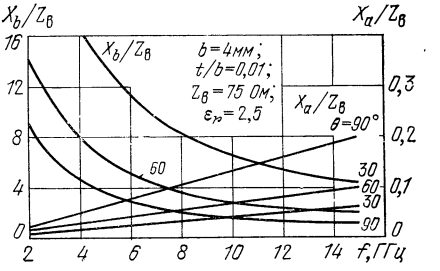



Рис. 3.13

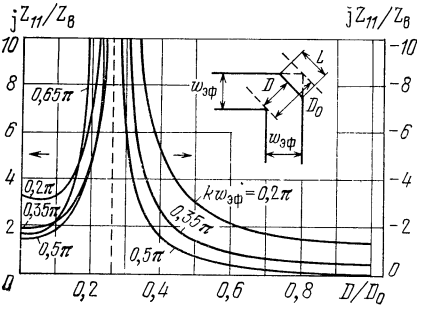



Рис. 3.14

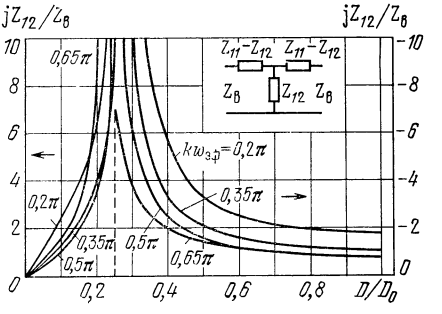



Рис. 3.15

ла получены в результате численного анализа на ЭВМ [3.12] и представлены на рис. 3.14, 3.15. Зависимость $K_{ст\,U}$ $(D/D_0)$ построена на рис. 3.16. Как видно из рисунка, минимум $K_{ст\,U}$ достигается при $D/D_0 = 0{,}62 \ldots 0{,}63$.

**Поворот на произвольный угол с согласующим зеркалом.** Общий вид такого поворота показан на рис. 3.5. Коэффициент отражения описывается выражением [3.13, 3.14]

$$S_{11} = -\frac{j\nu}{2}\int_{-\infty}^{\infty} a_0'(v)\,e^{-2j\nu v}\,dv - \frac{j\nu^3}{4}\sum_{m=0}^{\infty}\frac{1}{\varepsilon_m\gamma_m}\int_{-\infty}^{\infty} a_m(v_0)\,dv_0\int_{-\infty}^{\infty} a_m(v)\times$$

$$\times e^{-j\nu(v+v_0)-j(v-v_0)\gamma_m}\,dv, \qquad (3.16)$$

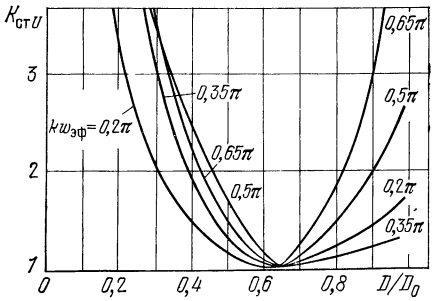



Рис. 3.16

где $\nu = 2w_{эф}/\lambda$;

$$\gamma_m = j w_{эф}/\pi \sqrt{k^2 - (m\pi/w_{эф})^2};$$

$\varepsilon_m = 1$ при $m = 0$ и 2 при $m \geqslant 1$;

$$a_m(v) = \frac{\varepsilon_m}{\pi} \int_0^{\pi} \{(\operatorname{ch} v + \cos\varphi)^{2\theta} / [\operatorname{ch}(v-\tau) - \cos\varphi]^{\theta} [\operatorname{ch}(v+\tau) - \cos\varphi]^{\theta} - 1\} \cos(m\varphi)\, d\varphi.$$

Параметр $\tau$ находится из трансцендентного уравнения

$$\frac{|b_1 - b_2|}{2w_{эф}} = \frac{\Gamma(1-\theta)}{\sqrt{\pi}\,\Gamma(1,5-\theta)} (1-d^2)^{\theta} d^{1-2\theta} F\left(1, \frac{1}{2}, \frac{3}{2} - \theta, d^2\right),$$

где $\Gamma(z)$ — гамма-функция; $d = \operatorname{th}\tau/2$; величина $\theta$ показана на рис. 3.5; $F(\alpha, \beta, \gamma, \xi)$ — гипергеометрическая функция. Выражение (3.16) получено в рамках модели Олинера.

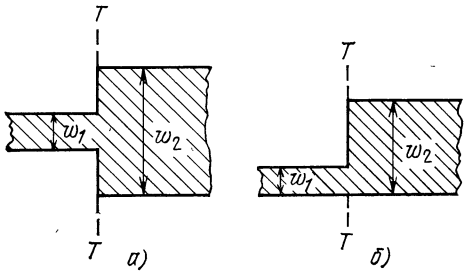
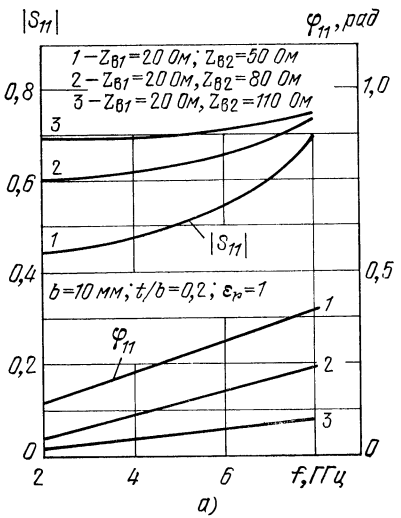
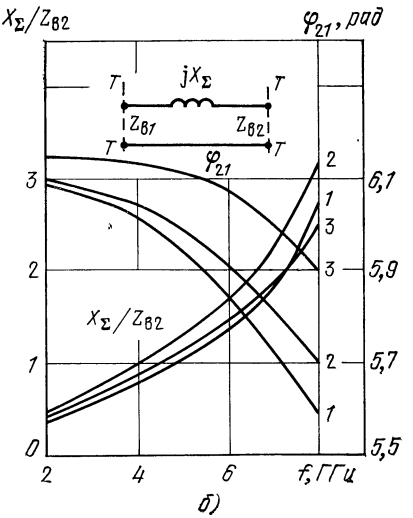



Рис. 3.17

Рис. 3.18



## СКАЧОК ШИРИНЫ ПОЛОСКИ

Форма центральной полоски для двух различных случаев показана на рис. 3.17, *а*, *б*. Реактивность в месте стыка связана с искажениями поля вблизи неоднородности. На рис. 3.18, *б* приведена эквивалентная схема неоднородности. Отсчетная плоскость $T—T$ совпадает с сечением, где полоска расширяется. Параметры эквивалентной схемы для скачка на рис. 3.17, *а* рассчитываются по следующим формулам [3.8]:

$$X_\Sigma/Z_{в1}=X_1/Z_{в1}+X_2/Z_{в1}, \tag{3.17}$$

где

$$\frac{X_1}{Z_{в1}}=\frac{w_{эф1}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left\{2\ln\frac{w_{эф2}^2-w_{эф1}^2}{4w_{эф1}w_{эф2}}+\left(\frac{w_{эф2}}{w_{эф1}}+\frac{w_{эф1}}{w_{эф2}}\right)\ln\frac{w_{эф2}+w_{эф1}}{w_{эф2}-w_{эф1}}+\right.$$

$$\left.+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin^2(nx)/x^2}{n^3}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon_r\pi^2w_{эф2}^2/n^2\lambda^2}}-1\right]\right\}; \tag{3.18}$$

$$x=\pi w_{эф1}/w_{эф2},$$

$$\frac{X_2}{Z_{в1}}=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\left[\frac{w_{эф1}}{w_{эф2}}-\left(\frac{w_{эф1}}{w_{эф2}}\right)^2\right]\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}. \tag{3.19}$$

Для скачка на рис. 3.17, *б* величины $w_{эф1}$, $w_{эф2}$ заменяются на $2w_{эф1}$, $2w_{эф2}$; $\varphi$ — фаза коэффициента отражения в линии шириной $w_э$, разомкнутой

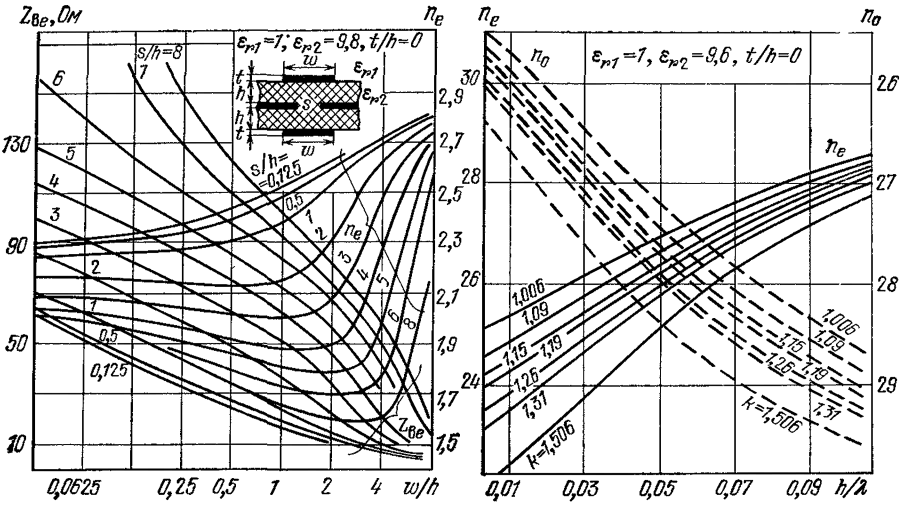



Рис. 3.19

вой емкости. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются в соответствии с эквивалентной схемой по формулам (см. § 5.2). Выражения (3.18), (3.19) получены в рамках модели Олинера и верны при условии $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda<1$. На рис. 3.18, 3.19 приведены зависимости от частоты элемента $S_{11}$ матрицы рассеяния и параметров эквивалентной схемы для разных перепадов волновых сопротивлений (см. рис. 3.17, *а*) и диэлектрического заполнения.

## ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ШТЫРЬ

Общий вид неоднородности (вид сверху) и эквивалентная схема показаны на рис. 3.20. Отсчетная плоскость совмещена с центром штыря. Индуктивное сопротивление штыря в СПЛ рассчитывается по формуле [3.11]

$$\frac{X_a}{Z_в} \approx \frac{w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left\{\ln\frac{2w_{эф}}{\pi r} + 2\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{1}{\sqrt{m^2-4\varepsilon_r w_{эф}^2/\lambda^2}} - \frac{1}{m}\right]\cos^2\frac{m\pi}{2}\right\}. \quad (3.20)$$

Толщина центрального проводника СПЛ учтена в $w_{эф}$ (формула (3.4)). Элементы матрицы рассеяния рассчитываются в соответствии с формулами, приведен-

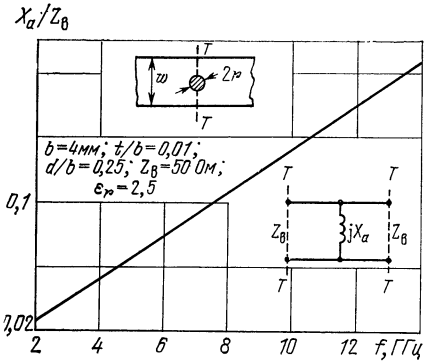



Рис. 3.20

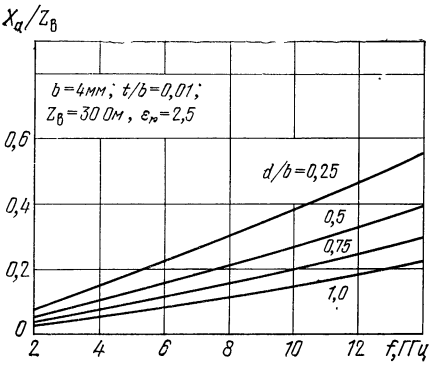



Рис. 3.21

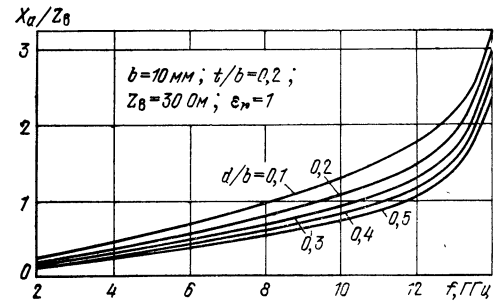



Рис. 3.22

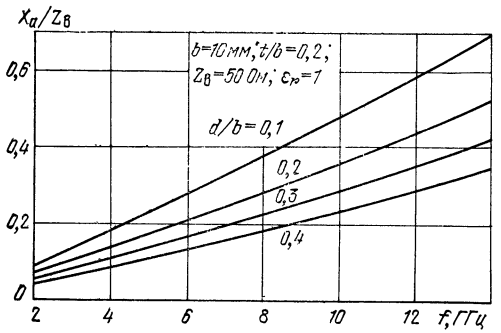



Рис. 3.23

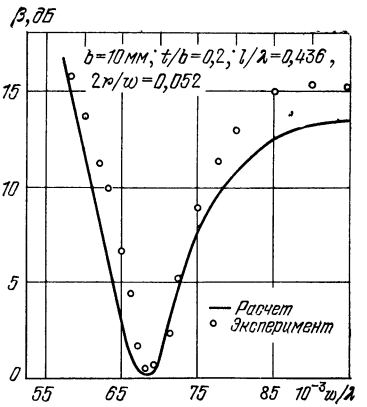



Рис. 3.24

ными в гл. 5. Выражение (3.20) получено в рамках модели Олинера и верно при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda < 1$ и $2r/w \leqslant 0{,}25$. На рис. 3.20—3.23 приведены зависимости от частоты элементов матрицы рассеяния и величины $X_a/Z_в$ для штырей разного диаметра и линий с различными $\varepsilon_r$. На рис. 3.24 представлены расчетная и экспериментальная частотные характеристики переходного затухания проходного полуволнового резонатора в СПЛ с индуктивными штырями.

## ОТВЕРСТИЕ В ПОЛОСКЕ

Общий вид неоднородности показан на рис. 3.25, *а*. Эквивалентная схема неоднородности, изображенная на рис. 3.25, *б*, получена в предположении, что взаимодействием краевых полей центральной полоски можно пренебречь.

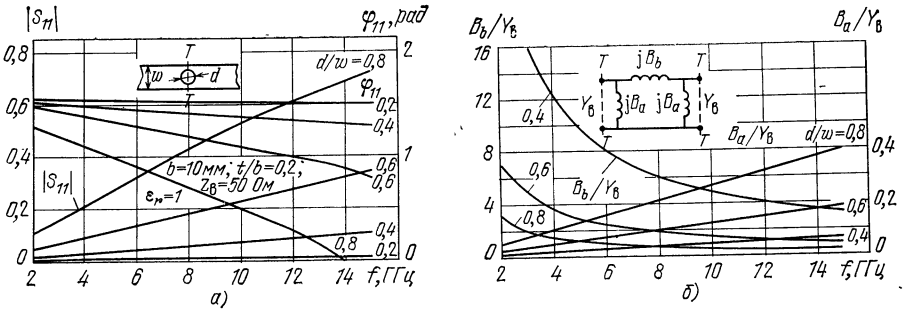



Рис. 3.25

Отсчетная плоскость $T—T$ расположена, как показано на рис. 3.25, *а*. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.13]

$$B_a Z_в = 16\sqrt{\varepsilon_r}\, d^3/(3\pi\lambda b w_{эф});$$

$$B_b Z_в = 3 b w_{эф}\lambda/(\pi^3\sqrt{\varepsilon_r} d^3). \qquad (3.21)$$

Если отсчетные плоскости смещены к краям отверстия, то параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.1]:

$$B_a Z_в = \frac{1+(B'_a Z_в)\operatorname{ctg}(\pi d\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)}{\operatorname{ctg}(\pi d\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)-(B'_a Z_в)};$$

$$B_b Z_в = \frac{1}{2}\left[\frac{1+2(B'_b Z_в)\operatorname{ctg}(\pi d\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)}{\operatorname{ctg}(\pi d\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)-2(B'_b Z_в)} - \operatorname{tg}\left(\frac{2b\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\ln 2\right)\right], \qquad (3.22)$$

где

$$B'_b Z_в = -\frac{3}{4\pi}\,\frac{\lambda b w_{эф}}{\sqrt{\varepsilon_r}\, d^3}; \quad B'_a Z_в = \frac{1}{4B'_b Z_в}.$$

Элементы матрицы рассеяния неоднородности рассчитываются по формулам (см. § 5.2). Формулы (3.21), (3.22) получены в рамках модели Олинера и верны при $b < \lambda/(2\sqrt{\varepsilon_r})$. На рис. 3.25 построены зависимости от частоты элемента $S_{11}$ и параметров эквивалентной схемы, рассчитанных по формулам (3.21). Величина $|S_{12}| = \sqrt{1-|S_{11}|^2}$, а $\varphi_{12} = \varphi_{11} + (3/2)\pi$.

## Т-СОЧЛЕНЕНИЕ

Т-сочленение СПЛ представляет собой сочленение трех проводников под прямым углом (рис. 3.26, *а*). Одна из возможных эквивалентных схем неоднородности представлена на рис. 3.26, *б*. Плоскости отсчета $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$,

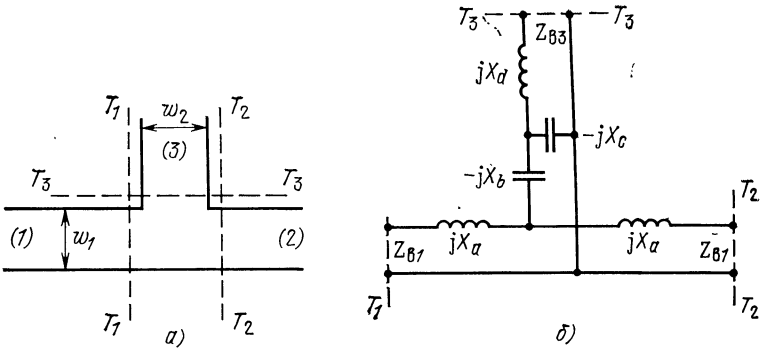



Рис. 3.26

$T_3$—$T_3$ (см. рис. 3.26, *а*) сдвинуты от проводников соответственно на расстояние $(w_{эф2} - w_2)/2$; $(w_{эф1} - w_1)/2$. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по следующим формулам [3.9]:

$$\frac{X_a}{Z_{в1}} = \frac{2w_{эф2}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left(\operatorname{arctg}\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha}\ln\sqrt{1+\alpha^2}\right); \quad \frac{X_c}{Z_{в1}} = \frac{1}{2\pi}\,\frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_r}\,w_{эф2}}; \tag{3.23}$$

$$\frac{X_b}{Z_{в1}} = \frac{X_a}{2Z_{в1}} - \frac{w_{эф1}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left(\frac{\pi\alpha}{3} + A_1\right); \quad \frac{X_d}{Z_{в1}} = w_{эф1}\,\frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left(\frac{\pi}{3\alpha} + A_2\right),$$

где

$$A_1 = -\frac{2\alpha}{\pi}\exp\left[-\frac{2\operatorname{arctg}\alpha}{\alpha}\right]\left\{1 + \frac{5+\alpha^2}{4(1+\alpha^2)}\exp\left[-\frac{2\operatorname{arctg}\alpha}{\alpha}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{9}\left[\frac{4}{1+\alpha^2} + \left(\frac{5+\alpha^2}{1+\alpha^2}\right)^2\right]\exp\left(-\frac{4\operatorname{arctg}\alpha}{\alpha}\right)\right\}; \tag{3.24}$$

$$A_2 = -A_1 + 2\left(\alpha\operatorname{arctg}\frac{1}{\alpha} + \frac{\operatorname{arctg}\alpha}{\alpha} + \ln\frac{1+\alpha^2}{4\alpha} - \pi\,\frac{1+\alpha^2}{6\alpha}\right);$$

$$\alpha = Z_{в1}/(2Z_{в3}). \tag{3.25}$$

Толщина центральной полоски входит в выражение для $w_{эф}$. Зависимость $A$ и $A_2$ от параметра $\alpha$ представлена на рис. 3.27. Элементы матрицы рассеяния Т-сочленения определяются с помощью формул [3.8]

$$\begin{gathered} S_{11} = 1 - [2(1+z_{11})(1+z_{33}) - 2z_{13}^2]/D; \\ S_{12} = -2[z_{12}(1+z_{33}) + z_{13}^2]/D; \\ S_{13} = -2[z_{12}z_{13} + z_{13}(1+z_{11})]/D; \quad S_{22} = S_{11}; \\ S_{33} = 1 - 2[(1+z_{11})^2 - z_{12}^2]/D, \end{gathered} \tag{3.26}$$

где $D = (1 + z_{11})[(1 + z_{11})(1 + z_{33}) - z_{13}^2] - z_{12}[z_{12}(1 + z_{33}) + z_{13}^2] - z_{13}^2 \times$
$\times (z_{12} + z_{11} + 1)$; $z_{13} = -jX_c/Z_{в1}$; $z_{33} = -j(X_c - X_d)/Z_{в1}$; $z_{12} = -j \times$
$\times (X_b + X_c)/Z_{в1}$; $z_{11} = -j(-X_a + X_b + X_c)/Z_{в1}$.

Иногда оказывается удобной эквивалентная схема Т-сочленения, изображенная на рис. 3.28, *б*. Плоскость $T_1$—$T_1$ совмещена с плоскостью симметрии

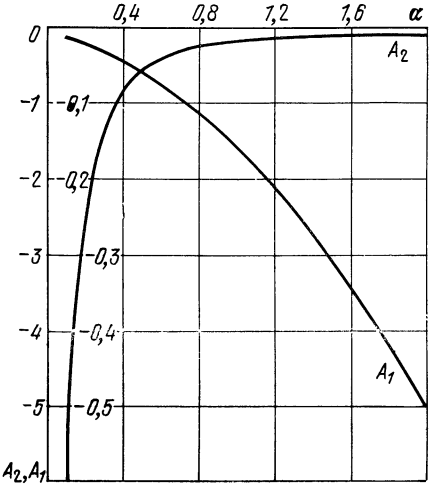
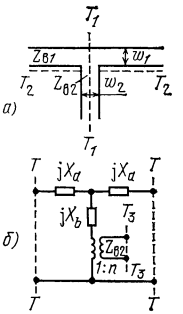



Рис. 3.27

Рис. 3.28




Т-сочленения, плоскость $T_2$—$T_2$ сдвинута вдоль (рис. 3.28, *а*) поперечного проводника на $(w_{эф1} - w_1)/2$. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по следующим формулам [3.1]:

$$\frac{X_a}{Z_{в1}} = -\frac{w_{эф2}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left(\frac{n\pi}{4}\right)^2; \tag{3.27}$$

$$\frac{X_b}{Z_{в1}} = -\frac{X_a}{2Z_{в1}} + \frac{2w_{эф1}\sqrt{\varepsilon_r}}{n^2\lambda}\left[\ln\left(\frac{1{,}4w_{эф1}}{w_{эф2}}\right) + 2\left(\frac{w_{эф1}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\right)^2\right],$$

где $n = \sin\theta/\theta$ и $\theta = \pi w_{эф2}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda$.

Формулы (3.23)—(3.27) получены в рамках модели Олинера и верны при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda < 1$. На рис. 3.29, 3.30 приведены зависимости от частоты элементов матрицы рассеяния, рассчитанные по формулам (3.23)—(3.26) для линий с различным $\varepsilon_r$ при $w_1 = w_2$ и различных значениях волнового сопротивления подводящих линий.

## Y-СОЧЛЕНЕНИЕ

Общий вид Y-сочленения, представляющего собой соединение трех полосок обычно равной ширины под углом 120°, показан на рис. 3.31. Плоскости отсчета $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$, $T_3$—$T_3$ (рис. 3.31) сдвинуты на расстояние $(w_{эф} - w) : (2\sqrt{3})$. Эквивалентная схема неоднородности приведена на рис. 3.34. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам из [3.9, 3.10]

$$X_a/Z_в \approx 1{,}29 w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda; \quad X_b/Z_в \approx 1{,}42\,(X_a/Z_в)^{-1}. \tag{3.28}$$

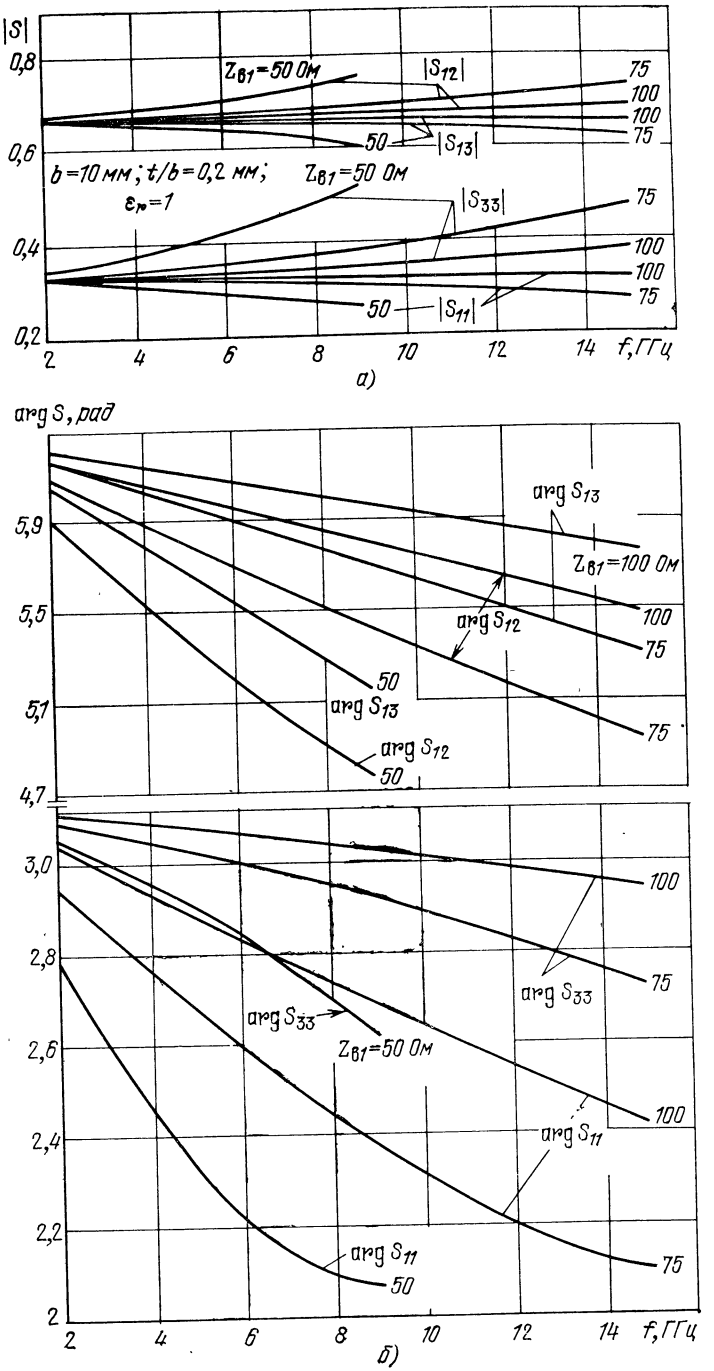

|S|
0,8
0,6
0,4
0,2
Z61=50 Ом
|S12|
75
100
100
75
50
|S13|
b=10 мм; t/b=0,2 мм;
εr=1
Z61=50 Ом
|S33|
75
100
100
75
50
|S11|
2
4
6
8
10
12
14
f, ГГц
а)
arg S, рад
5,9
5,5
5,1
4,7
arg S13
Z61=100 Ом
100
arg S12
75
50
arg S13
75
arg S12
50
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
2
100
75
arg S33
arg S33
Z61=50 Ом
100
arg S11
75
arg S11
50
2
4
6
8
10
12
14
f, ГГц
б)

Рис. 3.29

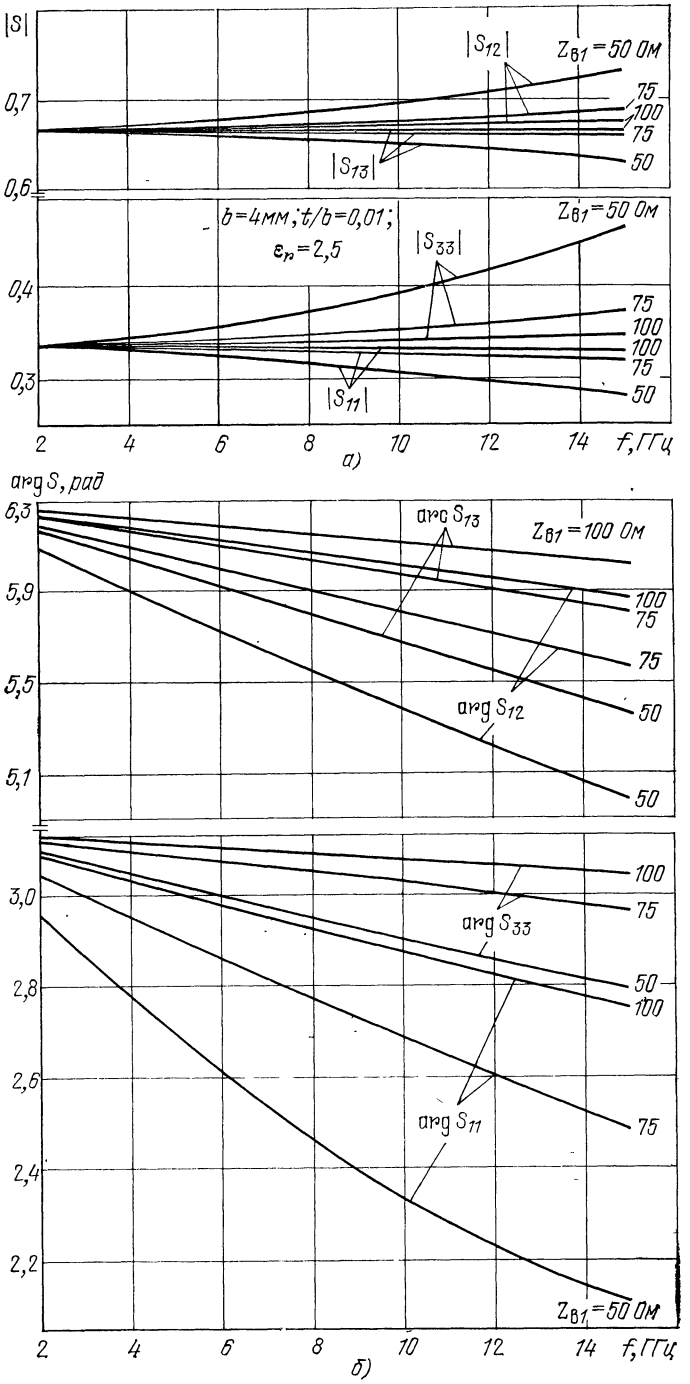

|S|
0,7
0,6
0,4
0,3
|S12|
Z81=50 Ом
75
100
75
50
|S13|
b=4мм; t/b=0,01;
εr=2,5
|S33|
Z81=50 Ом
75
100
100
75
50
|S11|
2
4
6
8
10
12
14
f, ГГц
а)
arg S, рад
6,3
5,9
5,5
5,1
arg S13
Z81=100 Ом
100
75
75
50
arg S12
50
3,0
2,8
2,6
2,4
2,2
100
75
arg S33
50
100
arg S11
75
Z81=50 Ом
2
4
6
8
10
12
14
f, ГГц
б)

Рис. 3.30

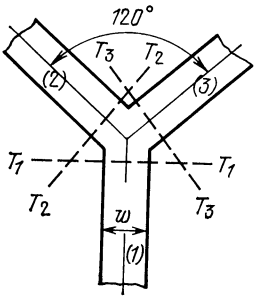



Рис. 3.31

Толщина проводников входит в величину $w_{эф}$. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формулам

$$S_{11} = 1 - 2\,[(1 + z_{11})^2 - z_{12}^2]/D;$$
$$S_{12} = 2\,[z_{12}\,(1 + z_{11}) - z_{12}^2]/D, \qquad (3.29)$$
$$S_{22} = S_{33} = S_{11};$$
$$S_{13} = S_{21} = S_{23} = S_{31} = S_{32} = S_{12},$$

где $D = (1 + z_{11})^3 + 2z_{12}^3 - 3z_{12}^2\,(1 + z_{11})$,

$$z_{11} = -\,\mathrm{j}\,(-X_a + X_b/3)/Z_в;$$
$$z_{12} = -\,\mathrm{j}X_b/Z_в.$$

Формулы (3.28) получены в рамках модели Олинера и верны при $2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda < 1$. На рис. 3.32—3.35 приведены частотные зависимости элементов матрицы рас-

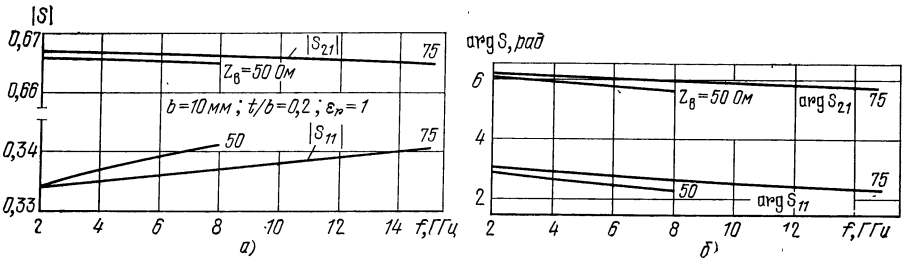



Рис. 3.32

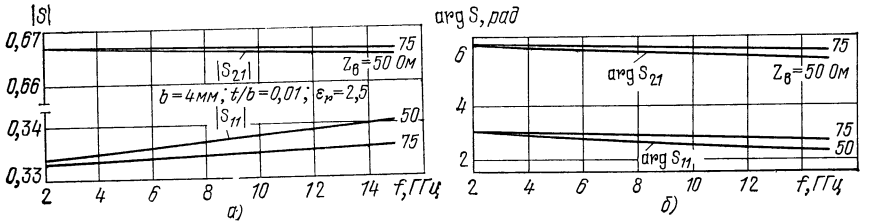



Рис. 3.33

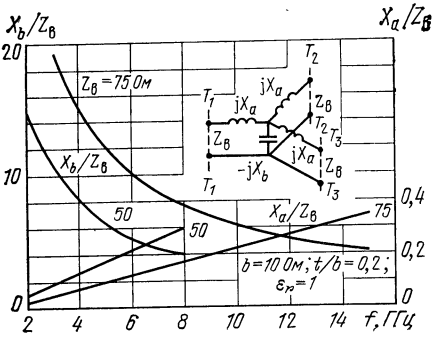



Рис. 3.34

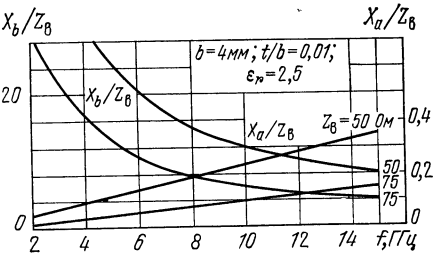



Рис. 3.35

сеяния и параметров эквивалентных схем, рассчитанных для линий с различными $\varepsilon_r$ и $Z_в$. В приближении теории длинных линий матрица рассеяния Y-сочленения

$$[S]=\frac{1}{1+y_2+y_3}\begin{bmatrix}1-y_2-y_3 & 2\sqrt{y_2} & 2\sqrt{y_3}\\ 2\sqrt{y_2} & -1+y_2-y_3 & 2\sqrt{y_2 y_3}\\ 2\sqrt{y_3} & 2\sqrt{y_2 y_3} & -1-y_2+y_3\end{bmatrix}, \qquad (3.30)$$

где

$$y_2=y_{в2}/y_{в1};\quad y_3=y_{в3}/y_{в1}.$$

Плоскость отсчета находится в геометрическом центре сочленения.

## X-СОЧЛЕНЕНИЕ

Общий вид X-сочленения представлен на рис. 3.36, *а*, приближенная эквивалентная схема для одинаковой ширины подводящих проводников — на рис. 3.36,*б*. Плоскости отсчета сдвинуты на $(w_{эф} - w)/2$ (рис. 3.47). Параметры эквивалентной схемы определяются с помощью выражений, приведенных ранее (см. Т-сочленение). Элементы матрицы рассеяния определяются с помощью выражения [3.32]

$$[S]=([Z]-[I])([Z]+[I])^{-1}, \qquad (3.31)$$

где

$$[Z]=\begin{bmatrix}z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14}\\ z_{12} & z_{22} & z_{14} & z_{12}\\ z_{13} & z_{14} & z_{22} & z_{12}\\ z_{14} & z_{13} & z_{12} & z_{11}\end{bmatrix}, \qquad (3.32)$$

$$z_{12}=z_{13}=z_{14}=-\mathrm{j}X_c/Z_в;\ z_{11}=z_{22}=\mathrm{j}\,(X_a-2X_c)/(2Z_в);$$

$[I]$ — единичная матрица.

При равенстве ширины противолежащих проводников (рис. 3.37, *а*) и $w_1 \neq w$ эквивалентная схема приведена на рис. 3.37, *б*. Отсчетная плоскость $T_0$—$T_0$ совпадает со средней линией полоски $w_1$, а плоскости $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$ сдвинуты на $(w_{эф} - w)/2$. Параметры эквивалентной схемы (рис. 3.37, *б*) рассчитываются по формулам [3.1]

$$\frac{X_a}{Z_в}=-\frac{w_{эф1}\pi^2 n^2\sqrt{\varepsilon_r}}{w_{эф}\,16\lambda}; \qquad (3.33)$$

$$\frac{X_b}{Z_в}=-\frac{X_a}{4Z_в}+\frac{w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda}\left[0{,}69+\ln\operatorname{cosec}\frac{\pi w_{эф1}}{2w_{эф}}+\right.$$
$$\left.+\frac{\pi w_{эф1}}{6w_{эф}}+1{,}5\left(\frac{w_{эф}}{\lambda/\sqrt{\varepsilon_r}}\right)^2\right], \qquad (3.34)$$

где $n=\sin\theta/\theta$ и $\theta=\pi w_{эф1}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda$.

Формулы (3.31)—(3.34) получены в рамках модели Олинера и верны при условии $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda < 1$. На рис. 3.38, 3.39 приведены зависимости элементов матрицы рассеяния в диапазоне частот, рассчитанные по формулам (3.31)—(3.34).

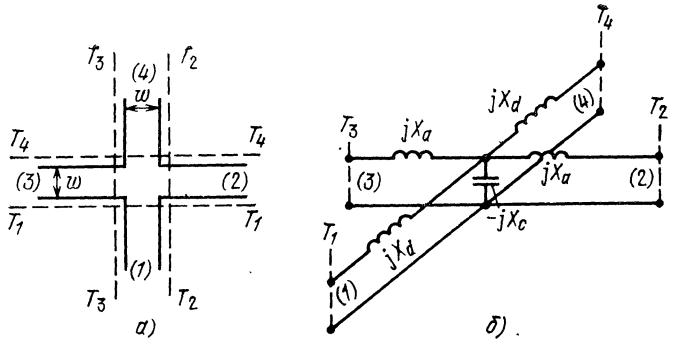



Рис. 3.36

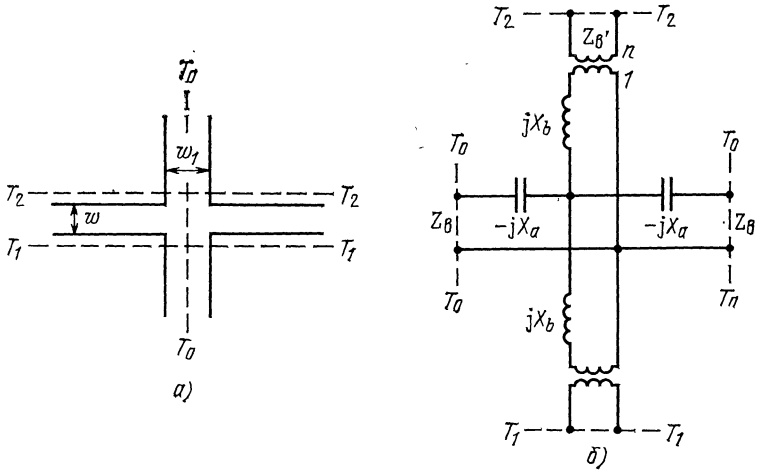



Рис. 3.37

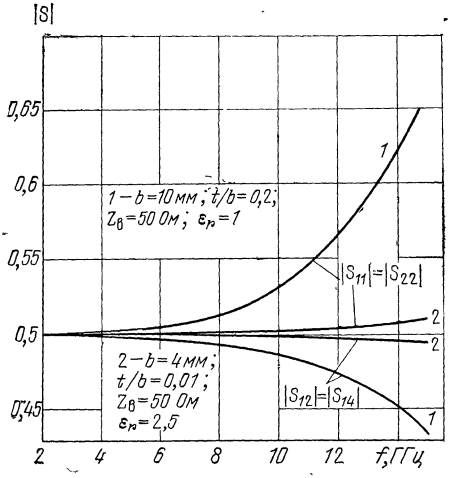



Рис. 3.38

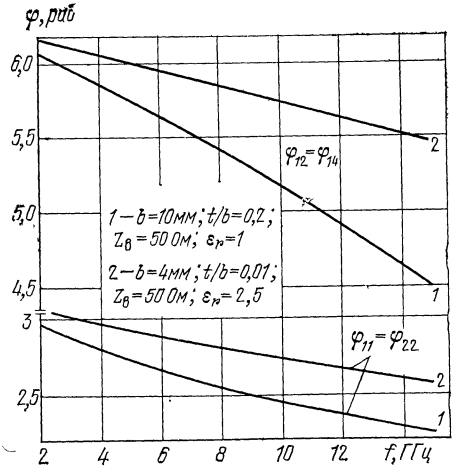



Рис. 3.39

## ЗАЗОР В ПОЛОСКЕ

Общий вид неоднородности показан на рис. 3.40. Эквивалентная схема зазора получена в предположении, что взаимодействием краевых полей полоски можно пренебречь. Отсчетная плоскость $T—T$ находится в центре зазора, параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.2]

$$\frac{B_a}{Y_в} \approx -\frac{2b\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda} \ln \operatorname{ch} \frac{\pi s}{2b}; \quad \frac{B_b}{Y_в} \approx \frac{b\sqrt{\varepsilon_r}}{\lambda} \ln \operatorname{cth} \frac{\pi s}{2b}. \tag{3.35}$$

Если отсчетные плоскости смещены к краям зазора (рис. 3.41), то параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.2]

$$\frac{B_A}{Y_в} \approx \frac{1+(B_a/Y_в)\operatorname{ctg}(\pi s\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)}{\operatorname{ctg}(\pi s\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)-B_a/Y_в};$$

$$\frac{B_B}{Y_в} \approx \frac{1}{2}\left[\frac{1+(2B_b/Y_в+B_a/Y_в)\operatorname{ctg}(\pi s\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)}{\operatorname{ctg}(\pi s\sqrt{\varepsilon_r}/\lambda)-2B_b/Y_в-B_a/Y_в}\right]-\frac{B_A}{2Y_в}. \tag{3.36}$$

При $s \gg w$

$$B_A/Y_в \approx \operatorname{tg}[(2b/\lambda)\sqrt{\varepsilon_r}\ln 2].$$

Элементы матрицы рассеяния неоднородности рассчитываются по формулам (см. § 5.2). Формулы (3.35), (3.36) получены в рамках модели Олинера и верны при условии $b/2 \ll \lambda/\sqrt{\varepsilon_r}$ и одномодовом распространении в линии. На рис. 3.40, 3.41 построены зависимости $|S_{21}|$ и $\varphi_{21}$ [3.13] от отношения $s/b$ для схемы на рис. 3.40 при разных значениях $b/\lambda$. Соответственно $|S_{11}| = \sqrt{1-|S_{21}|^2}$, а $\varphi_{11} \approx \varphi_{21} - \pi/2$.

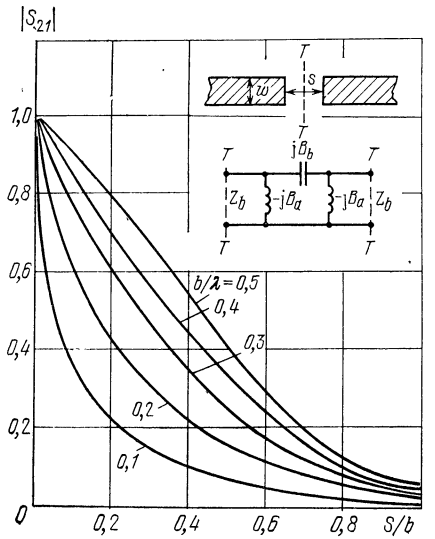



Рис. 3.40

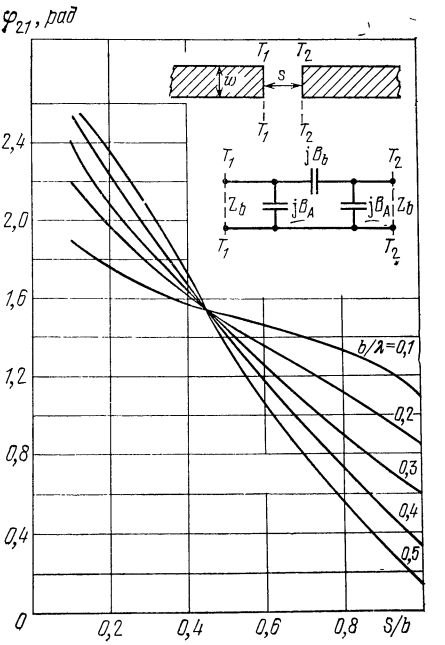



Рис. 3.41

## 3.3. НЕОДНОРОДНОСТИ В НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

### РАЗОМКНУТАЯ НА КОНЦЕ ПОЛОСКА

Общий вид разомкнутой на конце НПЛ показан на рис. 3.42. Эквивалентная схема неоднородности (рис. 3.43) состоит из параллельно включенной краевой емкости $C_{кр}$ и активного сопротивления $R_{\Sigma}$, обусловленного излучением из

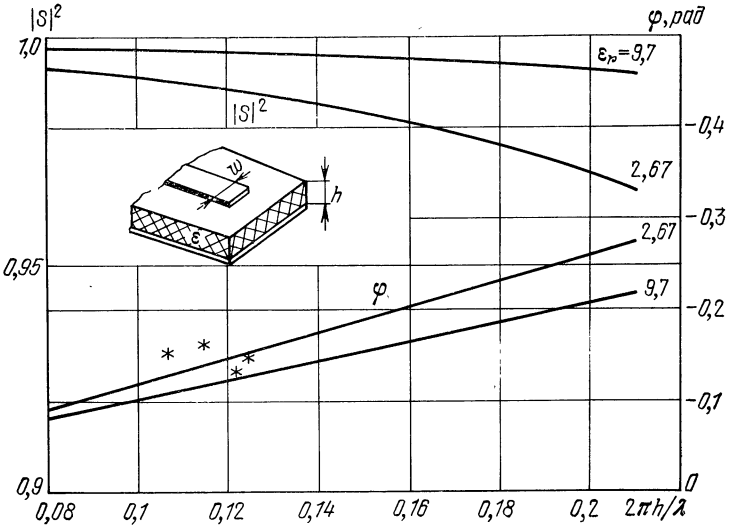



Рис. 3.42

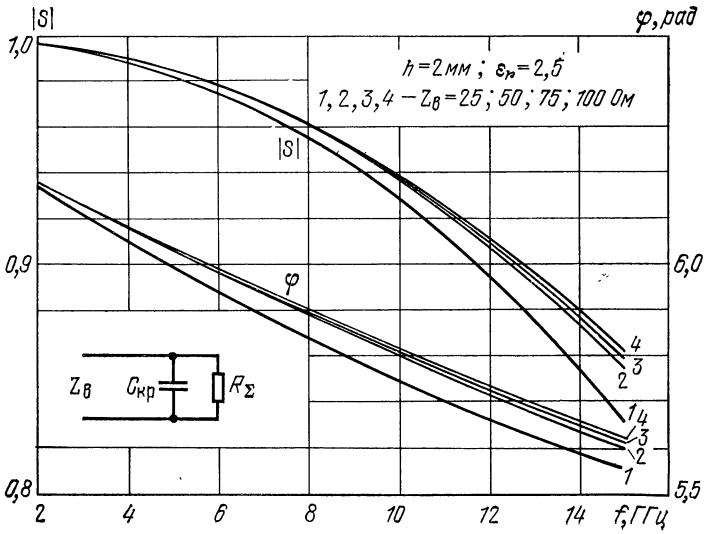



Рис. 3.43

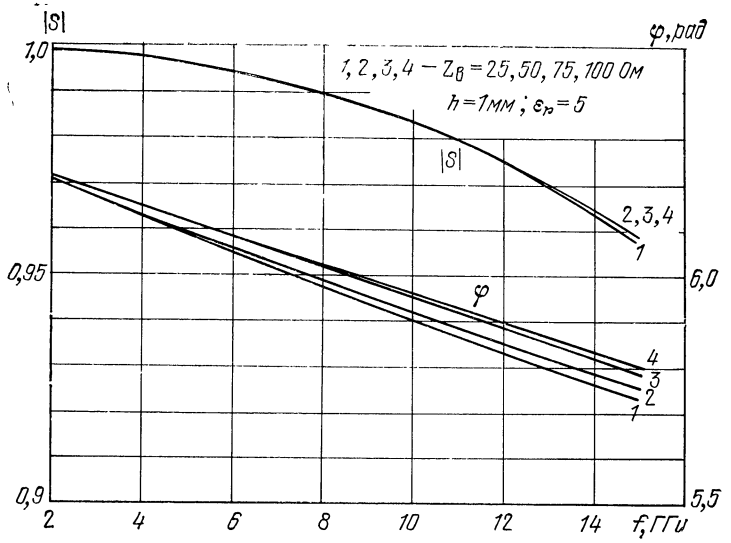



Рис. 3.44

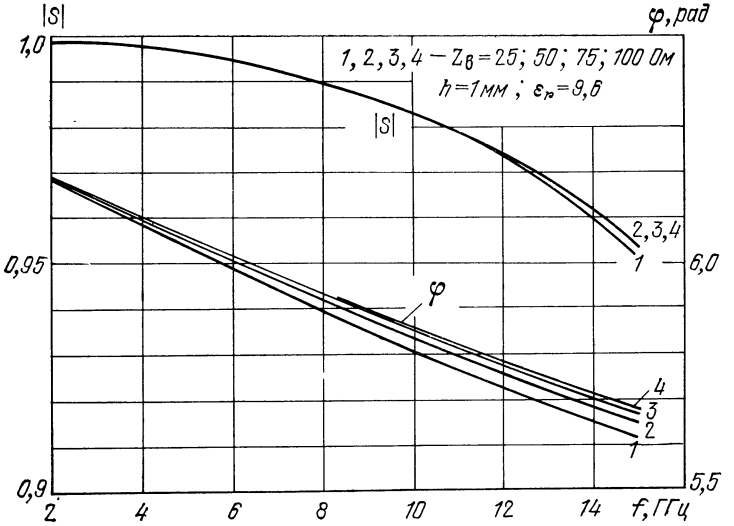



Рис. 3.45

линии и возбуждением медленной поверхностной волны в диэлектрической подложке. Коэффициент отражения с учетом излучения [3.10]

$$S_{11}=e^{-j\frac{2kh}{\pi}\ln 4}\,\frac{\dfrac{\gamma_{02}-jk}{\gamma_{02}+jk}\prod\limits_{n=1}^{\infty}\left(\dfrac{\gamma_{n2}-jk}{\gamma_{n2}+jk}\right)\exp\left\{\dfrac{j2kh}{(n-0,5)\pi}\right\}}{\dfrac{1-\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{1+\sqrt{\varepsilon_{эф}}}\prod\limits_{n=1}^{\infty}\left(\dfrac{\gamma_{n1}-jk}{\gamma_{n1}+jk}\right)\exp\left\{\dfrac{j2kh}{n\pi}\right\}}\,, \qquad (3.37)$$

где $k=2\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\lambda$; $\gamma_{n1}\approx n\pi/h$; $\gamma_{n2}\approx(n-0{,}5)\,\pi/h$; $\gamma_{02}$ — корень трансцендентного уравнения

$$\sqrt{(kh)^2-|\gamma_{02}h|^2}\,\mathrm{tg}\sqrt{(kh)^2-|\gamma_{02}h|^2}=\varepsilon_{эф}\sqrt{|\gamma_{02}h|^2-(k_0h)^2},\quad \text{где}\quad k_0=2\pi/\lambda.$$

Формула (3.37) получена в рамках модели Олинера и верна для линий с $Z_в < 100$ Ом и в одноволновом режиме. Эквивалентное удлинение линии за счет краевой емкости можно рассчитать по формуле

$$\Delta l = \varphi\lambda/(4\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}), \tag{3.38}$$

где $\varphi = \arg S_{11}$.

На рис. 3.42 приведены данные, полученные по формуле (3.37), и экспериментальные. На рис. 3.43—3.45 показаны зависимости модуля и фазы коэффициента отражения от частоты для подложек с различными $\varepsilon_r$, $Z_в$. В табл. 3.2

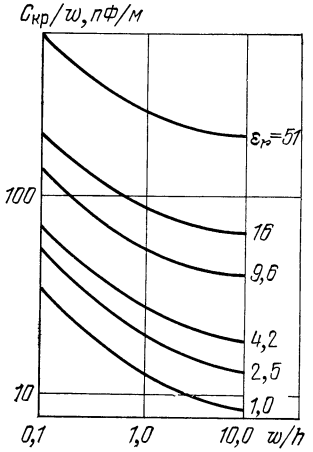



Рис. 3.46

представлено сравнение удлинения линии с $\varepsilon_r = 9{,}7$, $Z_в = 50$ Ом, рассчитанного по формулам (3.37), (3.38) и приведенного из [3.17].

Таблица 3.2

**Удлинение линии, рассчитанное по формулам (3.37), (3.38) и приведенное из [3.17]**

| $f$, ГГц | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta l$, мм, из [17] | 0,267 | 0,259 | 0,259 | 0,259 | 0,259 |
| $\Delta l$, мм, по (3.37), (3.38) | 0,197 | 0,198 | 0,218 | 0,208 | 0,198 |

Для определения краевой емкости линии (рис. 3.46) при $Z_в > 100$ Ом, пренебрегая излучением, можно воспользоваться зависимостями, полученными в

Таблица 3.3

**Коэффициенты полинома $C_i$**

| $i$ | $\varepsilon_r$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1,0 | 2,5 | 4,2 | 9,6 | 16 | 51 |
| 1 | 1,11 | 1,295 | 1,443 | 1,738 | 1,938 | 2,403 |
| 2 | —0,2892 | —0,2817 | —0,2535 | —0,2538 | —0,2233 | —0,222 |
| 3 | 0,1815 | 0,1367 | 0,1062 | 0,1308 | 0 1317 | 0,217 |
| 4 | —0,0033 | —0,0133 | —0,0260 | —0,0087 | —0,0267 | —0,024 |
| 5 | —0,054 | —0,0267 | —0,0073 | —0,0113 | —0,0147 | —0,084 |

[3.17—3.20] при решении статической задачи; ее можно также найти с помощью аппроксимационного полинома, полученного в [3.17]:

$$C_{\text{кр}}\,[\text{пФ}] = \exp\left\{\ln 10 \sum_{i=1}^{5} C_i(\varepsilon_r)\left(\log\frac{w}{h}\right)^{i-1}\right\}. \qquad (3.39)$$

Коэффициенты $C_i$ $(\varepsilon_r)$ приведены в табл. 3.3.

## ТОРЦЕВОЙ ЗАЗОР МЕЖДУ ПОЛОСКАМИ

Общий вид неоднородности показан на рис. 3.47, эквивалентная схема — на рис. 3.48. Действительная часть комплексного сопротивления $R$ связана с энергией, излученной в окружающее пространство из щели (при отсутствии экрана), мнимая — с реактивной энергией, запасенной в области зазора. Плоскости отсчета $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$ совмещены с краями разрыва. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формулам [3.13, 3.16]

$$S_{11} = S_{22} = \left[\left(1 + \frac{2\pi h}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}\right) + \text{j}\,\frac{4h}{\lambda\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}\left(0{,}577 + \ln\frac{\pi^2 s^2}{4h\lambda}\right)\right]^{-1}; \qquad (3.40)$$

$$S_{12} = S_{21} = 1/(1 + S_{11}).$$

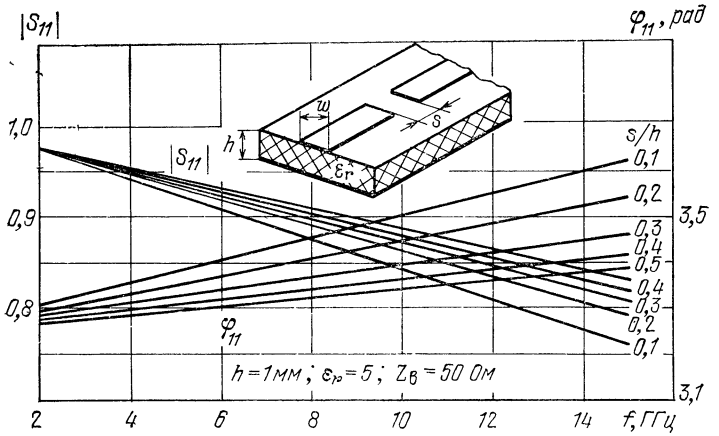



Рис. 3.47

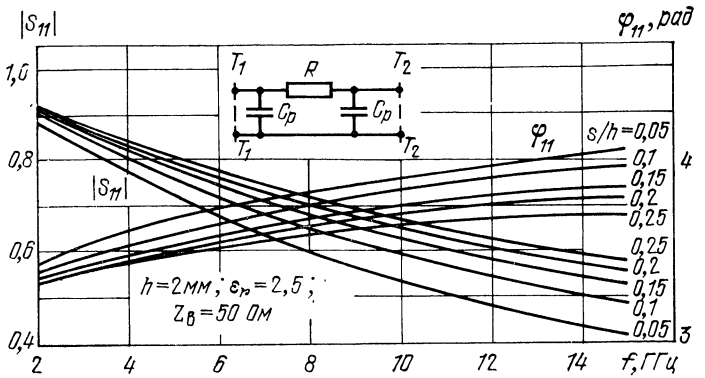



Рис. 3.48

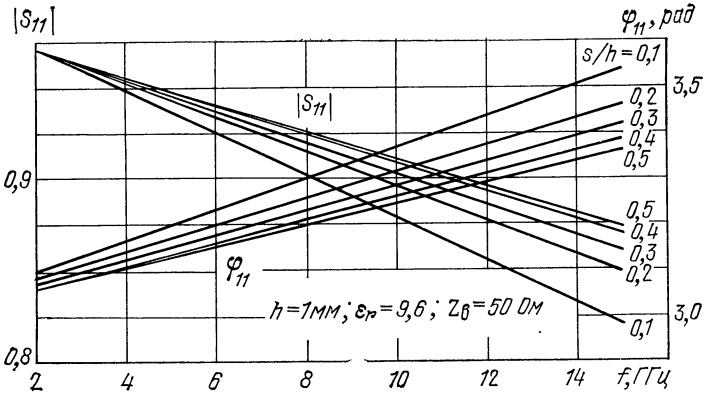



Рис. 3.49

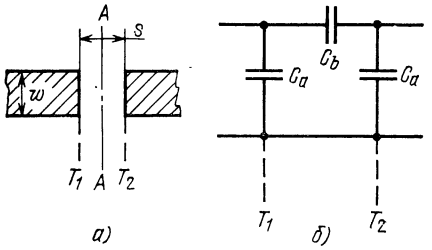



Рис. 3.50

Эквивалентная схема разрыва, если пренебречь излучением, приведена на рис. 3.50. Элементы матрицы рассеяния находятся с помощью формул (см. § 5.2). Формулы (3.40) получены в рамках модели Олинера и верны для проводников с $Z_в < 100$ Ом при $2\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}\, s/\lambda < 1$. На рис. 3.47—3.49 приведены зависимости от частоты элемента матрицы рассеяния $S_{11}$, рассчитанные по формулам (3.40) для подложек с различными $\varepsilon_r$, $Z_в$. При этом $|S_{12}| = \sqrt{1-|S_{11}|^2}$; $\varphi_{12} = \varphi_{11} + \pi/2$. Элементы матриц рассеяния (рис. 3.50) можно также рассчитать, используя параметры эквивалентной схемы. Параметры элементов, полученные численным решением статической задачи, приведены на рис. 3.51—3.53 [3.15, 3.17, 3.20].

## ПОВОРОТ ПОЛОСКИ В ВИДЕ ИЗЛОМА

**Поворот под произвольным углом.** Общий вид излома при одинаковой ширине соединяемых полосок показан на рис. 3.54, эквивалентная схема излома — на рис. 3.60. Отсчетные плоскости $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$ (см. рис. 3.54) смещены на

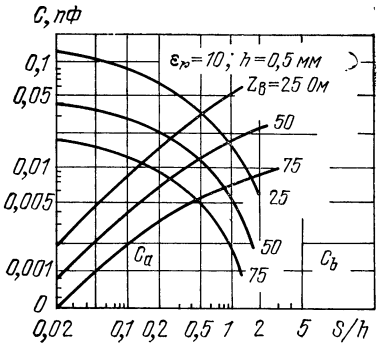



Рис. 3.51

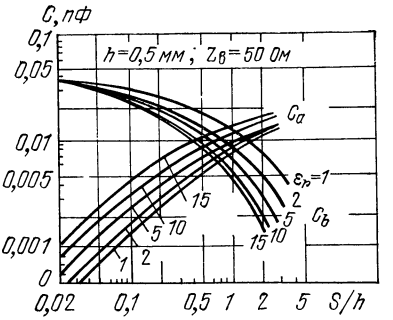



Рис. 3.52

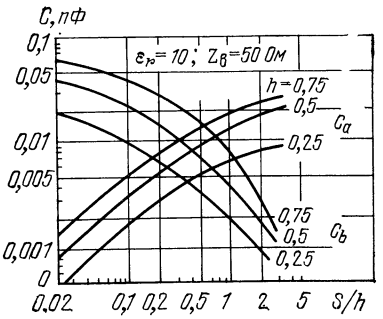



Рис. 3.53

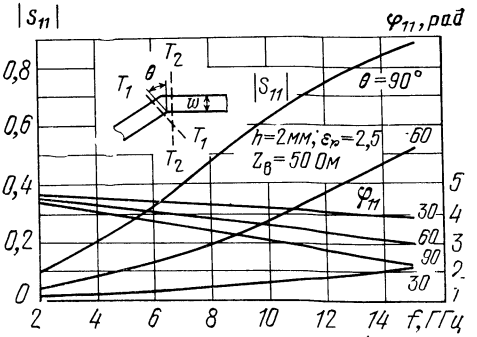



Рис. 3.54

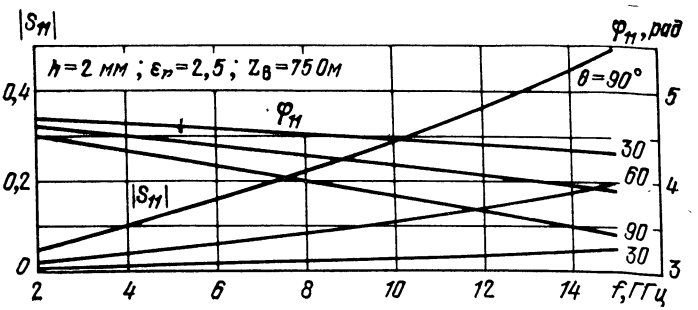



Рис. 3.55

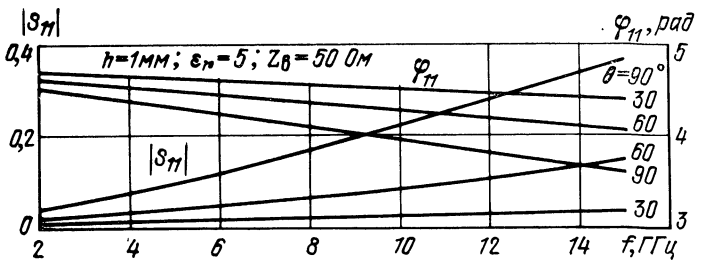



Рис. 3.56

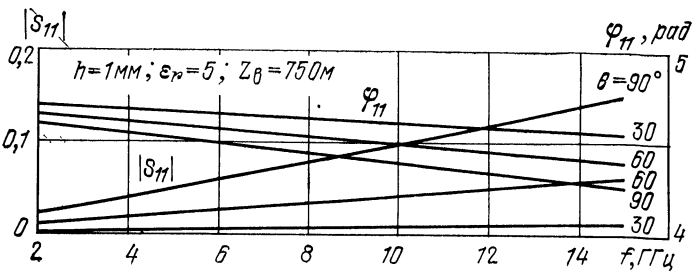



Рис. 3.57

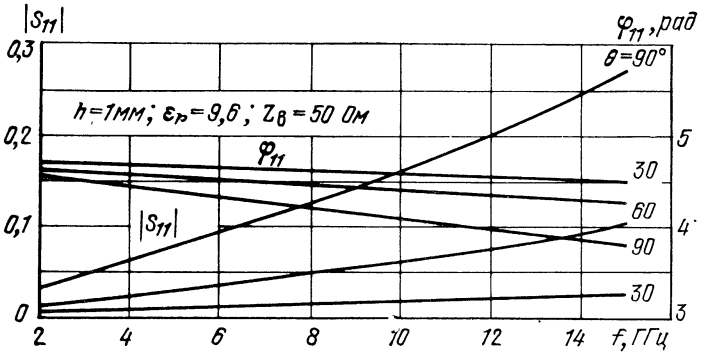



Рис. 3.58

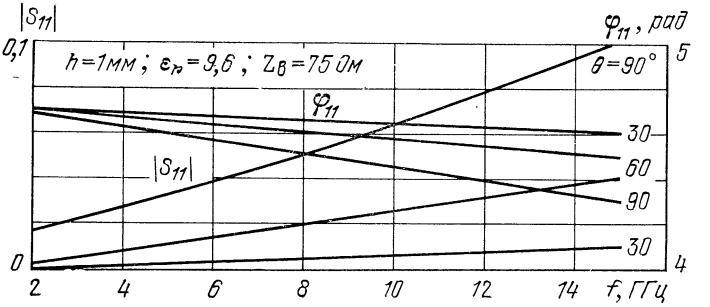



Рис. 3.59

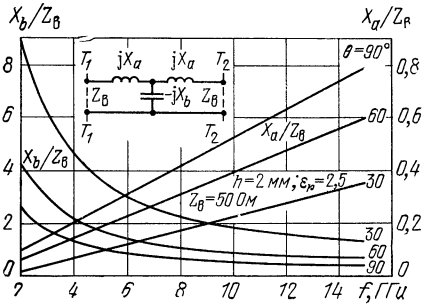



Рис. 3.60

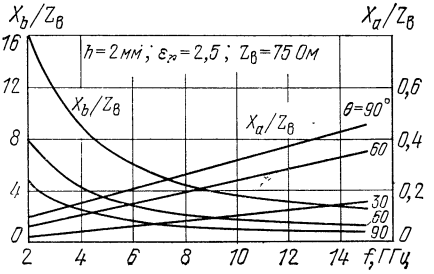



Рис. 3.61

$(w_{эф} - w)\ \mathrm{tg}\ (\theta/2)]/2$. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.9]

$$\frac{X_a}{Z_в} \approx \frac{2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{\lambda}\left\{\psi\left[-\frac{1}{2}\left(1-\frac{\theta}{\pi}\right)\right]-\psi\left(-\frac{1}{2}\right)\right\}; \qquad (3.41)$$

$$\frac{X_b}{Z_в} \approx \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}w_{эф}}\,\mathrm{ctg}\,\frac{\theta}{2}. \qquad (3.42)$$

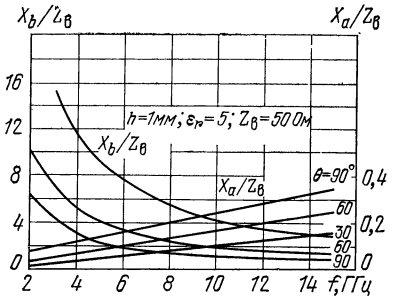



Рис. 3.62

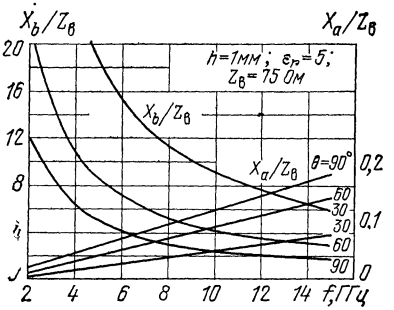



Рис. 3.63

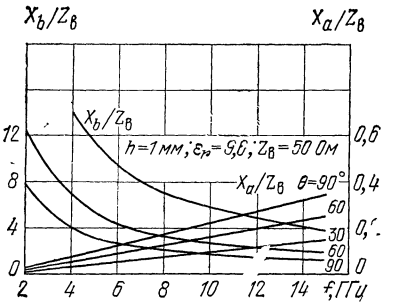



Рис. 3.64

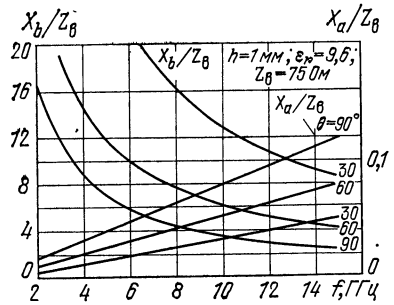



Рис. 3.65

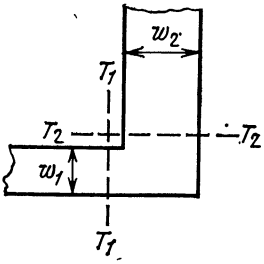



Рис. 3.66

График функции $\psi$ приведен на рис. 3.5. Элементы матрицы рассеяния находятся с помощью формул, приведенных в § 5.2. Формулы (3.41), (3.42) получены в рамках модели Олинера и верны при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\lambda < 1$ и одномодовом режиме в линии. На рис. 3.54—3.65 показаны зависимости от частоты элемента матрицы рассеяния $S_{11}$ и параметров эквивалентной схемы для подложек с различным $\varepsilon_r$; $|S_{12}| = \sqrt{1 - |S_{11}|^2}$; $\varphi_{12} = \varphi_{11} + \pi/2$.

**Поворот на 90°.** Общий вид излома при разной ширине полосок показан на рис. 3.66. Элементы матрицы рассеяния находятся с помощью следующих формул:

$$S_{11} = \frac{-(1 + j\,\mathrm{ctg}\,k_1 w_{эф2})(1 - j\,\mathrm{ctg}\,k_2 w_{эф1}) + (k_1 k_2 w_{эф1} w_{эф2})^{-1}}{(1 - j\,\mathrm{ctg}\,k_1 w_{эф2})(1 - j\,\mathrm{ctg}\,k_2 w_{эф1}) + (k_1 k_2 w_{эф1} w_{эф2})^{-1}};$$

$$S_{21} = \frac{-2j\,(k_1\sqrt{w_{эф1} w_{эф2}})^{-1}\sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_2}}{(1 - j\,\mathrm{ctg}\,k_1 w_{эф2})(1 - j\,\mathrm{ctg}\,k_2 w_{эф1}) + (k_1 k_2 w_{эф1} w_{эф2})^{-1}}, \qquad (3.43)$$

где $k_{1,2} = 2\pi\sqrt{\varepsilon_{1,2}}/\lambda$, $S_{22}$, $S_{12}$ получаются заменой индексов; $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$ соответственно на $\varepsilon_{эф1}$, $\varepsilon_{эф2}$. Формулы (3.43) получены в одномодовом приближении и верны при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}} < \lambda$.

## СКАЧОК ШИРИНЫ ПОЛОСКИ

Форма центральной полоски для наиболее часто встречающихся случаев показана на рис. 3.17, *а*, *б*, эквивалентная схема скачка — на рис. 3.18, *б* [3.8]. Появление реактивности связано с искажениями поля в области стыка. Отсчетная плоскость $T—T$ совпадает с местом расширения полоски. Параметры эквивалентной схемы для скачка, изображенного на рис. 3.17, *а*, рассчитываются по формулам (3.8)

$$X_\Sigma/Z_{\text{в}1}=X/Z_{\text{в}1}+X_0/Z_{\text{в}1}; \tag{3.44}$$

$$\frac{X_0}{Z_{\text{в}1}}=\frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}1}}}{\varepsilon_{\text{эф}2}}\left[\frac{w_{\text{эф}1}}{w_{\text{эф}2}}-\left(\frac{w_{\text{эф}1}}{w_{\text{эф}2}}\right)^2\right]\frac{1-S_{11}}{1+S_{11}}; \tag{3.45}$$

$$\frac{X}{Z_{\text{в}1}}=\frac{w_{\text{эф}1}\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}1}}}{\lambda}\left\{\left[1+\left(\frac{\varepsilon_{\text{эф}2}}{\varepsilon_{\text{эф}1}}\right)^{1,5}\right]\ln\frac{w^2_{\text{эф}2}-w^2_{\text{эф}1}}{4w^2_{\text{эф}1}}-\right.$$

$$\left.-2\left(\frac{\varepsilon_{\text{эф}2}}{\varepsilon_{\text{эф}1}}\right)^{1,5}\ln\frac{w_{\text{эф}2}}{w_{\text{эф}1}}+\left[\frac{w_{\text{эф}2}}{w_{\text{эф}1}}+\left(\frac{\varepsilon_{\text{эф}2}}{\varepsilon_{\text{эф}1}}\right)^{1,5}\frac{w_{\text{эф}1}}{w_{\text{эф}2}}\right]\ln\frac{w_{\text{эф}2}+w_{\text{эф}1}}{w_{\text{эф}2}-w_{\text{эф}1}}\right\}+$$

$$+\frac{2w_{\text{эф}1}\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}2}}}{\lambda}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin^2\theta}{n\theta^2}\left[\frac{1}{\sqrt{1-k^2w^2_{\text{эф}2}\varepsilon_{\text{эф}2}/(4n^2)}}-1\right], \tag{3.46}$$

где $\theta=n\pi w_{\text{эф}1}/w_{\text{эф}2}$; $w_{\text{эф}1,2}$, $\varepsilon_{\text{эф}1,2}$ — эффективная ширина и диэлектрическая проницаемость материала полоски до и после расширения; $S_{11}$ — коэффициент отражения разомкнутой на конце линии с шириной проводника $w_2$. Для неоднородности, изображенной на рис. 3.17, *б*, параметр $X_0/Z_{\text{в}1}$ остается без изменения, а $X/Z_{\text{в}1}$ удваивается (т. е. $w_{\text{эф}i}$ заменяется на $2w_{\text{эф}i}$). Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формулам, приведенным в § 5.2. Формулы (3.44)—(3.46) получены в рамках модели Олинера и верны для одномодового распространения в каждом проводнике. Величины $w_{\text{эф}1,2}$, $\varepsilon_{\text{эф}1,2}$ рассчитываются по формулам § 3.1. На рис. 3.67 построена зависимость $|S_{21}|$ от частоты, измеренная экспериментально [3.3] и рассчитанная по формулам (3.44)—(3.46). На рис. 3.68—3.70 приведены зависимости от частоты элементов матрицы рассеяния и параметров эквивалентной схемы для линий с различным $\varepsilon_r$ и скачком ширины полоски, изображенным на рис. 3.17, *а*, а на рис. 3.71—3.73 — для линии со скачком, изображенным на рис. 3.17, *б*.

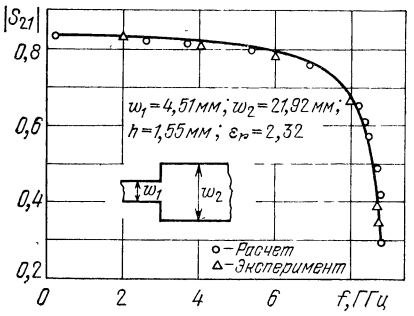



Рис. 3.67

## ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ШТЫРЬ

Общий вид неоднородности показан на рис. 3.74, эквивалентная схема — на рис. 3.77. Плоскость отсчета $T—T$ находится в центре штыря. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формуле [3.11]

$$\frac{X_a}{Z_{\text{в}}}\approx\frac{w_{\text{эф}}\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}{2\lambda}\left\{\ln\frac{2w_{\text{эф}}}{\pi r}+2\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{1}{\sqrt{m^2-4w^2_{\text{эф}}/\lambda^2}}-\frac{1}{m}\right]\times\right.$$

$$\left.\times\cos^2\frac{m\pi}{2}\right\}, \tag{3.47}$$

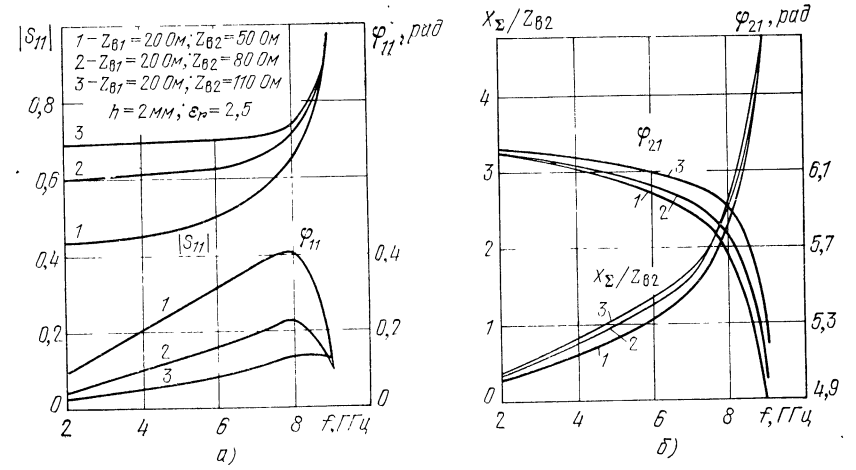



Рис. 3.68

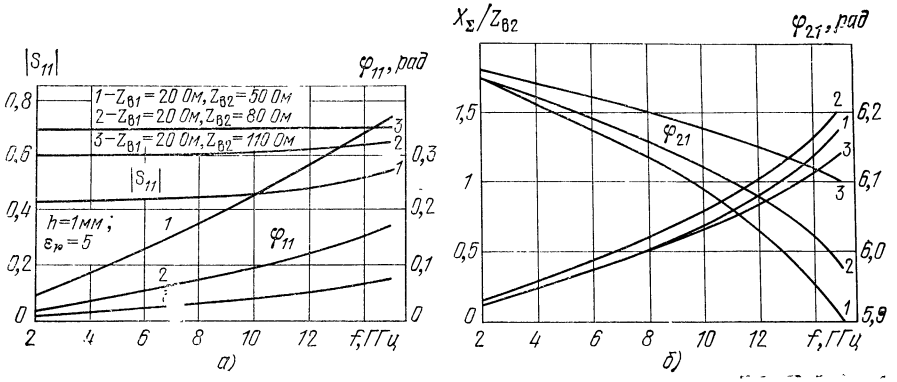



Рис. 3.69

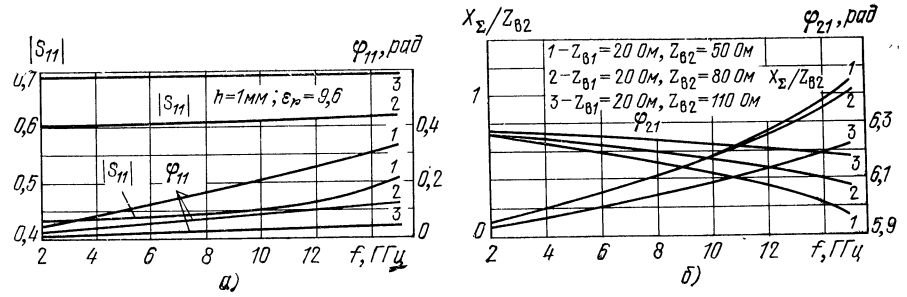



Рис. 3.70

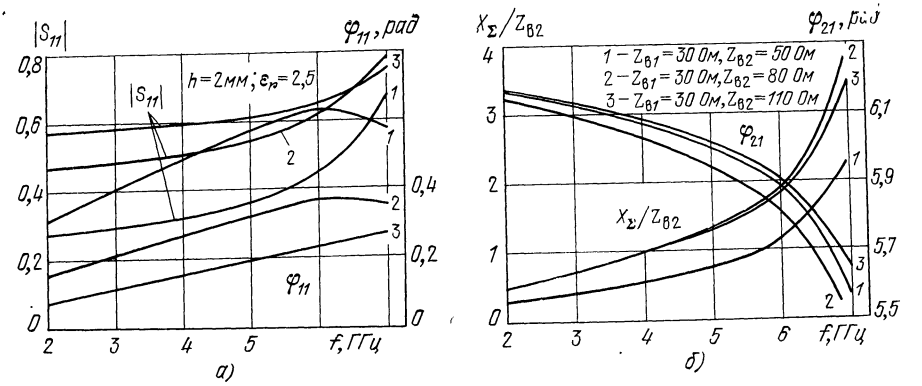



Рис. 3.71

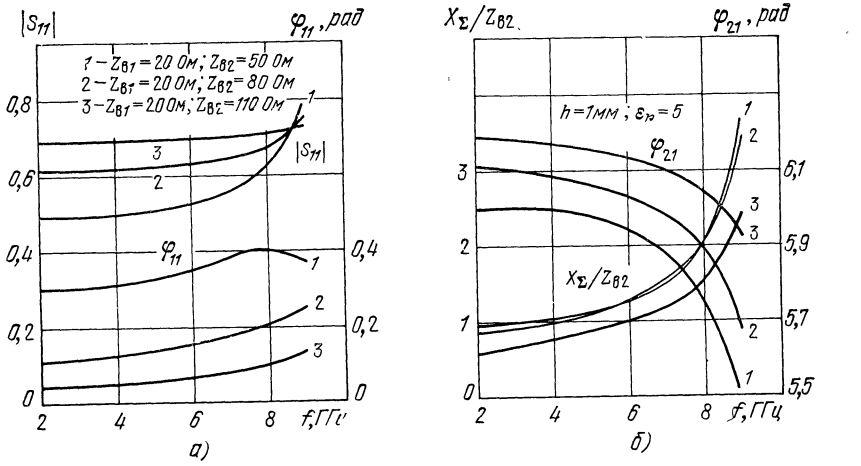



Рис. 3.72

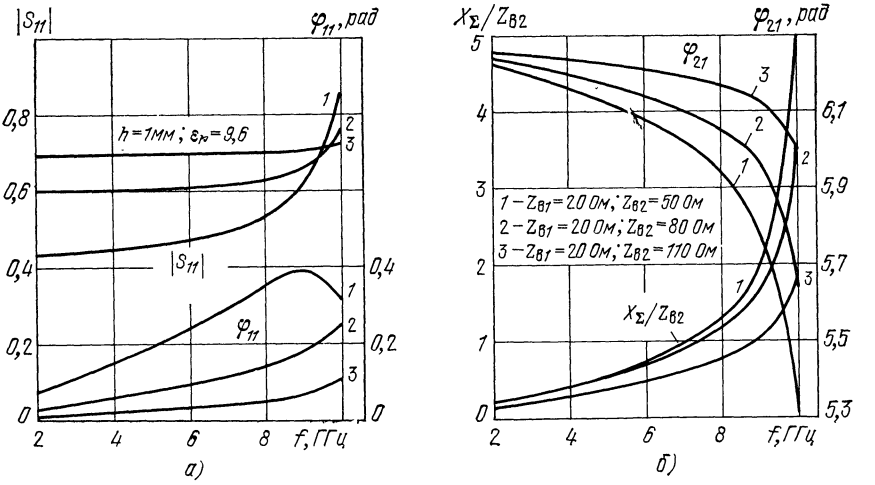



Рис. 3.73

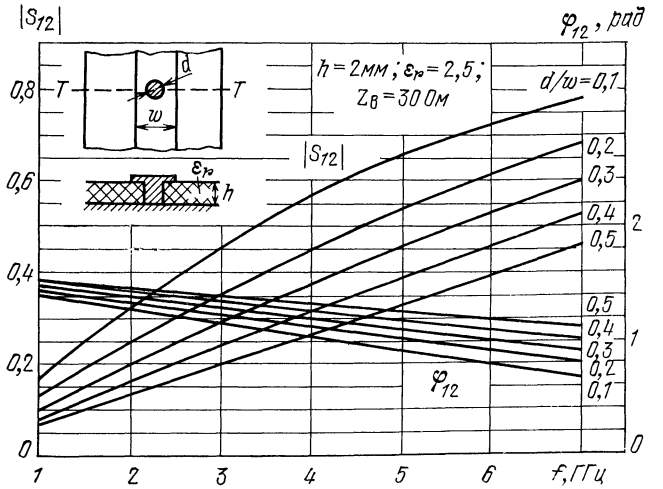



Рис. 3.74

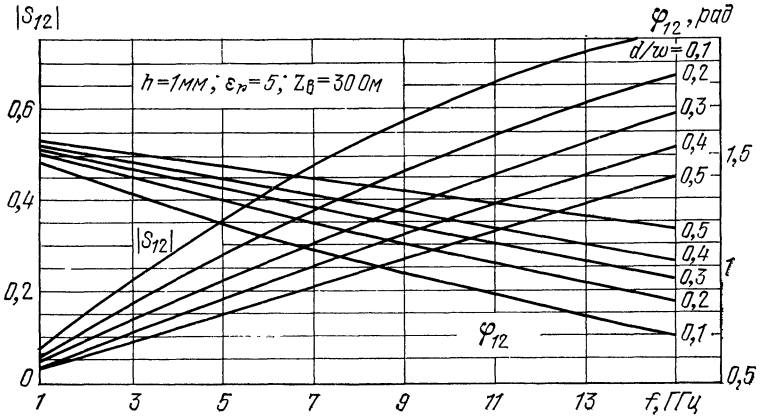



Рис. 3.75

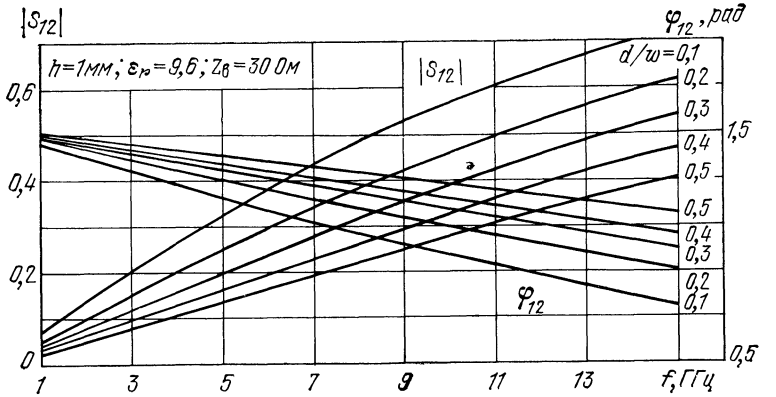



Рис. 3.76

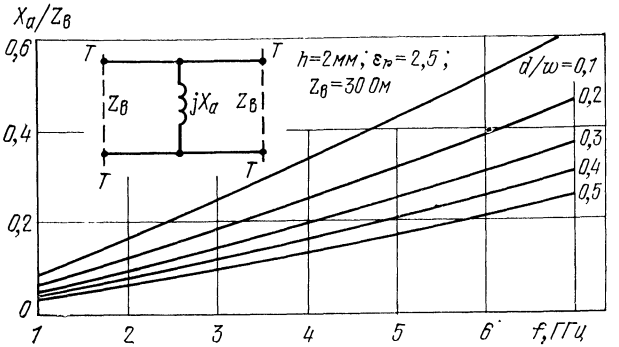



Рис. 3.77

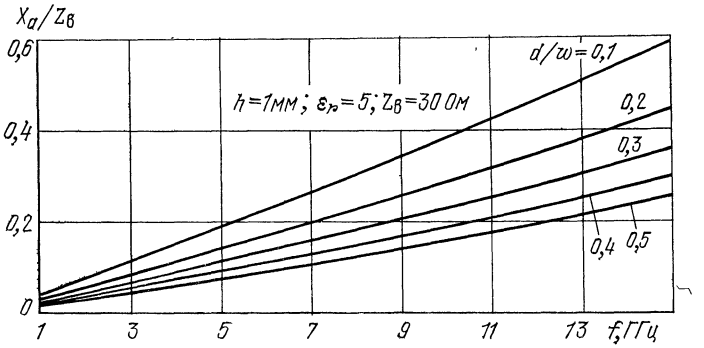



Рис. 3.78

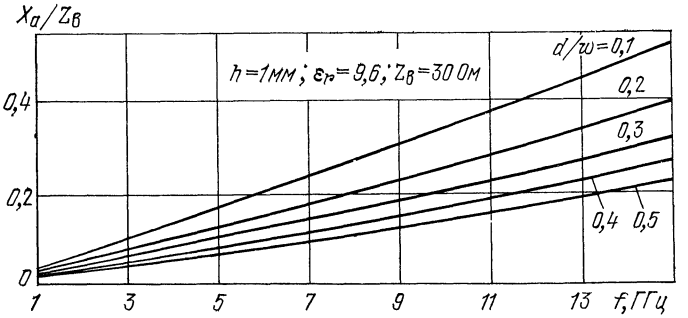



Рис. 3.79

где $r$ — радиус штыря. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формулам, приведенным в § 5.2. Формула (3.47) получена методом Олинера и верна при $2r\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\lambda \ll 1$. На рис. 3.74—3.79 приведены зависимости от частоты элемента $S_{12}$ матрицы рассеяния и параметров эквивалентной схемы для линий с различными $\varepsilon_r$ и $Z_в$; $|S_{11}| = \sqrt{1 - |S_{12}|^2}$, $\varphi_{11} = \varphi_{12} + \pi/2$.

## Т-СОЧЛЕНЕНИЕ

Т-сочленение полосковых линий показано на рис. 3.26, *а*, эквивалентная схема — на рис. 3.26, *б* [3.8]. Рассматривается случай, когда $w_1 = w_2 = w$. Плоскости отсчета (рис. 3.26, *а*) смещены от полосок на расстояние $(w_{эф} - w)/2$. Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам [3.9]

$$\frac{X_a}{Z_{в1}} = \frac{w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{\lambda}\,2{,}66; \quad \frac{X_c}{Z_{в1}} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}\,w_{эф}}; \tag{3.48}$$

$$\frac{X_d}{Z_{в1}} = \frac{w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{\lambda}\,1{,}56; \quad \frac{X_b}{Z_{в1}} = \frac{X_a}{2Z_{в1}} - \frac{w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{\lambda}\,0{,}46.$$

Элементы матрицы рассеяния выражаются с помощью формул приведенных ранее (см. Т-сочленение СПЛ). Другой вид эквивалентной схемы представлен на рис. 3.80, *б*. Плоскости отсчета смещены к центру сочленения (рис. 3.80, *а*)

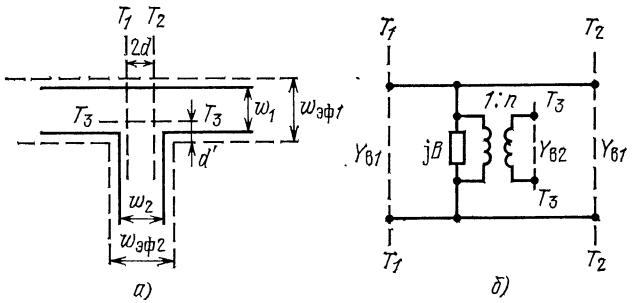



Рис. 3.80

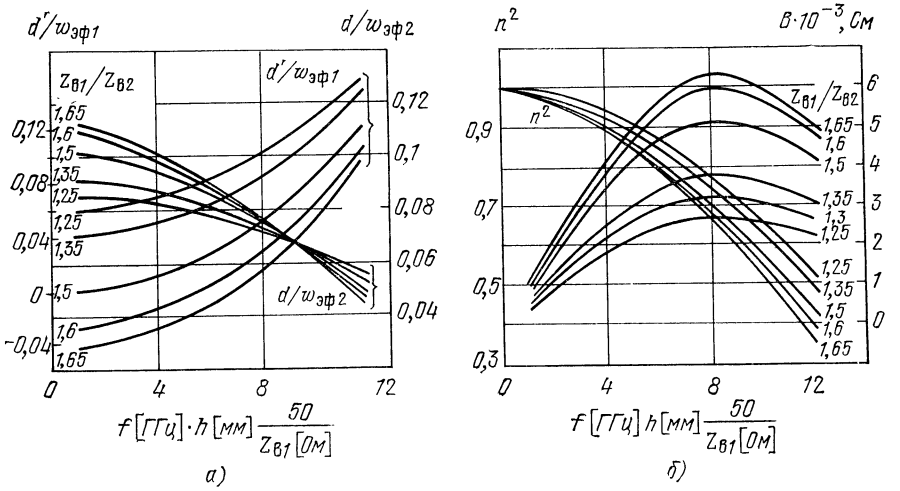



Рис. 3.81

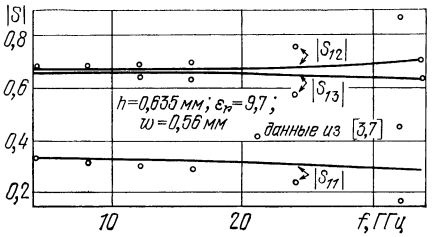



Рис. 3.82

На рис. 3.81 приведены зависимости смещения отсчетных плоскостей и шунтирующей проводимости от частоты и высоты подложки. Формулы (3.48) получены в рамках модели Олинера и верны при $w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}} < \lambda$. В приближении теории длинных линий матрица рассеяния Т-сочленения

$$[S]=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}-1 & 2 & 2\\ 2 & -1 & 2\\ 2 & 2 & -1\end{bmatrix}.$$

Плоскости отсчета находятся в геометрическом центре соединяемых полосок. На рис. 3.82 показаны зависимости модулей элементов матрицы рассеяния от частоты, рассчитанных по формулам (3.48), и данные из [3.7]. На рис. 3.83—3.85 приведены зависимости элементов матрицы рассеяния от частоты для подложек с различным $\varepsilon_r$.

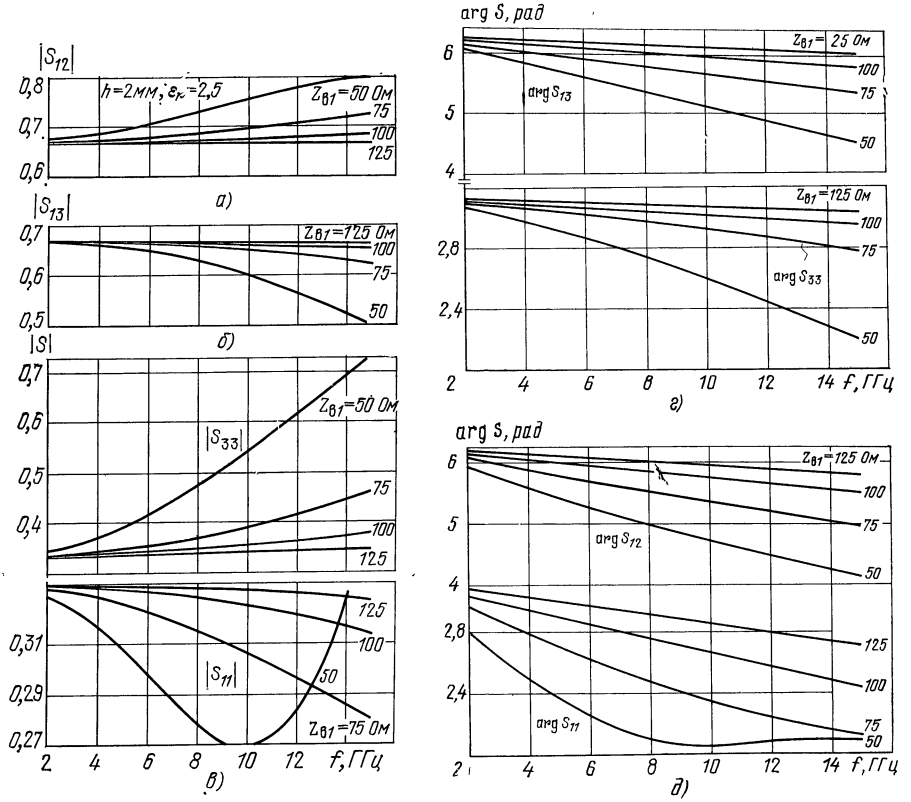



Рис. 3.83

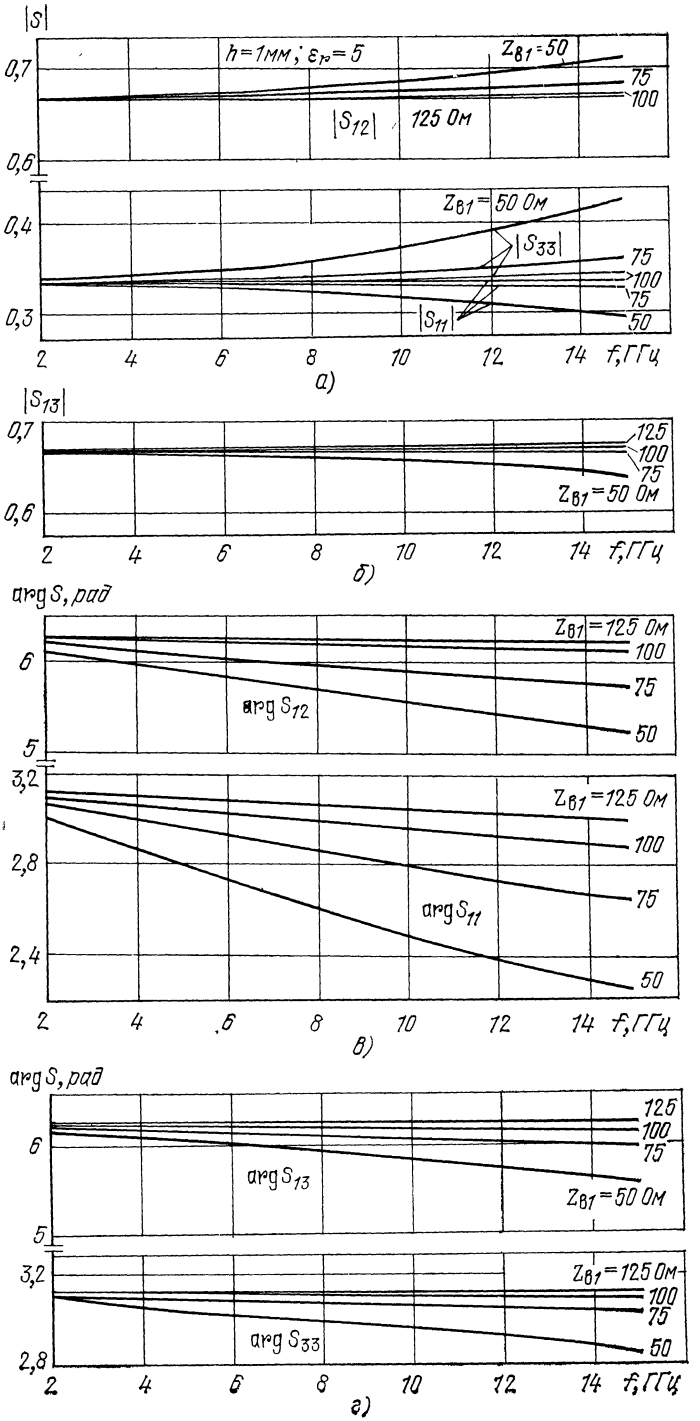

|S|
h=1мм; εr=5
Z01=50
75
100
|S12|
125 Ом
0,7
0,6
0,4
0,3
Z01=50 Ом
|S33|
75
100
75
50
|S11|
2
4
6
8
10
12
14
f,ГГц
а)
|S13|
0,7
0,6
125
100
75
Z01=50 Ом
б)
arg S, рад
6
5
Z01=125 Ом
100
75
50
arg S12
3,2
2,8
2,4
arg S11
в)
arg S, рад
6
5
125
100
75
arg S13
Z01=50 Ом
3,2
2,8
Z01=125 Ом
100
75
50
arg S33
г)

Рис. 3.84

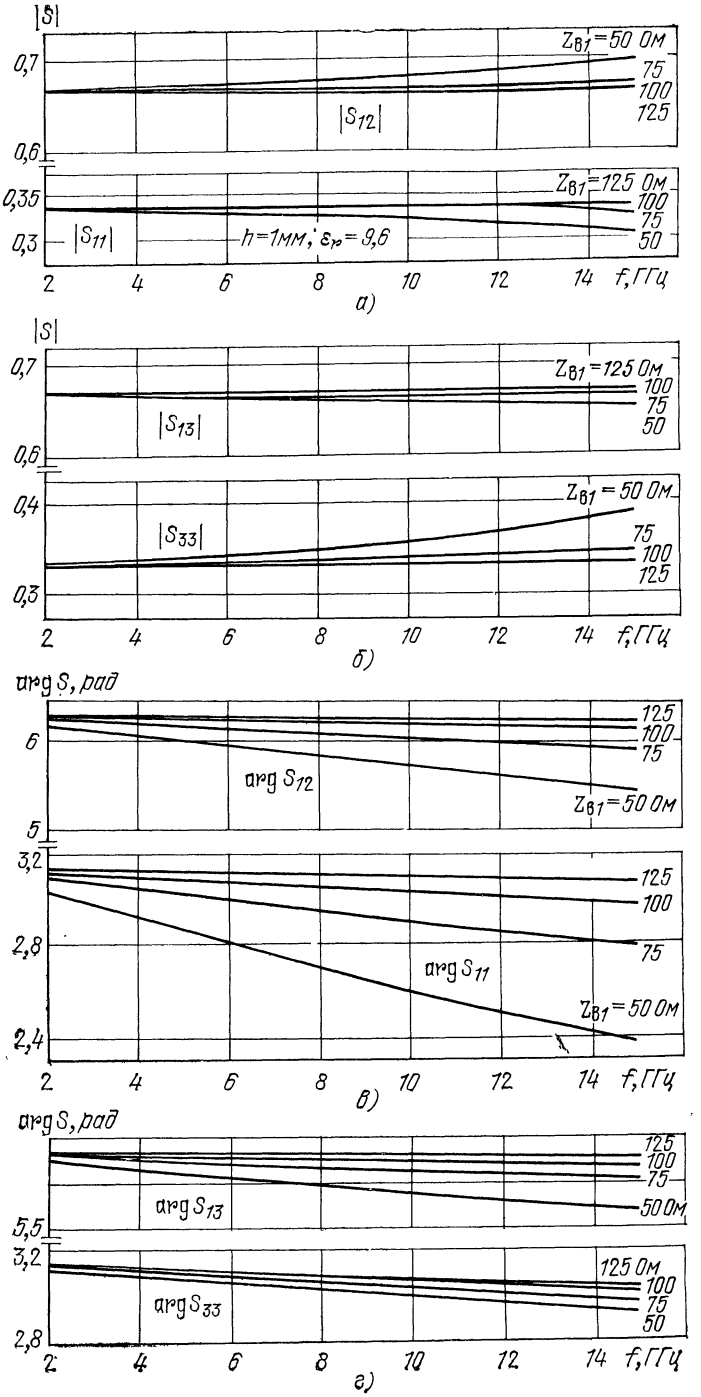

|S|
0,7
0,6
$Z_{B1}$=50 Ом
75
100
125
$|S_{12}|$
0,35
0,3
$Z_{B1}$=125 Ом
100
75
50
$|S_{11}|$
h=1мм; $\varepsilon_r$=9,6
2 4 6 8 10 12 14 f,ГГц
а)
|S|
0,7
0,6
$Z_{B1}$=125 Ом
100
75
50
$|S_{13}|$
0,4
0,3
$Z_{B1}$=50 Ом
75
100
125
$|S_{33}|$
2 4 6 8 10 12 14 f,ГГц
б)
arg S, рад
6
5
125
100
75
arg $S_{12}$
$Z_{B1}$=50 Ом
3,2
2,8
2,4
125
100
75
arg $S_{11}$
$Z_{B1}$=50 Ом
2 4 6 8 10 12 14 f,ГГц
в)
arg S, рад
5,5
125
100
75
arg $S_{13}$
50 Ом
3,2
2,8
125 Ом
100
75
50
arg $S_{33}$
2 4 6 8 10 12 14 f,ГГц
г)

Рис. 3.85

## Y-СОЧЛЕНЕНИЕ

Y-сочленение, показанное на рис. 3.31, представляет собой соединение трех НПЛ под углом 120°. Плоскости отсчета $T_1$—$T_1$, $T_2$—$T_2$, $T_3$—$T_3$ — на том же рисунке. Параметры эквивалентной схемы (рис. 3.89) рассчитываются по формулам [3.10]

$$X_a/Z_в \approx 1{,}291 w_{эф} \sqrt{\varepsilon_{эф}}/\lambda; \quad X_b/Z_в \approx 1{,}42/(X_a/Z_в). \qquad (3.49)$$

Элементы матрицы рассеяния рассчитываются по формулам (3.29). Формулы (3.28) получены в рамках модели Олинера и верны при $2w_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}} < \lambda$ и одномо-

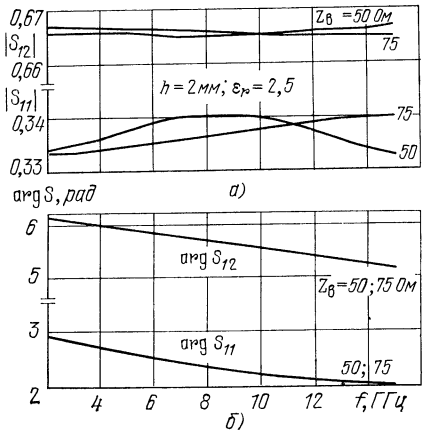



Рис. 3.86

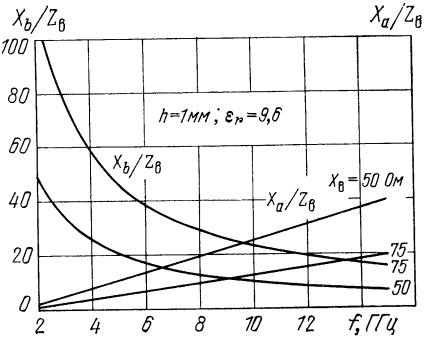



Рис. 3.87

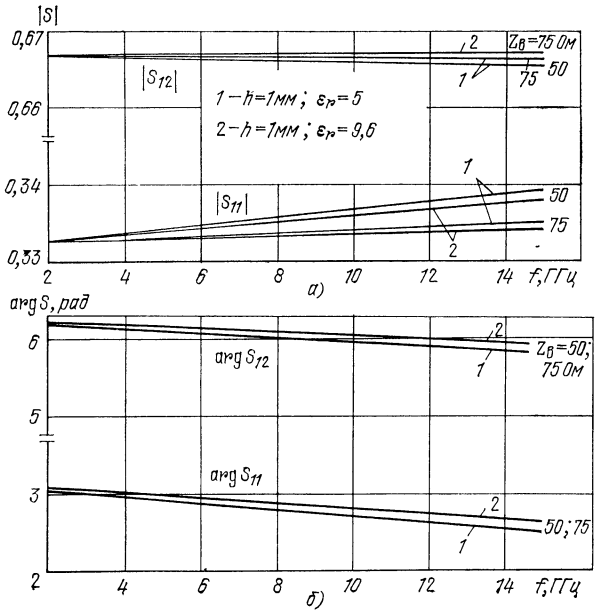



Рис. 3.88

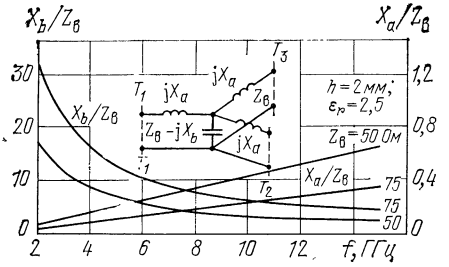



Рис. 3.89

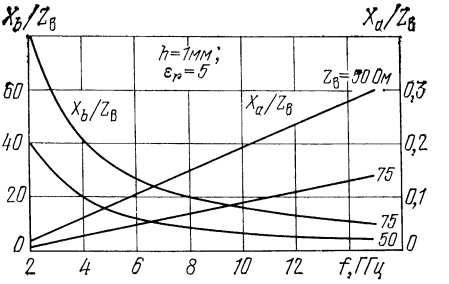



Рис. 3.90

довом режиме в подводящих линиях. На рис. 3.86—3.90 приведены зависимости элементов матрицы рассеяния и параметров эквивалентных схем от частоты для линий с различными $\varepsilon_r$ и $Z_в$.

## Х-СОЧЛЕНЕНИЕ

Общий вид Х-сочленения представлен на рис. 3.36, приближенная эквивалентная схема для одинаковой ширины подводящих проводников—на рис. 3.37. Элементы матрицы рассеяния рассчитываются с помощью формул (3.31), (3.32).

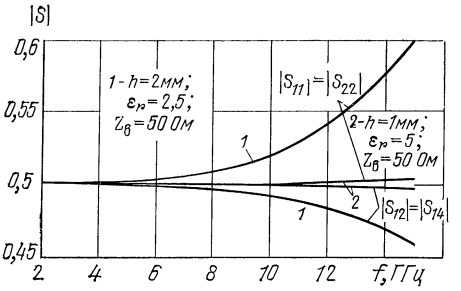



Рис. 3.91

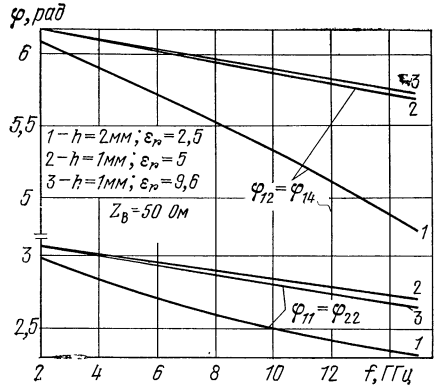



Рис. 3.92

Параметры эквивалентной схемы рассчитываются по формулам (3.48). На рис. 3.91, 3.92 приведены зависимости элементов матрицы рассеяния от частоты для подложек с различными $\varepsilon_r$.

## 3.4. ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

### ПЛОСКИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Анализ плоских резонаторов (рис. 3.93) основан на введении модели Олинера. На первом этапе анализа резонатор с неоднородным заполнением (рис. 3.93, *а*) заменяется эквивалентным ему резонатором с однородным диэлектрическим заполнением, проницаемость которого равна $\varepsilon_0\varepsilon_{эф}$ (рис. 3.93, *б*). Величина $\varepsilon_{эф}$ определяется следующим образом [3.22, 3.26]. Определяется полная энергия, запасенная в электрическом поле резонатора при данной разности

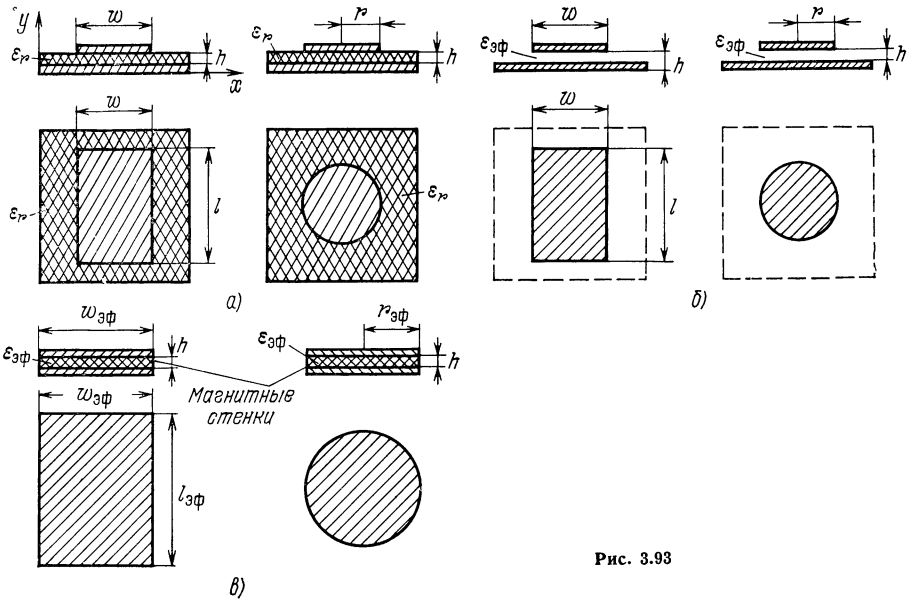



Рис. 3.93

потенциалов; она сравнивается с энергией, запасенной в электрическом поле того же резонатора при однородном заполнении средой с $\varepsilon_a = \varepsilon_0\varepsilon_{эф}$. На втором этапе вводится модель Олинера: резонатор с диэлектрическим заполнением $\varepsilon_0\varepsilon_{эф}$ заменяется моделью, изображенной на рис. 3.93, *в*, где по периметру резонатора располагаются магнитные стенки, а геометрические размеры резонатора заменяются эффективными.

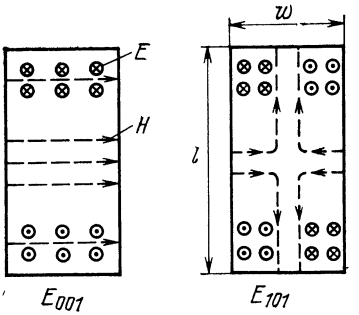



Рис. 3.94

Рассмотрим прямоугольный резонатор, показанный слева на рис. 3.93, *а*. Его модель изображена слева на рис. 3.93, *в*. В общем случае в подобной структуре возможно существование смешанного типа. Ограничимся малой толщиной подложки ($h \ll w_{эф}$, $h \ll l_{эф}$), когда практически отсутствуют вариации поля по оси $y$, что обусловливает существование в такой структуре колебаний типа квази-$E_{mon}$. На рис. 3.94 изображены структуры полей колебаний низших типов $E_{001}$, $E_{101}$.

Для этого резонатора

$$\lambda_{рез} = 2\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\sqrt{(m/w_{эф})^2 + (n/l_{эф})^2}, \tag{3.50}$$

где $m$ и $n$ — целые числа, большие или равные 1. Для определения эффективной диэлектрической проницаемости воспользуемся соотношением [3.22]

$$\varepsilon_{эф} = C_{эф}^{(\varepsilon)} / C_{эф}^{(1)}, \tag{3.51}$$

где $C_{эф}^{(\varepsilon)}$ — эффективная емкость резонатора прямоугольного сечения для подложки с проницаемостью $\varepsilon_r$; $C_{эф}^{(1)}$ — эффективная емкость того же резонатора с воздушным заполнением.

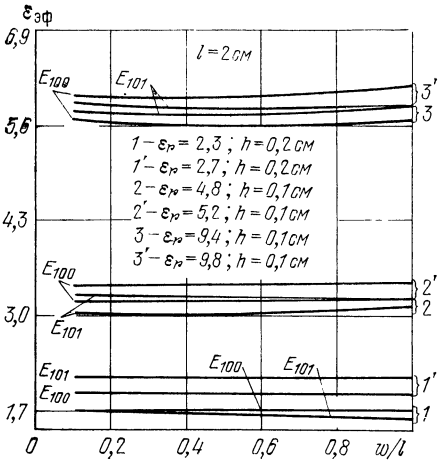



Рис. 3.95

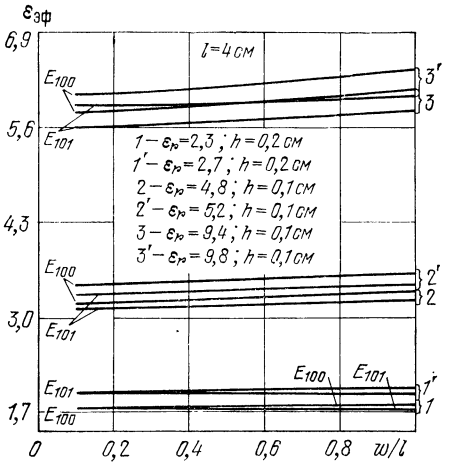



Рис. 3.96

В общем случае эффективная емкость

$$C^{(\varepsilon)}_{\text{эф}} = C^{(\varepsilon)}_{0\text{эф}} + 2C^{(\varepsilon)}_{\text{к1эф}} + 2C^{(\varepsilon)}_{\text{к2эф}},$$

где $C^{(\varepsilon)}_{0\ \text{эф}} = \varepsilon_r wl/(\delta\gamma h)$ — эффективная емкость плоского конденсатора, а

$$C^{(\varepsilon)}_{\text{к1эф}} = \frac{l}{2\delta}\left[\frac{120\pi Z_{\text{в}}(w, h, 1)}{Z^2_{\text{в}}(w, h, \varepsilon_r)} - \frac{\varepsilon_r w}{h}\right];$$

$$C^{(\varepsilon)}_{\text{к2эф}} = \frac{w}{2\gamma}\left[\frac{120\pi Z_{\text{в}}(l, h, 1)}{Z^2_{\text{в}}(l, h, \varepsilon_r)} - \frac{\varepsilon_r l}{h}\right]$$

— эффективные краевые емкости. Емкость $C^{(1)}_{\text{эф}}$ определяется по этим же формулам, если положить $\varepsilon_r = 1$. В этих выражениях $\gamma = 1$ при $m = 0$ и $\gamma = 2$ при $m \neq 0$; $\delta = 1$ при $n = 0$ и $\delta = 2$ при $n \neq 0$; $Z_{\text{в}}(w, h, \varepsilon_r)$ — волновое сопротивление НПЛ, у которой $w$ — ширина полоски; $h$, $\varepsilon_r$ — толщина, диэлектрическая проницаемость подложки. При вычислении $C_{\text{к 2эф}}$ роль $w$ выполняет длина $l$ резонатора; $Z_{\text{в}}$ рассчитывается по формулам (2.69), (2.70).

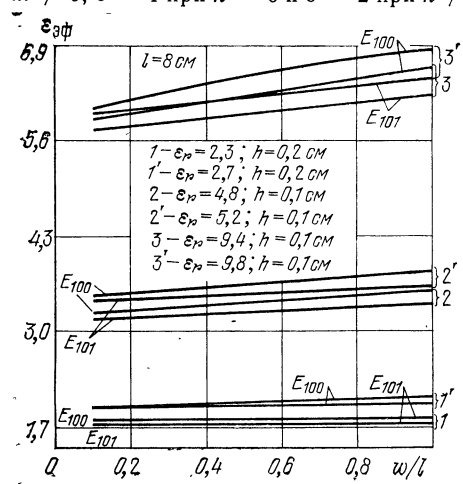



Рис. 3.97

Значения $w_{\text{эф}}$ и $l_{\text{эф}}$, входящие в (3.50), равны [3.23]

$$w_{\text{эф}} = \left(\frac{120\pi w^3 h}{Z_{\text{в}}(w, h, \varepsilon_r)\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}\right)^{1/4};$$

$$l_{\text{эф}} = \left(\frac{120\pi l^3 h}{Z_{\text{в}}(l, h, \varepsilon_r)\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}}\right)^{1/4}.$$

Погрешность результатов, получаемых по формуле (3.50), 2 ...3 % при изменении параметров $w/l$ в интервале 0,1 ... 1, а $l/h$ — 1 ... 10 ($h \leqslant 0$, 2 см) [3.22].

На рис. 3.95—3.97 построены зависимости $\varepsilon_{\text{эф}}$ от параметра $w/l$ при

Таблица 3.4

**Резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, см, прямоугольного резонатора при различных $l$, см**

| $\frac{w}{l}$ | Тип волны | $\varepsilon_r=2,3$; $h=0,2$ см | | | | $\varepsilon_r=2,7$; $h=0,2$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,1 | $E_{100}$ | 1,019 | 1,793 | 2,504 | 3,182 | 1,082 | 1,904 | 2,659 | 3,378 |
| | $E_{101}$ | 1,007 | 1,774 | 2,478 | 3,148 | 1,068 | 1,883 | 2,630 | 3,341 |
| 0,2 | $E_{100}$ | 1,791 | 3,182 | 4,476 | 5,726 | 1,901 | 3,378 | 4,753 | 6,082 |
| | $E_{101}$ | 1,730 | 3,082 | 4,340 | 5,554 | 1,835 | 3,271 | 4,606 | 5,898 |
| 0,3 | $E_{100}$ | 2,499 | 4,477 | 6,339 | 8,302 | 2,653 | 4,753 | 6,733 | 8,837 |
| | $E_{101}$ | 2,344 | 4,217 | 5,978 | 7,882 | 2,487 | 4,476 | 6,347 | 8,320 |
| 0,4 | $E_{100}$ | 3,174 | 5,726 | 8,297 | 10,68 | 3,369 | 6,081 | 8,831 | 11,38 |
| | $E_{101}$ | 2,875 | 5,214 | 7,549 | 9,734 | 3,050 | 5,516 | 8,028 | 10,36 |
| 0,5 | $E_{100}$ | 3,826 | 6,948 | 10,08 | 13,04 | 4,061 | 7,381 | 10,74 | 13,89 |
| | $E_{101}$ | 3,336 | 6,092 | 8,832 | 11,43 | 3,539 | 6,468 | 9,395 | 12,17 |
| 0,6 | $E_{100}$ | 4,463 | 8,292 | 11,86 | 15,38 | 4,737 | 8,824 | 12,63 | 16,39 |
| | $E_{101}$ | 3,735 | 6,954 | 9,961 | 12,93 | 3,962 | 7,394 | 10,60 | 13,77 |
| 0,7 | $E_{100}$ | 5,088 | 9,485 | 13,61 | 17,71 | 5,401 | 10,09 | 14,50 | 18,88 |
| | $E_{101}$ | 4,081 | 7,619 | 10,95 | 14,25 | 4,329 | 8,103 | 11,65 | 15,18 |
| 0,8 | $E_{100}$ | 5,705 | 10,67 | 15,36 | 20,03 | 6,056 | 11,36 | 16,37 | 21,37 |
| | $E_{101}$ | 4,381 | 8,198 | 11,81 | 15,40 | 4,647 | 8,710 | 12,57 | 16,40 |
| 0,9 | $E_{100}$ | 6,315 | 11,85 | 17,11 | 22,35 | 6,704 | 12,61 | 18,24 | 23,85 |
| | $E_{101}$ | 4,642 | 8,703 | 12,56 | 16,40 | 4,424 | 9,257 | 13,37 | 14,47 |
| 1,0 | $E_{100}$ | 6,919 | 13,02 | 18,85 | 24,66 | 7,346 | 13,86 | 20,10 | 26,32 |
| | $E_{101}$ | 4,868 | 9,142 | 13,21 | 17,27 | 5,164 | 9,725 | 14,07 | 18,40 |

| $\frac{w}{l}$ | Тип волны | $\varepsilon_r=4,8$; $h=0,1$ см | | | | $\varepsilon_r=5,2$; $h=0,1$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,1 | $E_{100}$ | 1,200 | 2,130 | 3,000 | 3,842 | 1,242 | 2,203 | 3,104 | 3,976 |
| | $E_{101}$ | 1,186 | 2,104 | 2,963 | 3,796 | 1,227 | 2,177 | 3,066 | 3,527 |
| 0,2 | $E_{100}$ | 2,129 | 3,837 | 5,617 | 7,256 | 2,203 | 3,970 | 5,816 | 7,515 |
| | $E_{101}$ | 2,060 | 3,714 | 5,431 | 7,019 | 2,131 | 3,843 | 5,622 | 7,267 |
| 0,3 | $E_{100}$ | 2,997 | 5,608 | 8,056 | 10,49 | 3,100 | 5,806 | 8,344 | 10,87 |
| | $E_{101}$ | 2,818 | 5,268 | 7,576 | 9,875 | 2,916 | 5,453 | 7,844 | 10,23 |
| 0,4 | $E_{100}$ | 3,835 | 7,233 | 10,47 | 13,72 | 3,968 | 7,490 | 10,85 | 14,22 |
| | $E_{101}$ | 3,487 | 6,567 | 9,522 | 12,48 | 3,607 | 6,799 | 9,861 | 12,93 |
| 0,5 | $E_{100}$ | 4,658 | 8,844 | 12,89 | 16,95 | 4,820 | 9,160 | 13,35 | 17,57 |
| | $E_{101}$ | 4,076 | 7,725 | 11,27 | 14,83 | 4,217 | 7,999 | 11,67 | 15,37 |

| $\frac{w}{l}$ | Тип волны | $\varepsilon_r=4,8$; $h=0,1$ см | | | | $\varepsilon_r=5,2$; $h=0,1$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,6 | $E_{100}$ | 5,595 | 10,45 | 15,30 | 20,18 | 5,743 | 10,82 | 15,85 | 20,92 |
| | $E_{101}$ | 4,678 | 8,750 | 12,82 | 16,92 | 4,842 | 9,060 | 13,28 | 17,53 |
| 0,7 | $E_{100}$ | 6,407 | 12,05 | 17,71 | 23,41 | 6,633 | 12,48 | 18,36 | 24,28 |
| | $E_{101}$ | 5,129 | 9,650 | 14,18 | 18,76 | 5,309 | 9,993 | 14,70 | 19,44 |
| 0,8 | $E_{100}$ | 7,213 | 13,65 | 20,32 | 26,66 | 7,463 | 14,14 | 20,86 | 27,64 |
| | $E_{101}$ | 5,552 | 10,44 | 15,38 | 20,37 | 5,716 | 10,81 | 15,94 | 21,12 |
| 0,9 | $E_{100}$ | 8,015 | 15,25 | 22,54 | 29,90 | 8,300 | 15,80 | 23,37 | 31,02 |
| | $E_{101}$ | 5,864 | 11,12 | 16,42 | 21,78 | 6,070 | 11,52 | 17,02 | 22,58 |
| 1,0 | $E_{100}$ | 8,815 | 16,84 | 24,96 | 33,16 | 9,128 | 17,46 | 25,88 | 34,39 |
| | $E_{101}$ | 6,162 | 11,72 | 17,33 | 23,01 | 6,374 | 12,14 | 17,96 | 23,85 |

| $\frac{w}{l}$ | Тип волны | $\varepsilon_r=9,4$; $h=0,1$ см | | | | $\varepsilon_r=9,8$; $h=0,1$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,1 | $E_{100}$ | 1,614 | 2,865 | 4,036 | 5,173 | 1,645 | 2,920 | 4,114 | 5,273 |
| | $E_{101}$ | 1,594 | 2,828 | 3,984 | 5,105 | 1,625 | 2,882 | 4,060 | 5,203 |
| 0,2 | $E_{100}$ | 2,863 | 5,164 | 7,593 | 9,827 | 2,918 | 5,264 | 7,741 | 10,02 |
| | $E_{101}$ | 2,768 | 4,993 | 7,331 | 0,489 | 2,821 | 5,089 | 7,473 | 9,673 |
| 0,3 | $E_{100}$ | 4,031 | 7,579 | 10,41 | 14,24 | 4,108 | 7,727 | 11,13 | 14,52 |
| | $E_{101}$ | 3,787 | 7,108 | 10,24 | 13,37 | 3,860 | 7,246 | 10,44 | 13,64 |
| 0,4 | $E_{100}$ | 5,160 | 9,787 | 14,21 | 18,66 | 5,259 | 9,979 | 14,49 | 19,03 |
| | $E_{101}$ | 4,686 | 8,869 | 12,89 | 16,93 | 4,776 | 9,041 | 13,14 | 17,26 |
| 0,5 | $E_{100}$ | 6,270 | 11,98 | 17,51 | 23,08 | 6,391 | 12,22 | 17,85 | 23,54 |
| | $E_{101}$ | 5,480 | 10,44 | 15,27 | 20,14 | 5,586 | 10,64 | 15,57 | 20,54 |
| 0,6 | $E_{100}$ | 7,558 | 14,27 | 20,81 | 27,52 | 7,704 | 14,45 | 21,22 | 28,07 |
| | $E_{101}$ | 6,308 | 11,83 | 17,39 | 23,00 | 6,430 | 12,06 | 17,73 | 23,46 |
| 0,7 | $E_{100}$ | 8,658 | 16,35 | 24,11 | 31,97 | 8,827 | 16,67 | 24,59 | 32,60 |
| | $E_{101}$ | 6,917 | 13,06 | 19,25 | 25,53 | 7,051 | 13,31 | 19,63 | 26,04 |
| 0,8 | $E_{100}$ | 9,753 | 18,54 | 27,42 | 36,43 | 9,943 | 18,90 | 27,97 | 37,16 |
| | $E_{101}$ | 7,449 | 14,13 | 20,89 | 27,75 | 7,594 | 14,41 | 21,30 | 28,30 |
| 0,9 | $E_{100}$ | 10,84 | 20,72 | 30,74 | 40,90 | 11,05 | 21,13 | 31,35 | 41,72 |
| | $E_{101}$ | 7,913 | 15,07 | 22,32 | 29,08 | 8,067 | 15,36 | 22,76 | 30,27 |
| 1,0 | $E_{100}$ | 11,93 | 22,91 | 34,06 | 45,38 | 12,16 | 23,36 | 34,74 | 46,29 |
| | $E_{101}$ | 8,317 | 15,88 | 23,56 | 31,36 | 8,479 | 16,19 | 24,03 | 31,99 |

различных значениях $\varepsilon_r$, $h$, рассчитанные по формуле (3.51). В табл. 3.4 даны при различных $l$ и $w/l$ резонансные длины волн для колебаний типов $E_{001}$ и $E_{101}$ и трех подложек: из ФАФ-4 ($\varepsilon_r=2{,}3$ и $2{,}7$; $h=0{,}2$ см), ПТ-5 ($\varepsilon_r=4{,}8$ и $5{,}2$; $h=0{,}1$ см) и поликора ($\varepsilon_r=9{,}4$ и $9{,}8$; $h=0{,}1$ см).

Наличие двух значений $\varepsilon_r$ позволяет с помощью линейной интерполяции определять $\lambda_{рез}$ для промежуточных значений $\varepsilon_r$.

## ПЛОСКИЕ КРУГЛЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Резонансные частоты такого резонатора (правый на рис. 3.93, *а*) рассчитываются по модели с магнитными стенками (рис. 3.93, *в*) при $r=r_{эф}$ и диэлектрической проницаемости подложки, равной $\varepsilon_{эф}$. В общем случае в подобной структуре возможно существование колебаний смешанного типа. При малой толщине подложки ($h \ll r_{эф}$) распределение вектора электрического поля вдоль оси $z$

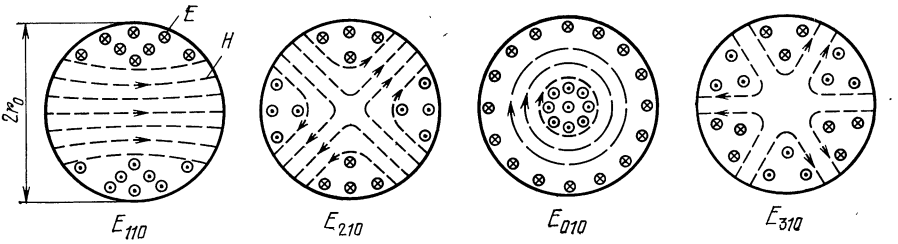



**Рис. 3.98**

близко к равномерному, чем обусловливается существование колебаний квази-$E_{mn0}$. На рис. 3.98 приведены картины полей колебаний низших типов $E_{110}$, $E_{210}$, $E_{010}$, $E_{310}$. Для модели, изображенной справа на рис. 3.93, *в*,

$$\lambda_{рез}=2\pi r_{эф}\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\nu_{mn}, \qquad (3.52)$$

где $\nu_{mn}$ — $n$-й корень производной функции Бесселя $m$-го порядка (табл. 3.5).

Параметр $r_{эф}$ равен [3.24]

$$r_{эф}=r_0\sqrt{1+\frac{2h}{\pi r_0}\left[\ln\frac{\pi r_0}{2h}+1{,}773\right]},$$

а $\varepsilon_{эф}$ находится по формуле (3.51), где

$$C^{(\varepsilon)}_{эф}=C^{(\varepsilon)}_{0эф}+C^{(\varepsilon)}_{к\,эф}\,; \quad C^{(\varepsilon)}_{0\,эф}=\frac{\varepsilon_r\pi r_0^2}{\delta h}\left[1-\frac{J_{m-1}(\nu_{mn})\,J_{m+1}(\nu_{mn})}{J_m^2(\nu_{mn})}\right];$$

$$C^{(\varepsilon)}_{к\,эф}=\frac{\pi r_0}{\delta}\left[\frac{120\pi Z_в(2r_0,\,h,\,1)}{Z_в^2(2r_0,\,h,\,\varepsilon_r)}-\frac{2\varepsilon_r r_0}{h}\right].$$

Таблица 3.5

**Корни производной функции Бесселя**

| $n$ | $\nu_{mn}$ при $m$, равном | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 3,8317 | 1,8412 | 3,0542 | 4,2012 | 5,3176 | 6,4156 |
| 2 | 7,0156 | 5,3314 | 6,7061 | 8,0152 | 9,2824 | 10,5199 |
| 3 | 10,1735 | 8,5363 | 9,9695 | 11,3459 | 12,6819 | 13,9872 |

Таблица 3.6

**Резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, см, плоского круглого резонатора**

| $\frac{r_0}{h}$ | $\varepsilon_r = 2,3$; $h = 0,2$ см | | | | $\varepsilon_r = 2,7$; $h = 0,2$ см | | | | $\varepsilon_r = 4,8$; $h = 0,1$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ |
| 2,5 | 1,52 | 3,11 | 1,85 | 1,34 | 1,63 | 3,32 | 1,98 | 1,42 | 1,05 | 2,12 | 1,26 | 0,90 |
| 5,0 | 2,82 | 5,77 | 3,44 | 2,48 | 3,03 | 6,18 | 3,67 | 2,64 | 1,97 | 3,98 | 2,36 | 1,69 |
| 7,5 | 4,10 | 8,39 | 5,00 | 3,60 | 4,41 | 9,00 | 5,36 | 3,85 | 2,88 | 5,84 | 3,46 | 2,48 |
| 10,0 | 5,37 | 11,0 | 6,56 | 4,73 | 5,77 | 11,8 | 7,03 | 5,06 | 3,78 | 7,69 | 4,56 | 3,27 |
| 12,5 | 6,63 | 13,6 | 8,11 | 5,85 | 7,14 | 14,6 | 8,21 | 6,28 | 4,69 | 9,55 | 5,67 | 4,07 |
| 15,0 | 7,88 | 16,2 | 9,67 | 6,98 | 8,50 | 17,4 | 10,4 | 7,49 | 5,59 | 11,4 | 6,78 | 4,87 |
| 17,5 | 9,14 | 18,8 | 11,2 | 8,10 | 9,85 | 20,2 | 12,1 | 8,70 | 6,49 | 13,3 | 7,89 | 5,67 |
| 20,0 | 10,4 | 21,4 | 12,8 | 9,23 | 11,2 | 23,0 | 13,7 | 9,92 | 7,39 | 15,1 | 9,00 | 6,48 |
| 22,5 | 11,6 | 24,0 | 14,3 | 10,4 | 12,6 | 25,8 | 15,4 | 11,1 | 8,29 | 17,0 | 10,1 | 7,29 |
| 25,0 | 12,9 | 26,6 | 15,9 | 11,5 | 13,9 | 28,6 | 17,1 | 12,4 | 9,19 | 18,8 | 11,2 | 8,09 |

| $\frac{r_0}{h}$ | $\varepsilon_r = 5,2$; $h = 0,1$ см | | | | $\varepsilon_r = 9,4$; $h = 0,1$ см | | | | $\varepsilon_r = 9,8$; $h = 0,1$ см | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{010}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ |
| 2,5 | 1,09 | 2,20 | 1,30 | 0,93 | 1,43 | 2,88 | 1,70 | 1,22 | 1,46 | 2,93 | 1,73 | 1,24 |
| 5,0 | 2,04 | 4,13 | 2,44 | 1,75 | 2,71 | 5,45 | 3,21 | 2,30 | 2,76 | 5,56 | 3,28 | 2,34 |
| 7,5 | 2,99 | 6,06 | 3,59 | 2,57 | 3,97 | 8,02 | 4,74 | 3,39 | 4,05 | 8,18 | 4,83 | 3,46 |
| 10,0 | 3,93 | 7,99 | 4,74 | 3,40 | 5,23 | 10,6 | 6,27 | 4,49 | 5,34 | 10,8 | 6,39 | 4,58 |
| 12,5 | 4,87 | 9,92 | 5,89 | 4,23 | 6,49 | 13,2 | 7,81 | 5,59 | 6,63 | 13,4 | 7,96 | 5,71 |
| 15,0 | 5,81 | 11,8 | 7,04 | 5,06 | 7,75 | 15,8 | 9,35 | 6,71 | 7,91 | 16,1 | 9,54 | 6,84 |
| 17,5 | 6,75 | 13,8 | 8,20 | 5,89 | 9,01 | 18,4 | 10,9 | 7,82 | 9,20 | 18,7 | 11,1 | 7,98 |
| 20,0 | 7,69 | 15,7 | 9,36 | 6,73 | 10,3 | 21,0 | 12,4 | 8,94 | 10,5 | 21,4 | 12,7 | 9,13 |
| 22,5 | 8,62 | 17,7 | 10,5 | 7,57 | 11,5 | 23,6 | 14,0 | 10,1 | 11,8 | 24,0 | 14,3 | 10,3 |
| 25,0 | 9,56 | 19,6 | 11,7 | 8,41 | 12,8 | 26,2 | 15,6 | 11,2 | 13,0 | 26,7 | 15,9 | 11,4 |

Смысл всех величин, входящих в эти равенства, не отличается от указанного в предыдущем разделе; $Z_в$ вычисляется по формулам (2.69), (2.70), в которых следует положить $w = 2r_0$.

Погрешность результатов, получаемых по формуле (3.52), около 1,5% для любого из четырех перечисленных выше колебаний при изменении параметра $r_0/h$ в интервале 5 ... 25 ($h \leqslant 0,2$ см).

На рис. 3.99—3.101 показаны зависимости $\varepsilon_{эф}$ от параметра $r_0/h$ при различных $\varepsilon_r$ и $h$, рассчитанные по формуле (3.51). В табл. 3.6 приведены резонансные длины волн $\lambda_{рез}$ для колебаний типов $E_{110}$, $E_{210}$, $E_{010}$, $E_{310}$ в зависимости от параметров $r_0/h$, $\varepsilon_r$ и $h$.

Аналогичные результаты можно получить, если воспользоваться методом, описанным в [3.30]. Резонансная длина волны резонатора определяется из уравнения

$$\lambda_{рез} = 2\pi \sqrt{\varepsilon_r} r_1 / \nu_{mn}.$$

В этом уравнении $r_1 = r_0 - \Delta r$, где для каждого колебания величина $\Delta r$ зависит от угла скольжения $\xi$, т. е. угла, под которым набегает Т-волна на край структуры. Для азимутально-симметричных типов колебаний ($m = 0$) $\xi = 90°$ и

$$\Delta r = -\left(\ln \frac{4}{k_0 h} - \varepsilon_r \ln 4\right) \frac{h}{\pi \varepsilon_r},$$

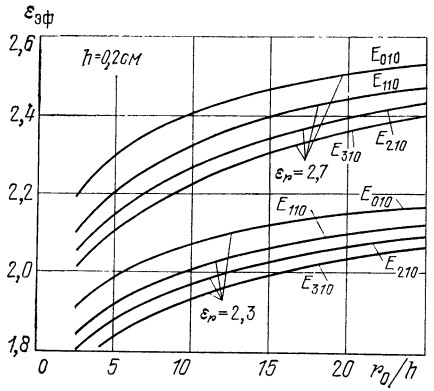



Рис. 3.99

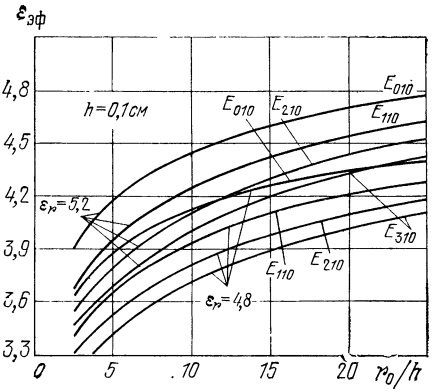
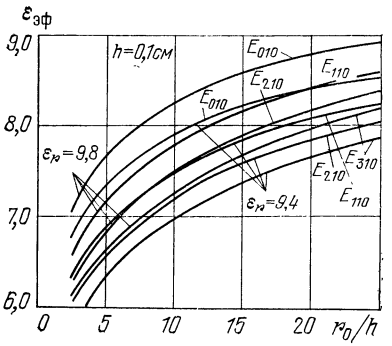



Рис. 3.100

Рис. 3.101



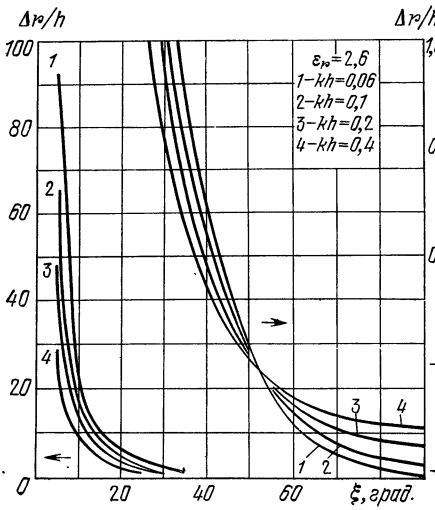




Рис. 3.102

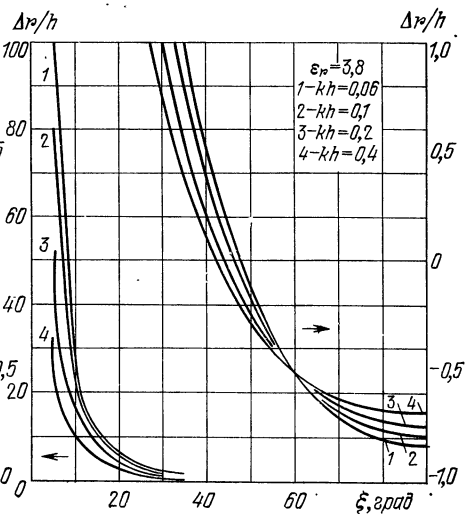



Рис. 3.103

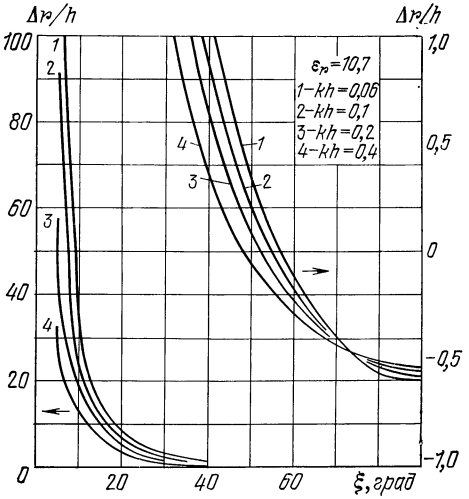
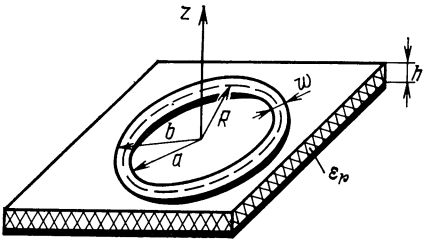



Рис. 3.104

Рис. 3.105



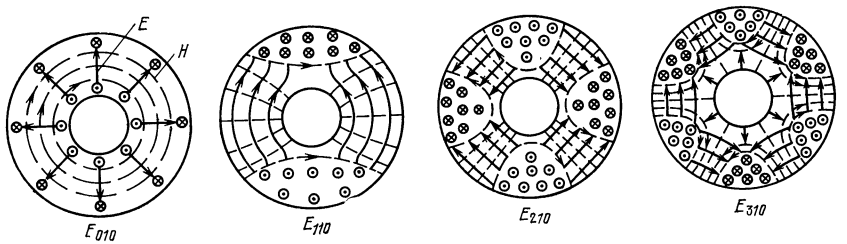




Рис. 3.106

где $k_0 = 2\pi/\lambda_{рез}$ — волновое число свободного пространства. Для колебаний с $m \neq 0$ $\xi \approx \arccos(m/\nu_{mn})$. Значения $\Delta r$ определяются по графикам на рис. 3.102—3.104, где построена зависимость размеров резонатора ($\Delta r/h$) от угла скольжения $\xi$ при различных значениях параметров $kh$ ($k = (2\pi/\lambda_{рез})\sqrt{\varepsilon_r}$) и $\varepsilon_r$.

## ПЛОСКИЕ КОЛЬЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Общий вид резонатора показан на рис. 3.105. Если толщина диэлектрической подложки мала ($h \leqslant 0{,}2$ см; $h/R \leqslant 0{,}1$), то в резонаторе возможно существование колебаний типа квази-Е, у которых практически отсутствует зависимость полей от координаты $z$. На рис. 3.106 изображены структуры полей колебаний $E_{010}$, $E_{110}$, $E_{210}$, $E_{310}$.

Резонансные длины волн кольцевого резонатора при $n = 1$ описываются выражением [3.25]

$$\lambda_{рез} = 2\pi R\sqrt{\varepsilon_{эф}}/\nu_{m1}, \tag{3.53}$$

где $R \approx 0{,}875b\,(1 + 0{,}143\cos 2\pi a/b)$; $\nu_{m1}$ — первый корень трансцендентного уравнения

$$J'_m(\nu_{m1})\,Y'_m(\nu_{m1}\,b/a) = J'_m(\nu_{m1}\,b/a)\,Y'_m(\nu_{m1}); \tag{3.54}$$

$J'_m(x)$ и $Y'_m(x)$ — производные функции Бесселя соответственно первого и второго рода $m$-го порядка. Значения $\nu_{m1}$ приведены в табл. 3.7. Проницаемость $\varepsilon_{эф}$ можно определить при ширине кольца меньше $\lambda_{рез}/4$ по формуле (2.73).

Таблица 3.7

**Корни уравнения (3.54)**

| $w/R$ | $\nu_{m_1}$ при $m$, равном | | | | $w/R$ | $\nu_{m_1}$ при $m$, равном | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0,1 | | 2,055 | 4,100 | 6,074 | 0,6 | 5,676 | 2,060 | 3,864 | 5,381 |
| 0,2 | 15,95 | 2,055 | 4,100 | 6,062 | 0,7 | 5,062 | 2,057 | 3,662 | 5,025 |
| 0,3 | 10,58 | 2,055 | 4,100 | 6,060 | 0,8 | 4,515 | 2,045 | 3,470 | 4,738 |
| 0,4 | 8,135 | 2,060 | 4,085 | 5,965 | 0,9 | 4,150 | 1,925 | 3,235 | 4,435 |
| 0,5 | 6,551 | 2,061 | 4,015 | 5,678 | 1,0 | 3,832 | 1,841 | 3,054 | 4,200 |

Чем шире кольцо, тем более высокие типы колебаний могут возбудиться и поддерживаться в подобной структуре. При ширине кольца, большей $\lambda/2$, в резонаторе могут возникнуть высшие типы колебаний $E_{mn0}$, $n > 1$. При $w/R \to 1$ кольцевой резонатор переходит в резонатор с круглым поперечным сечением.

Точность получаемых результатов зависит от точности определения $\varepsilon_{эф}$. Если $\varepsilon_{эф}$ определяется по формуле (2.73) (для прямолинейной полосковой линии), точность получаемых результатов можно оценить по графикам на рис. 3.107 [3.25]. Результаты расчета $\lambda_{рез}$ по формуле (3.53) сведены в табл. 3.8.

## ПЛОСКИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

При расчете такого резонатора (рис. 3.108) используются результаты теории эллиптических волноводов [3.27, 3.28]. В эллиптическом, как и в круглом, резонаторе в общем случае возможно существование колебаний смешанного типа. Когда толщина подложки мала ($h \ll 2a$), что характерно для большинства резонаторов, вариациями поля вдоль оси $z$ можно пренебречь. Особенностью эллиптического резонатора является возможность существования в нем колебаний двух видов: четных квази-$E^s_{mn0}$ с составляющими электромагнитного поля, симметричными относительно главной оси эллипса, и нечетных квази-$E^c_{mn0}$, симметричных относительно малой оси. На рис. 3.109 построена структура поля некоторых типов колебаний в эллиптическом резонаторе.

Резонансные длины волн определяются из выражения [3.27, 3.28]

$$\lambda_{рез} = a\pi\sqrt{\varepsilon_{эф}}\, e/\sqrt{q^{s,c}_{mn}}, \qquad (3.55)$$

где $\varepsilon_{эф}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость подложки резонатора; $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$ — эксцентриситет; $q^{s,c}_{mn}$ — $n$-й корень четной или нечетной мо-

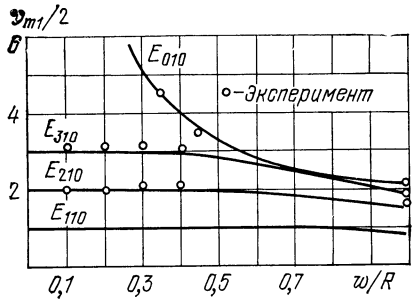



Рис. 3.107

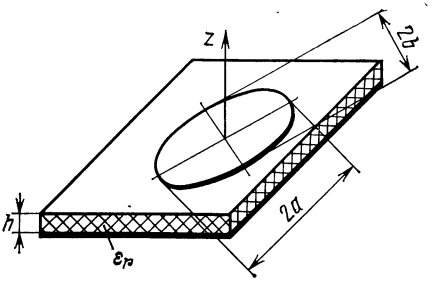



Рис. 3. 108

Резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, см, плоского кольцевого

| $w/R$ | $w=0,1$ см | | | $w=0,3$ см | | | $w=0,5$ см | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ |
| | | | | | | | | | $\varepsilon_r=2,3$; |
| 0,1 | 4,170 | 2,090 | 1,402 | 12,91 | 6,475 | 4,340 | 21,85 | 10,97 | 7,375 |
| 0,2 | 2,080 | 1,042 | 0,704 | 6,430 | 3,220 | 2,178 | 10,91 | 5,460 | 3,695 |
| 0,3 | 1,385 | 0,687 | 0,469 | 4,285 | 2,145 | 1,452 | 7,271 | 3,640 | 2,464 |
| 0,4 | 1,035 | 0,522 | 0,398 | 3,205 | 1,618 | 1,106 | 5,435 | 2,741 | 1,875 |
| 0,5 | 0,829 | 0,425 | 0,301 | 2,565 | 1,314 | 0,930 | 4,345 | 2,235 | 1,560 |
| 0,6 | 0,689 | 0,367 | 0,264 | 2,138 | 1,139 | 0,818 | 3,619 | 1,928 | 1,385 |
| 0,7 | 0,594 | 0,333 | 0,243 | 1,835 | 1,028 | 0,750 | 3,110 | 1,747 | 1,273 |
| 0,8 | 0,522 | 0,307 | 0,225 | 1,612 | 0,951 | 0,697 | 2,735 | 1,614 | 1,128 |
| 0,9 | 0,492 | 0,293 | 0,214 | 1,522 | 0,906 | 0,661 | 2,585 | 1,539 | 1,122 |
| 1,0 | 0,463 | 0,280 | 0,203 | 1,433 | 0,865 | 0,629 | 2,435 | 1,465 | 1,065 |
| | | | | | | | | | $\varepsilon_r=2,7$; |
| 0,1 | 4,450 | 2,227 | 1,496 | 13,85 | 6,942 | 4,665 | 23,48 | 11,75 | 7,120 |
| 0,2 | 2,218 | 1,109 | 0,751 | 6,900 | 3,455 | 2,337 | 11,70 | 6,855 | 3,963 |
| 0,3 | 1,476 | 0,738 | 0,499 | 4,595 | 2,300 | 1,556 | 7,825 | 3,910 | 2,650 |
| 0,4 | 1,103 | 0,557 | 0,382 | 3,440 | 1,735 | 1,188 | 5,725 | 2,940 | 2,013 |
| 0,5 | 0,882 | 0,453 | 0,320 | 2,750 | 1,411 | 0,998 | 4,671 | 2,315 | 1,694 |
| 0,6 | 0,734 | 0,391 | 0,281 | 2,293 | 1,221 | 0,878 | 3,883 | 2,070 | 1,485 |
| 0,7 | 0,632 | 0,355 | 0,259 | 1,968 | 1,105 | 0,805 | 3,339 | 1,875 | 1,365 |
| 0,8 | 0,556 | 0,328 | 0,240 | 1,731 | 1,021 | 0,718 | 2,940 | 1,731 | 1,264 |
| 0,9 | 0,526 | 0,313 | 0,229 | 1,633 | 0,972 | 0,709 | 2,775 | 1,652 | 1,205 |
| 1,0 | 0,494 | 0,298 | 0,216 | 1,540 | 0,928 | 0,675 | 2,615 | 1,575 | 1,145 |
| | | | | | | | | | $\varepsilon_r=5$; |
| 0,1 | 5,682 | 2,850 | 1,915 | 17,78 | 8,910 | 5,980 | 30,30 | 15,19 | 10,21 |
| 0,2 | 2,835 | 1,418 | 0,960 | 8,840 | 4,425 | 2,995 | 15,09 | 7,550 | 5,150 |
| 0,3 | 1,889 | 0,945 | 0,639 | 5,900 | 2,955 | 2,000 | 10,08 | 5,050 | 3,415 |
| 0,4 | 1,412 | 0,712 | 0,487 | 4,417 | 2,225 | 1,523 | 7,525 | 3,800 | 2,595 |
| 0,5 | 1,131 | 0,580 | 0,411 | 3,535 | 1,810 | 1,281 | 6,021 | 3,040 | 2,185 |
| 0,6 | 0,942 | 0,502 | 0,361 | 2,943 | 1,568 | 1,125 | 5,010 | 2,670 | 1,920 |
| 0,7 | 0,809 | 0,456 | 0,331 | 2,520 | 1,416 | 1,031 | 4,312 | 2,421 | 1,765 |
| 0,8 | 0,712 | 0,419 | 0,307 | 2,220 | 1,308 | 0,957 | 3,795 | 2,235 | 1,638 |
| 0,9 | 0,672 | 0,400 | 0,292 | 2,095 | 1,248 | 0,912 | 3,585 | 2,134 | 1,575 |
| 1,0 | 0,632 | 0,381 | 0,277 | 1,975 | 1,190 | 0,875 | 3,370 | 2,030 | 1,477 |
| | | | | | | | | | $\varepsilon_r=9,6$; |
| 0,1 | 7,675 | 3,845 | 2,583 | 24,16 | 12,10 | 8,125 | 41,65 | 20,69 | 13,90 |
| 0,2 | 3,823 | 1,915 | 1,295 | 12,01 | 6,021 | 4,072 | 20,57 | 10,30 | 6,972 |
| 0,3 | 2,545 | 1,272 | 0,862 | 8,010 | 4,021 | 2,710 | 13,73 | 6,875 | 4,660 |
| 0,4 | 1,905 | 0,962 | 0,657 | 5,985 | 3,121 | 2,065 | 10,25 | 5,175 | 3,540 |
| 0,5 | 1,526 | 0,782 | 0,553 | 4,792 | 2,457 | 1,738 | 8,200 | 4,211 | 2,978 |
| 0,6 | 1,269 | 0,676 | 0,486 | 3,995 | 2,130 | 1,530 | 6,825 | 3,640 | 2,615 |
| 0,7 | 1,092 | 0,612 | 0,446 | 3,430 | 1,925 | 1,402 | 5,875 | 3,300 | 2,403 |
| 0,8 | 0,960 | 0,566 | 0,435 | 3,020 | 1,778 | 1,302 | 5,165 | 3,042 | 2,231 |
| 0,9 | 0,906 | 0,539 | 0,394 | 2,847 | 1,694 | 1,237 | 4,878 | 2,904 | 2,121 |
| 1,0 | 0,853 | 0,514 | 0,334 | 2,684 | 1,618 | 1,175 | 4,585 | 2,765 | 2,050 |

Таблица 3.8

резонатора

| $w = 0,7$ см | | | $w = 0,9$ см | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ | $E_{110}$ | $E_{210}$ | $E_{310}$ |
| $h = 0,2$ см | | | | | |
| 30,91 | 15,51 | 10,42 | 30,01 | 20,02 | 13,49 |
| 15,42 | 7,725 | 5,220 | 19,94 | 9,992 | 6,755 |
| 10,29 | 5,145 | 3,481 | 13,28 | 6,645 | 4,500 |
| 7,680 | 3,875 | 2,655 | 9,945 | 5,015 | 3,430 |
| 6,151 | 3,158 | 2,230 | 7,955 | 4,081 | 2,885 |
| 5,135 | 2,730 | 1,960 | 6,625 | 3,625 | 2,536 |
| 4,400 | 2,475 | 1,802 | 5,685 | 3,191 | 2,325 |
| 3,878 | 2,281 | 1,672 | 5,008 | 2,950 | 2,160 |
| 3,655 | 2,177 | 1,589 | 4,763 | 2,815 | 2,053 |
| 3,440 | 2,073 | 1,507 | 4,450 | 2,683 | 1,951 |
| $h = 0,2$ см | | | | | |
| 33,25 | 16,67 | 11,19 | 42,15 | 21,59 | 14,50 |
| 16,55 | 8,281 | 5,600 | 21,45 | 10,75 | 7,275 |
| 11,01 | 5,515 | 3,735 | 14,32 | 7,160 | 4,847 |
| 8,245 | 4,160 | 2,845 | 10,70 | 5,400 | 3,690 |
| 6,594 | 3,382 | 2,394 | 3,555 | 4,382 | 3,107 |
| 5,493 | 2,925 | 2,104 | 7,141 | 3,803 | 2,735 |
| 4,722 | 2,655 | 1,934 | 6,122 | 3,440 | 2,504 |
| 4,162 | 2,450 | 1,795 | 5,380 | 3,175 | 2,326 |
| 3,920 | 2,335 | 1,706 | 5,084 | 3,030 | 2,211 |
| 3,691 | 2,224 | 1,617 | 4,788 | 2,885 | 2,099 |
| $h = 0,1$ см | | | | | |
| 43,12 | 21,65 | 14,35 | 56,12 | 28,11 | 18,91 |
| 21,48 | 10,75 | 7,280 | 27,92 | 13,95 | 9,160 |
| 14,34 | 7,175 | 4,861 | 13,63 | 9,325 | 6,314 |
| 10,71 | 5,411 | 3,700 | 13,92 | 7,035 | 4,813 |
| 8,575 | 4,397 | 3,109 | 11,12 | 5,716 | 4,046 |
| 7,125 | 3,900 | 2,730 | 9,300 | 4,961 | 3,560 |
| 6,142 | 3,450 | 2,516 | 7,987 | 4,477 | 3,260 |
| 5,411 | 3,185 | 2,333 | 7,008 | 4,135 | 3,027 |
| 5,097 | 3,034 | 2,217 | 6,625 | 3,945 | 2,881 |
| 4,795 | 2,890 | 2,100 | 6,241 | 3,860 | 2,732 |
| $h = 0,1$ см | | | | | |
| 58,75 | 29,45 | 19,77 | 76,81 | 38,50 | 25,85 |
| 29,23 | 14,62 | 9,390 | 38,25 | 19,15 | 12,95 |
| 19,49 | 9,750 | 6,600 | 23,50 | 12,75 | 8,645 |
| 14,59 | 7,361 | 5,035 | 19,05 | 9,625 | 6,577 |
| 11,65 | 5,975 | 4,225 | 15,23 | 7,815 | 5,525 |
| 9,710 | 5,175 | 3,710 | 12,71 | 6,775 | 4,871 |
| 8,392 | 4,685 | 3,415 | 10,90 | 6,123 | 4,461 |
| 7,375 | 4,324 | 3,170 | 9,595 | 5,662 | 4,148 |
| 6,925 | 4,122 | 3,050 | 9,065 | 5,398 | 3,935 |
| 6,525 | 3,933 | 2,860 | 8,574 | 5,148 | 3,740 |

Таблица 3.9

**Значения $q_{m_1}^{s,c}$ для основных типов колебаний**

| $e$ | $m$ | $q_{m1}^{s}$ | $q_{m1}^{c}$ |
|---|---|---|---|
| 0,1 | 0 | — | 0,03670 |
| | 1 | 0,00847 | 0,00847 |
| | 2 | 0,02330 | 0,02330 |
| | 3 | 0,04422 | 0,04422 |
| | 4 | 0,07091 | 0,07091 |
| 0,2 | 0 | — | 0,14940 |
| | 1 | 0,03411 | 0,03390 |
| | 2 | 0,09550 | 0,09550 |
| | 3 | 0,17978 | 0,17978 |
| | 4 | 0,28730 | 0,28730 |
| 0,3 | 0 | — | 0,34398 |
| | 1 | 0,08370 | 0,07630 |
| | 2 | 0,22400 | 0,22400 |
| | 3 | 0,41330 | 0,41330 |
| | 4 | 0,65610 | 0,65610 |
| 0,4 | 0 | — | 0,64000 |
| | 1 | 0,16000 | 0,13580 |
| | 2 | 0,40580 | 0,40580 |
| | 3 | 0,76240 | 0,76240 |
| | 4 | 1,20870 | 1,20870 |
| 0,5 | 0 | — | 1,09200 |
| | 1 | 0,28020 | 0,21180 |
| | 2 | 0,68680 | 0,64400 |
| | 3 | 1,25440 | 1,25440 |
| | 4 | 2,00830 | 2,00830 |
| 0,6 | 0 | — | 1,80630 |
| | 1 | 0,46380 | 0,30500 |
| | 2 | 1,07740 | 0,97420 |
| | 3 | 1,96160 | 1,88080 |
| | 4 | 3,08150 | 3,08150 |
| 0,7 | 0 | — | 2,99100 |
| | 1 | 0,77480 | 0,41520 |
| | 2 | 1,66800 | 1,37480 |
| | 3 | 2,95840 | 2,68960 |
| | 4 | 4,66560 | 4,49440 |
| 0,8 | 0 | — | 5,33610 |
| | 1 | 1,44000 | 0,54230 |
| | 2 | 2,76890 | 1,86050 |
| | 3 | 4,49920 | 3,73920 |
| | 4 | 7,00580 | 6,32160 |
| 0,9 | 0 | — | 11,8510 |
| | 1 | 3,24000 | 0,68630 |
| | 2 | 5,73120 | 2,38240 |
| | 3 | 8,23520 | 4,93600 |
| | 4 | 11,6964 | 8,56310 |
| 1,0 | 0 | — | — |
| | 1 | — | 0,84730 |
| | 2 | — | 3,06250 |
| | 3 | — | 6,43710 |
| | 4 | — | 11,0224 |

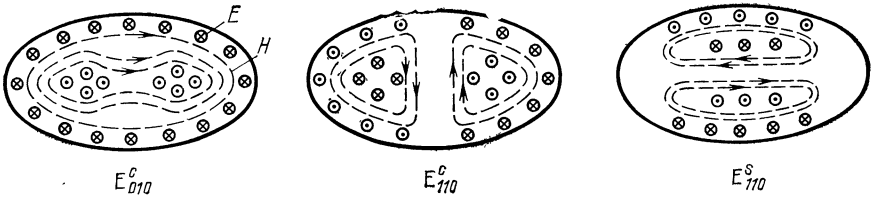



Рис. 3.109

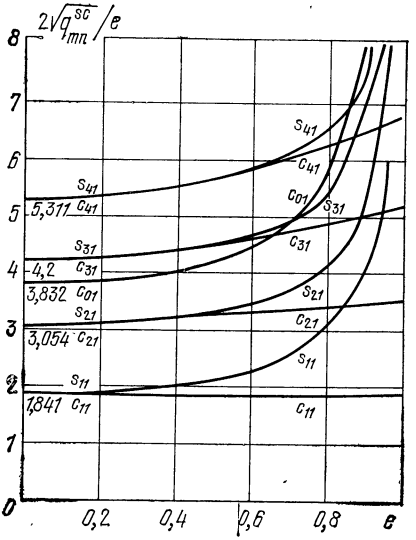



Рис. 3.110

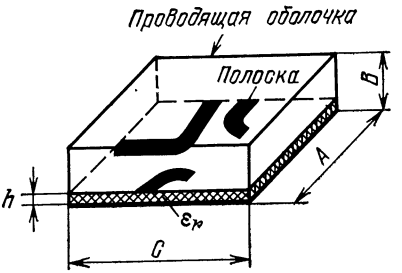



Рис. 3.111

дифицированной функции Матье первого рода $m$-го порядка. В табл. 3.9 приведены значения $q^{s,c}_{mn}$ для нескольких первых типов колебаний, а на рис. 3.110—зависимости этого же параметра от эксцентриситета и типа колебаний. Отметим, что при $e \to 0$ значения $q^{s,c}_{mn}$ стремятся к значениям $n$-х корней производной функции Бесселя $m$-го порядка.

При определении $\varepsilon_{эф}$ в простейшем случае можно исходить из предположения, что $\varepsilon_{эф} = (\varepsilon^{(a)}_{эф} + \varepsilon^{(b)}_{эф})/2$, где $\varepsilon^{(a)}_{эф}$ и $\varepsilon^{(b)}_{эф}$ — эффективные диэлектрические проницаемости круглых резонаторов соответственно с $r=a$ и $r=b$, и воспользоваться формулами для плоского круглого резонатора. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для колебаний основных типов, как четных, так и нечетных, показывает, что погрешность не превышает 7% [3.28] при изменении эксцентриситета в пределах 0 ... 1 ($h \leqslant 0{,}2$ см).

В табл. 3.10, 3.11 приведены резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, рассчитанные по формуле (3.55), для колебаний типов $E^c_{010}$, $E^c_{110}$, $E^c_{210}$, $E^s_{110}$, $E^s_{210}$ в зависимости от величины $a$ и параметра $e$ при различных значениях $\varepsilon_r$ и $h$.

## ОБЪЕМНЫЙ ПОЛОСКОВЫЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

Резонатор представляет собой объем, ограниченный со всех сторон металлической прямоугольной оболочкой, внутри которого находятся диэлектрическая подложка, возбуждающие устройства или отдельные элементы полоскового тракта (рис. 3.111). Как показано в [3.29], подобную структуру можно рассматривать как прямоугольный волновод, частично заполненный диэлектриком. Обозначим длину волны в такой структуре через $\Lambda$. Высота $B$ проводящей оболочки обычно не превышает $\Lambda/2$. Резонансные длины волн резонатора при малых $h/B$

$$\lambda_{рез} \approx 2\sqrt{D}A/\sqrt{m^2+(nA/C)^2}, \qquad (3.56)$$

Таблица 3.10

**Резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, см, эллиптического резонатора для колебаний $E^c_{m10}$ при различных значениях $m$**

| $a$, см | $e=0,1$ | | | $e=0,3$ | | | $e=0,5$ | | | $e=0,7$ | | | $e=0,9$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| $\varepsilon_r=2,3$; $h=0,2$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1,133 | 2,359 | 1,422 | 1,110 | 2,357 | 1,376 | 1,037 | 2,355 | 1,350 | 0,872 | 2,349 | 1,291 | 0,562 | 2,337 | 1,254 |
| 1,0 | 2,315 | 4,818 | 2,905 | 2,267 | 4,813 | 2,809 | 2,117 | 4,807 | 2,757 | 1,781 | 4,793 | 2,634 | 1,145 | 4,760 | 2,555 |
| 1,5 | 3,516 | 7,319 | 4,413 | 3,443 | 7,311 | 4,267 | 3,216 | 7,302 | 4,188 | 2,710 | 7,280 | 4,001 | 1,739 | 7,226 | 3,878 |
| 2,0 | 4,728 | 9,841 | 5,933 | 4,630 | 9,831 | 5,737 | 4,325 | 9,820 | 5,632 | 3,661 | 9,791 | 5,381 | 2,339 | 9,718 | 5,216 |
| 2,5 | 5,946 | 12,38 | 7,462 | 5,823 | 12,36 | 7,216 | 5,440 | 12,36 | 7,084 | 4,575 | 12,32 | 6,769 | 2,942 | 12,23 | 6,563 |
| $\varepsilon_r=2,7$; $h=0,2$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1,212 | 2,524 | 1,522 | 1,187 | 2,521 | 1,471 | 1,109 | 2,518 | 1,444 | 0,935 | 2,511 | 1,380 | 0,601 | 2,496 | 1,340 |
| 1,0 | 2,484 | 5,171 | 3,117 | 2,432 | 5,164 | 3,014 | 2,271 | 5,157 | 2,957 | 1,915 | 5,139 | 2,824 | 1,227 | 5,098 | 2,736 |
| 1,5 | 3,780 | 7,868 | 4,744 | 3,704 | 7,859 | 4,587 | 3,456 | 7,848 | 4,501 | 2,890 | 7,821 | 4,298 | 1,866 | 7,754 | 4,162 |
| 2,0 | 5,089 | 10,59 | 6,387 | 4,983 | 10,58 | 6,175 | 4,654 | 10,57 | 6,060 | 3,921 | 10,53 | 5,788 | 2,513 | 10,44 | 5,604 |
| 2,5 | 6,406 | 13,33 | 8,039 | 6,273 | 13,32 | 7,773 | 5,859 | 13,30 | 7,629 | 4,945 | 13,26 | 7,288 | 3,165 | 13,15 | 7,058 |
| $\varepsilon_r=4,8$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1,614 | 3,360 | 2,026 | 1,580 | 3,355 | 1,958 | 1,474 | 3,348 | 1,920 | 1,241 | 3,332 | 1,831 | 0,793 | 3,295 | 1,769 |
| 1,0 | 3,334 | 6,940 | 4,185 | 3,264 | 6,931 | 4,045 | 3,047 | 6,918 | 3,968 | 2,570 | 6,888 | 3,785 | 1,638 | 6,808 | 3,654 |
| 1,5 | 5,084 | 10,58 | 6,380 | 4,978 | 10,57 | 6,168 | 4,647 | 10,55 | 6,052 | 3,910 | 10,51 | 5,776 | 2,562 | 10,40 | 5,581 |
| 2,0 | 6,846 | 14,25 | 8,592 | 6,704 | 14,23 | 8,308 | 6,261 | 14,22 | 8,153 | 5,275 | 14,17 | 7,785 | 3,375 | 14,02 | 7,528 |
| 2,5 | 8,617 | 17,94 | 10,81 | 8,439 | 17,92 | 10,46 | 7,882 | 17,90 | 10,26 | 6,650 | 17,84 | 9,804 | 4,254 | 17,68 | 9,487 |

*Окончание табл. 3.10*

| $a$, см | $e=0,1$ | | | $e=0,3$ | | | $e=0,5$ | | | $e=0,7$ | | | $e=0,9$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| $\varepsilon_r=5,2$; $h=0,9$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1,675 | 3,488 | 2,103 | 1,640 | 3,482 | 2,032 | 1,530 | 3,475 | 1,993 | 1,286 | 3,458 | 1,900 | 0,823 | 3,419 | 1,835 |
| 1,0 | 3,464 | 7,211 | 4,348 | 3,391 | 7,201 | 4,203 | 3,165 | 7,188 | 4,122 | 2,665 | 7,155 | 3,932 | 1,701 | 7,070 | 3,795 |
| 1,5 | 5,284 | 11,00 | 6,632 | 5,174 | 10,98 | 6,411 | 4,830 | 10,97 | 6,290 | 4,068 | 10,92 | 6,003 | 2,600 | 10,80 | 5,798 |
| 2,0 | 7,118 | 14,82 | 8,933 | 6,970 | 14,80 | 8,637 | 6,509 | 14,78 | 8,476 | 5,475 | 14,73 | 8,093 | 3,508 | 14,58 | 7,823 |
| 2,5 | 8,960 | 18,65 | 11,24 | 8,775 | 18,63 | 10,87 | 8,196 | 18,61 | 10,67 | 6,781 | 18,55 | 10,19 | 4,422 | 18,37 | 9,862 |
| $\varepsilon_r=9,4$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 2,220 | 4,621 | 2,786 | 2,173 | 4,613 | 2,692 | 2,027 | 4,602 | 2,639 | 1,703 | 4,576 | 2,515 | 1,087 | 4,516 | 2,424 |
| 1,0 | 4,613 | 9,601 | 5,789 | 4,515 | 9,587 | 5,595 | 4,213 | 9,566 | 5,486 | 3,550 | 9,516 | 5,230 | 2,259 | 9,387 | 5,038 |
| 1,5 | 7,052 | 14,68 | 8,850 | 6,904 | 14,66 | 8,555 | 6,444 | 14,63 | 8,391 | 5,400 | 14,56 | 8,004 | 3,461 | 14,38 | 7,719 |
| 2,0 | 9,512 | 19,80 | 11,94 | 9,314 | 19,78 | 11,54 | 8,696 | 19,74 | 11,32 | 7,352 | 19,66 | 10,81 | 4,677 | 19,44 | 10,43 |
| 2,5 | 11,98 | 24,95 | 15,04 | 11,74 | 24,92 | 14,54 | 10,96 | 24,88 | 14,27 | 9,225 | 24,79 | 13,62 | 5,903 | 24,53 | 13,16 |
| $\varepsilon_r=9,8$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 2,265 | 4,715 | 2,843 | 2,217 | 4,707 | 2,747 | 2,068 | 4,695 | 2,693 | 1,738 | 4,669 | 2,566 | 1,108 | 4,606 | 2,472 |
| 1,0 | 4,707 | 9,799 | 5,908 | 4,608 | 9,784 | 5,710 | 4,299 | 9,762 | 5,598 | 3,615 | 9,711 | 5,337 | 2,305 | 9,578 | 5,141 |
| 1,5 | 7,198 | 14,98 | 9,033 | 7,046 | 14,96 | 8,732 | 6,577 | 14,93 | 8,564 | 5,543 | 14,86 | 8,169 | 3,532 | 14,68 | 7,877 |
| 2,0 | 9,710 | 20,21 | 12,19 | 9,507 | 20,19 | 11,78 | 8,876 | 20,15 | 11,56 | 7,475 | 20,07 | 11,03 | 4,774 | 19,84 | 10,65 |
| 2,5 | 12,23 | 25,47 | 15,35 | 11,98 | 25,44 | 14,85 | 11,19 | 25,40 | 14,57 | 9,415 | 25,31 | 13,91 | 6,025 | 25,04 | 13,44 |

Таблица 3.11

**Резонансные длины волн $\lambda_{рез}$, см, плоского эллиптического резонатора для колебаний $E^s_{m10}$ при различных значениях $m$**

| $a$, см | $e=0,1$ | | $e=0,3$ | | $e=0,5$ | | $e=0,7$ | | $e=0,9$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| $\varepsilon_r=2,3$; $h=0,2$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 2,359 | 1,422 | 2,250 | 1,376 | 2,047 | 1,308 | 1,719 | 1,172 | 1,076 | 0,809 |
| 1,0 | 4,818 | 2,905 | 4,595 | 2,809 | 4,179 | 2,670 | 3,508 | 2,391 | 2,191 | 1,647 |
| 1,5 | 7,319 | 4,413 | 6,980 | 4,267 | 6,349 | 4,055 | 5,329 | 3,632 | 3,326 | 2,500 |
| 2,0 | 9,841 | 5,933 | 9,386 | 5,737 | 8,538 | 5,453 | 7,168 | 4,885 | 4,473 | 3,363 |
| 2,5 | 12,38 | 7,462 | 11,80 | 7,216 | 10,74 | 6,860 | 9,017 | 6,145 | 5,627 | 4,231 |
| $\varepsilon_r=2,7$; $h=0,2$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 2,542 | 1,522 | 2,407 | 1,471 | 2,189 | 1,398 | 1,838 | 1,253 | 1,149 | 0,864 |
| 1,0 | 5,171 | 3,117 | 4,931 | 3,014 | 4,484 | 2,864 | 3,762 | 2,564 | 2,346 | 1,764 |
| 1,5 | 7,868 | 4,744 | 7,503 | 4,587 | 6,823 | 4,358 | 5,725 | 3,902 | 3,569 | 2,683 |
| 2,0 | 10,59 | 6,387 | 10,10 | 6,175 | 9,187 | 5,868 | 7,710 | 5,254 | 4,806 | 3,613 |
| 2,5 | 13,33 | 8,039 | 12,72 | 7,773 | 11,57 | 7,388 | 9,708 | 6,616 | 6,052 | 4,551 |
| $\varepsilon_r=4,8$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 3,360 | 2,006 | 3,203 | 1,958 | 2,911 | 1,859 | 2,439 | 1,662 | 1,517 | 1,140 |
| 1,0 | 6,940 | 4,185 | 6,617 | 4,045 | 6,015 | 3,842 | 5,042 | 3,436 | 3,133 | 2,356 |
| 1,5 | 10,58 | 6,380 | 10,09 | 6,168 | 9,175 | 5,860 | 7,694 | 5,244 | 4,785 | 3,598 |
| 2,0 | 14,25 | 8,592 | 13,59 | 8,308 | 12,36 | 7,895 | 10,37 | 7,068 | 6,455 | 4,853 |
| 2,5 | 17,94 | 10,81 | 17,11 | 10,46 | 15,56 | 9,939 | 13,06 | 8,901 | 8,135 | 6,116 |
| $\varepsilon_r=5,2$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 3,488 | 2,103 | 3,325 | 2,032 | 3,021 | 1,930 | 2,532 | 1,725 | 1,573 | 1,183 |
| 1,0 | 7,211 | 4,348 | 6,875 | 4,203 | 6,249 | 3,991 | 5,237 | 3,570 | 3,254 | 2,447 |
| 1,5 | 11,00 | 6,635 | 10,49 | 6,411 | 9,536 | 6,091 | 7,996 | 5,450 | 4,972 | 3,738 |
| 2,0 | 14,82 | 8,933 | 14,13 | 8,637 | 12,85 | 8,208 | 10,78 | 7,347 | 6,708 | 5,044 |
| 2,5 | 18,65 | 11,24 | 17,19 | 10,87 | 16,18 | 10,33 | 13,58 | 9,254 | 8,456 | 6,358 |
| $\varepsilon_r=9,4$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 4,621 | 2,786 | 4,405 | 2,692 | 4,001 | 2,556 | 3,350 | 2,283 | 2,078 | 1,563 |
| 1,0 | 9,601 | 5,789 | 9,153 | 5,595 | 8,317 | 5,312 | 6,966 | 4,748 | 4,320 | 3,248 |
| 1,5 | 14,68 | 8,850 | 14,00 | 8,555 | 12,72 | 8,125 | 10,66 | 7,266 | 6,619 | 4,976 |
| 2,0 | 19,80 | 11,94 | 18,88 | 11,54 | 17,17 | 10,96 | 14,39 | 9,811 | 8,945 | 6,726 |
| 2,5 | 24,95 | 15,04 | 23,79 | 14,54 | 21,64 | 13,82 | 18,15 | 12,31 | 11,29 | 8,488 |
| $\varepsilon_r=9,8$; $h=0,1$ см | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 4,715 | 2,843 | 4,494 | 2,747 | 4,082 | 2,607 | 3,418 | 2,329 | 2,120 | 1,594 |
| 1,0 | 9,799 | 5,908 | 9,341 | 5,710 | 8,488 | 5,421 | 7,104 | 4,845 | 4,408 | 3,315 |
| 1,5 | 14,98 | 9,033 | 14,28 | 8,732 | 12,98 | 8,293 | 10,88 | 7,416 | 6,755 | 5,079 |
| 2,0 | 20,21 | 12,19 | 19,27 | 11,78 | 17,55 | 11,19 | 14,69 | 10,01 | 9,130 | 6,865 |
| 2,5 | 25,47 | 15,35 | 24,29 | 14,85 | 22,08 | 14,11 | 18,53 | 12,63 | 11,52 | 8,664 |

где $D = [1 - (h/B)(1 - \varepsilon_r^{-1})]^{-1}$; $m$ и $n$ — числа вариаций соответственно вдоль размеров $A$ и $C$.

Таблица 3.12

**Сравнение расчетных и экспериментальных данных**

| $\varepsilon_r$ | $m$ | $n$ | $A$, см | $C$, см | $B$, см | $h$, см | $\lambda_{рез}$, см | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | измеренная | расчетная |
| 9,5 | 1 | 1 | 2,67 | 2,67 | 0,99 | 0,14 | 3,895 | 4,040 |
| 9,5 | 2 | 1 | 5,08 | 1,91 | 0,99 | 0,14 | 3,280 | 3,265 |
| 9,5 | 1 | 1 | 2,36 | 2,39 | 0,70 | 0,06 | 3,530 | 3,490 |
| 16,0 | 2 | 1 | 3,81 | 2,22 | 0,84 | 0,14 | 3,190 | 3,190 |
| 16,0 | 1 | 1 | 2,54 | 2,54 | 0,71 | 0,13 | 3,950 | 3,940 |

Данный резонатор имеет более высокую по сравнению с обычным полосковым резонатором добротность, что может оказаться полезным. Однако чаще подобный резонатор образуется при неудачном выборе размеров полосковой платы, конструкции корпуса (см. гл. 4). В табл. 3.12 приведены результаты расчета по формуле (3.56) и экспериментальные данные [3.29]. Расхождение не превышает нескольких процентов.

Глава 4

# КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

## 4.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПОЛОСКОВЫМ УСТРОЙСТВАМ. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛОСКОВЫХ УЗЛОВ [4.1 — 4.18]

Сравнительные характеристики полосковых, коаксиальных и волноводных устройств указаны в табл. 4.1 [4.1]. Конструкции СВЧ узлов и аппаратуры развиваются в направлении комплексной миниатюризации, повышения надежности, экономичности изготовления и эксплуатации, уменьшения габаритных размеров отдельных элементов, повышения степени интеграции узлов, усложнения их функций и т. д. Внедрение технологии интегральных микросхем привело к существенному уменьшению объема СВЧ аппаратуры (в 5 ... 10 раз) по сравнению с аналогами в волноводном и коаксиальном исполнении. Сегодня в ряде случаев можно говорить о сближении конструктивного оформления СВЧ блоков на микросхемах (микросборках) с конструкциями низкочастотной аппаратуры в виде функциональных ячеек, что существенно упрощает сборку, регулировку и эксплуатацию СВЧ аппаратуры.

Таблица 4.1

**Качественное сравнение СВЧ конструкций в волноводном, коаксиальном и полосковом исполнении**

| Тип узла | Стоимость | | Потери в линии передачи | Собственная добротность | Рабочая мощность | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | разработки | изготовления | | | импульсная | средняя |
| Волноводный | Средняя | Низкая | Очень малые | Очень высокая | Очень высокая | Очень высокая |
| Коаксиальный | Средняя (до 12 ГГц), высокая (выше 12 ГГц) | Низкая (до 12 ГГц), средняя (выше 12 ГГц) | Малые | Высокая | Высокая | Высокая |
| На СПЛ | Ниже средней (до 12 ГГц), высокая (выше 12 ГГц) | Низкая (до 12 ГГц), средняя (выше 12 ГГц) | Средние | Невысокая | Невысокая | Средняя |
| На НПЛ | Высокая (до 12 ГГц), очень высокая (выше 12 ГГц) | Средняя | Большие | Низкая | Низкая | Низкая |

| Тип узла | Экранировка элементов схемы | Широкополосность | Масса и объем | Устойчивость к внешним воздействиям | Необходимость герметизации | Возможность герметизации |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Волноводный | Очень хорошая | Небольшая | Большие (до 12 ГГц), малые (выше 12 ГГц) | Хорошая | Как правило, не нужна | Трудно |
| Коаксиальный | » | Хорошая | Малые (до 12 ГГц), малые (выше 12 ГГц) | Хорошая | Как правило, не нужна | » |
| На СПЛ | Хорошая | » | Очень малые (до 12 ГГц), малые (выше 12 ГГц) | » | » | Очень трудно |
| На НПЛ | Слабая | » | Очень малые (до 12 ГГц), малые (выше 12 ГГц) | » | Нужна | Трудно |

| Тип узла | Возможность использования | | | | Сочетаемость с другими линиями передачи | Возможность ремонта в полевых условиях |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | полупроводников | ферритов | механических элементов | сосредоточенных элементов | | |
| Волноводный | Хорошая | Хорошая | Хорошая | Слабая | Хорошая | Хорошая |
| Коаксиальный | » | Слабая | Слабая | Хорошая | » | » |
| На СПЛ | » | Очень хорошая | » | Очень хорошая | » | Слабая |
| На НПЛ | Очень хорошая | Хорошая | » | » | » | Плохая |

К полосковому СВЧ устройству предъявляются следующие основные требования: малые габаритные размеры (по сравнению с аналогами в других конструктивных исполнениях); высококачественные электрические характеристики (конкурентоспособность по отношению к устройствам на линиях передачи других типов); технологичность конструкции, устойчивость электрических характеристик к климатическим и механическим воздействиям, их стабильность при длительной эксплуатации и хранении; удобство настройки и проверки в процессе эксплуатации, возможность ремонта или замены отдельных частей узла; возможность использования в устройстве серийно выпускаемых материалов и комплектующих изделий.

При создании конкретной конструкции полоскового узла необходимы подробные данные, касающиеся принципов и условий его работы и режимов использования, которые в основном содержатся в техническом задании на конструирование (ТЗК). Важнейшие из них: электрическая схема устройства и основные его характеристики; диапазон рабочих частот; проходящая мощность; на-

личие и тип навесных компонентов; число и тип присоединительных элементов; необходимость герметизации узла и конкретный вид ремонтных работ (или их отсутствие); желательный тип конструктивного оформления полоскового устройства (габаритные размеры и форма); предпочтительный технологический способ изготовления; предполагаемый объем серийного выпуска.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОЛОСКОВОГО СВЧ УЗЛА

При конструировании СВЧ узла на полосковых линиях прежде всего принимается решение об основных характеристиках конструкции: желательных размерах и массе узла, степени герметичности корпуса, виде и расположении разъемов, материале основания (подложки) полосковой схемы, наличии и виде теплоотвода, способе крепления платы в корпусе, основных технологических способах изготовления схемы, установке навесных компонентов и т. д. После определения основных характеристик проводится детальное конструирование узла [4.5], выбирается материал подложки и разрабатывается топология плат входящих в узел. Чертеж (эскиз) топологии выполняется либо «вручную», исходя из результатов электрического расчета схемы, либо с помощью ЭВМ, сопрягаемой с автоматическим координатографом или графопостроителем [4.14]. В последнем случае необходим специальный комплекс программ, обеспечивающих автоматическое проектирование. После разработки топологии создается чертеж сборки СВЧ платы, т. е. устанавливается, каким образом на плате размещаются навесные компоненты, затем уточняется окончательная конструкция корпуса.

Одна из конкретных задач на начальном этапе конструирования — выбор электрической схемы СВЧ узла и способа конструктивной реализации этой схемы: будет ли узел изготовлен на элементах с распределенными, сосредоточенными параметрами или на основе комбинации тех и других. Решение принимает разработчик узла. Однако конструктор также должен принимать в этом участие, так как элементы схемы должны удовлетворять правилам конструирования. Схемы на элементах с сосредоточенными параметрами по своим электрическим характеристикам нередко уступают схемам на элементах с распределенными параметрами в части, например, широкополосности [4.17]. При использовании элементов с сосредоточенными параметрами преследуют две основные цели: выигрыш в габаритных размерах, что особенно эффективно достигается с помощью простых конструктивно-технологических способов в метровом и дециметровом диапазонах, и возможность осуществления технических решений, которые трудно реализовать в схемах на элементах с распределенными параметрами, например цепей с высоким или низким волновым сопротивлением [4.15; 4.16].

Элементы с сосредоточенными параметрами довольно широко распространены в технике ИС СВЧ, нередко в сочетании с распределенными. В узлы вводят отдельные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности. Широко используется принцип эквивалентности Т- и П-звеньев фильтров высоких и низких частот отрезкам линий передачи. В полосе частот, где выполняется это условие, некоторые полосковые схемы можно заменить их «сосредоточенными» аналогами [4.16; 4.17]. Возможна также полная конструктивная реализация СВЧ устройства на элементах с сосредоточенными параметрами. Введение таких элементов может, однако, привести к усложнению технологического процесса и соответственно к снижению выхода годных узлов, т. е. требует от конструктора тщательного учета технологических возможностей изготовления полосковой платы.

Важным является вопрос о числе плат, на которых будет размещена схема узла, т. е. будет узел одно- или многоплатным. В последнем случае появляются проблемы соединения отдельных плат друг с другом, влияния зазора между платами на характеристики схемы и т. д., что в значительной степени определяет конструкцию внутренней части корпуса, допуски на установку плат, способ соединения плат (вид перемычек между ними). Вопрос о числе плат связан с разбиением схемы на отдельные части. Иногда на одной плате расположен законченный функциональный элемент или сложный узел, что позволяет до окончательной сборки провести его настройку и проверку. При реализации низкоча-

стотных узлов можно использовать «мозаичную конструкцию», когда схема выполняется на нескольких отдельных платах. В узлах на СПЛ с органическим диэлектриком чаще всего используют одну плату, нередко большого размера; форма ее может быть достаточно сложной, так как подобные диэлектрики легко обрабатываются. В сложных узлах на НПЛ с подложками из неорганических диэлектриков обычно применяют несколько плат прямоугольной формы [4.18]. Регламентировать число плат в одном узле достаточно трудно: ограничивающими факторами являются, в частности, технологические возможности сборки и возможность обслуживания узла в процессе эксплуатации.

Одним из важных решений, принимаемых конструктором, является степень защиты полоскового устройства от внешних воздействий (влажности, температуры и других факторов). Существует тенденция проектировать узлы, в которых герметизация внутреннего объема обеспечена соответствующей конструкцией корпуса и установкой герметичных коаксиально-полосковых переходов.

Конструктор, приступая к проектированию, должен ориентироваться на следующие основные нормативные документы (стандарты), регламентирующие терминологию, конструирование, технологию полосковых и интегральных схем СВЧ:

ГОСТ 21702—76. Устройства СВЧ, полосковые линии. Термины и определения;

ГОСТ 23221—78. Модули СВЧ, блоки. Термины, определения и буквенные обозначения;

ОСТ 4.Г0.010.202. Микросборки СВЧ диапазона. Конструирование;

ОСТ 4.ОК0.010.012. Микросборки гибридные СВЧ диапазона. Конструирование;

ОСТ.4.Г0.010.001. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Платы. Конструирование;

ОСТ.4.Г0.710.000. Платы печатные полосковые. Общие технические условия;

ОСТ.4.Г0.073.204. Микросхемы гибридные СВЧ диапазона. Платы микрополосковые. Общие технические условия;

ОСТ 4.073.207. Модули СВЧ интегральные. Методы автоматического моделирования;

ОСТ 4.023.008. Модули СВЧ интегральные. Методы автоматизации выпуска конструкторской документации;

ОСТ 4.Г0.030.200. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Платы. Материалы для диэлектрических оснований. Общие технические требования;

ОСТ.4.Г0.023.162. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Платы. Материалы для диэлектрических оснований. Методы испытаний;

ОСТ 4.070.000. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Элементы и узлы. Проектирование;

ОСТ 4.Г0.010.203. Микросборки СВЧ диапазона. Корпуса. Элементы типовых конструкций;

ОСТ 4.Г0.054.207. Микросборки СВЧ диапазона. Платы микрополосковые. Типовые технологические процессы;

ОСТ 4.Г0.054.008. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Платы. Типовые технологические процессы;

ОСТ 4.Г0.054.209. Микросборки СВЧ диапазона. Установка навесных элементов на микрополосковые платы. Типовые технологические процессы;

ОСТ 4.Г0.054.208. Микросборки СВЧ диапазона. Сборка и герметизация. Типовые технологические процессы;

ОСТ 4.Г0.012.208. Микросборки СВЧ диапазона. Расчет тепловых режимов.

Нормативная документация постоянно дополняется и изменяется по мере развития техники полосковых схем и унификации порядка конструирования, элементов конструкций и технологических процессов.

Результатом разработки и конструирования является комплект документации на полосковый узел, состоящий из ряда отдельных элементов (корпус, платы, переходы и т. д.), объединяемых в результате сборочных операций в еди-

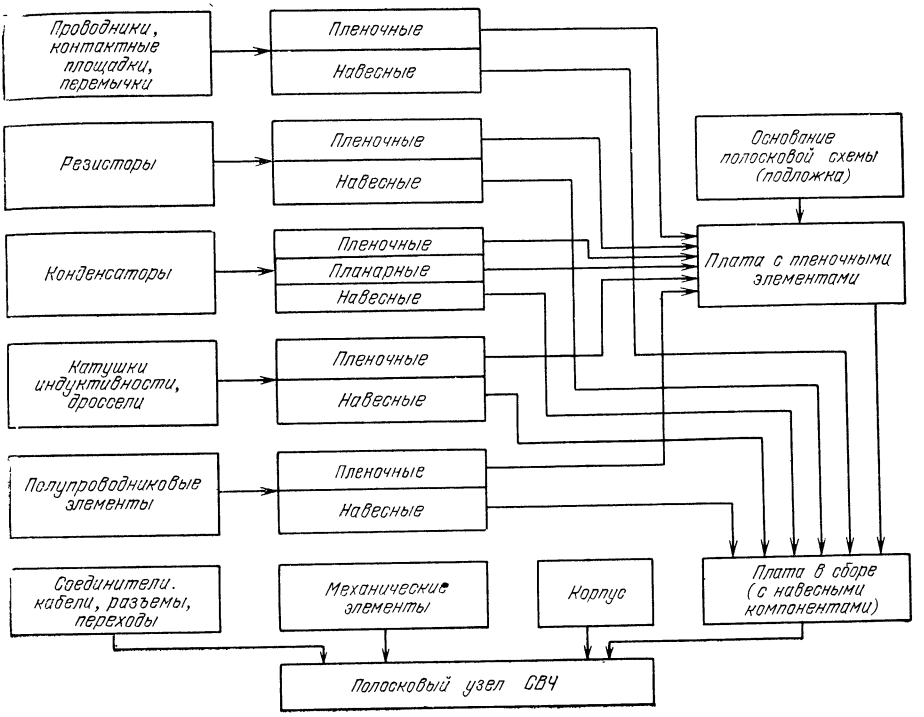



**Рис. 4.1**

ное устройство. От качества этих элементов зависят характеристики создаваемой конструкции. На рис. 4.1 изображен состав основных элементов полоскового узла СВЧ.

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСКОВЫХ УЗЛОВ

Технологические методы, описанные подробно в гл. 6, различаются способом и возможностью нанесения различных материалов (проводящих, диэлектрических, резистивных) на поверхность платы, способом получения рисунка конструктивных элементов схемы и реализуемой при этом точностью их изготовления; производственной характеристикой (сложностью оборудования, периодом освоения в серийном производстве, процентом выхода годных узлов, стоимостью изготовления СВЧ схем и т. п.). Основная задача любого технологического процесса — создание высококачественной полосковой линии, что предполагает обеспечение в ней малых потерь и возможно точное воспроизведение требуемых волнового сопротивления и электрической длины. Название технологического метода, как правило, соответствует методике нанесения проводящих (металлических) слоев [4.10].

**Тонкопленочная технология на основе химико-гальванической металлизации.** Достоинство метода — в его относительной простоте, несложности оборудования для металлизации, высокой производительности, высокой проводимости получаемого слоя. Предельные возможности метода указаны в табл. 4.2. Недостатки: невысокое качество поверхности подложки под проводящим слоем, что увеличивает потери в полосковой линии, особенно на высоких частотах; низкая по сравнению с другими видами металлизации прочность сцепления про-

Таблица 4.2

**Возможности технологических методов при изготовлении полосковых проводников**

| Метод изготовления проводниковых элементов СВЧ устройств | Возможная толщина металлизации, мкм | Минимальная[1] рекомендуемая ширина линии передачи, мкм | Минимальный[1] рекомендуемый зазор между проводниками, мкм | Допуск на линейные размеры, мкм |
|---|---|---|---|---|
| Химико-гальваническая металлизация + фотолитография | До 25 | 70...100[2] | 50...70[2] | ±(25...30)[2] |
| Вакуумная металлизация + фотолитография | До 20 | 40...70[2] | 30...50[2] | ±(10...15)[2] |
| Вакуумная металлизация + гальваническое наращивание + фотолитография | До 20 | 40...70[2] | 30...50[2] | ±(10...15)[2] |
| Вакуумная металлизация + фотолитография + гальваническое наращивание | До 10 | 30 | 20 | ±(5...10) |
| Толстопленочная технология | До 25 | 75...100[2] | 75...100[2] | ±30...50[2]<br>±12,5[3] |
| Травление слоя фольги (технология печатных плат на органических диэлектриках) | 35<br>Выше 35 | 300<br>500 | 300<br>400 | ±50 (при максимальном размере платы до 100 мм)<br>±100 |
| Вакуумная металлизация + фотолитография (технология полупроводниковых ИС и линий задержки на поверхностных акустических волнах) | До 1...2 | 3...5 | 3...5 | ±(1...2)[4] |
| Вакуумная металлизация + ионное травление | 6...10 | 10...15 | 10...15 | ±(2...4) |

[1] Минимальные при толщинах, близких к указанным в данной таблице.

[2] Разброс в значениях, достигнутых в серийном производстве, возникает из-за различия в применяемых материалах, оборудовании, культуре производства.

[3] Достижимые в ближайшее время разультаты при использовании нового оборудования и новых технологических методов (например, фотолитографии толстопленочного слоя).

[4] Высокий допуск достигается на тонких слоях металлизации. Для изготовления полосковых линий в диапазонах до 10 ГГц этот метод используется редко.

водящей пленки с диэлектриком; неоднородность толщины металлизации в пределах платы (особенно на платах больших размеров). Технология пригодна только для создания однослойных проводящих покрытий, т. е. для гибридных СВЧ конструкций.

**Тонкопленочная технология на основе вакуумного напыления.** Основные преимущества: гибкость и универсальность при изготовлении разнообразных элементов схемы, широкий диапазон размеров элементов (минимальны 0,5 ... ...1 мкм), высокая точность выполнения размеров элементов (допуск на ширину линии передачи соизмерим с толщиной слоя металлизации). По тонкопленочной технологии можно изготовлять любые пассивные элементы интегральных СВЧ узлов. В качестве навесных активных компонентов используются полупроводниковые приборы. Возможны также варианты изготовления полосковых схем с небольшим числом слоев (проводниковые схемы, схемы, содержащие проводниковую и резистивную части, и т. д.); при этом возможности метода используются не полностью. Основные недостатки метода: сложность требуемого оборудования, жесткие условия соблюдения технологических режимов, особые требования к производственной гигиене помещений, снижение процента годных плат при усложнении конструкции (максимальный выход годных для однослойных проводниковых плат; снижается в платах с проводниками и резисторами; минимален в схемах, содержащих проводники, резисторы и конденсаторы).

**Толстопленочная технология.** Популярность метода связана с его большими возможностями при изготовлении проводниковых, резистивных и емкостных элементов и с высокой производительностью процессов производства схем. Оборудование относительно несложно, процесс освоения в производстве занимает короткое время [4.29]. По этой технологии можно изготовить практически любые СВЧ узлы, работающие вплоть до 12 ГГц. Возможности толстопленочной технологии, указанные в табл. 4.2, постоянно расширяются [4.20], и в настоящее время это наиболее подходящий способ изготовления массовых, экономически выгодных СВЧ устройств, не содержащих прецизионных элементов. Основные недостатки: более низкая стабильность параметров резисторов по сравнению с тонкопленочными, трудность создания прецизионных конденсаторов, высокий расход драгоценных металлов (в частности, серебра) при создании проводников СВЧ схем и т. д.

**Металлизация плат фольгой** широко используется при изготовлении металлизированных заготовок СВЧ плат из органических диэлектриков. Положительные результаты достигнуты и при металлизации плат из неорганических диэлектриков. Достоинства метода: относительная простота реализации на несложном оборудовании, возможность получения проводников с хорошей проводимостью благодаря высокой плотности и значительной толщине применяемой фольги (10 ...30 мкм), возможность создания «задела» металлизированных заготовок и централизованного их производства с поставкой многочисленным потребителям, не имеющим участка металлизации плат. Основные недостатки: трудность получения малой ширины полосковых линий, ограничение типов изготовляемых схем гибридными конструкциями (однослойные проводниковые платы). Метод широко применяется при создании схем на СПЛ и НПЛ с подложками из органических диэлектриков, но не получил широкого распространения при изготовлении ИС СВЧ.

В настоящее время химико-гальваническая, толстопленочная и тонкопленочная технология на основе вакуумного напыления — базовые технологические методы изготовления полосковых схем, на которые (с теми или иными частными видоизменениями) ориентируются большинство разработчиков и конструкторов. Выбирая технологический метод, создатели СВЧ полосковой схемы должны четко представлять, что предельные возможности той или иной технологии, а также новые технологические приемы могут быть реализованы в массовом производстве только через определенный промежуток времени после появления первых публикаций о них и, следовательно, правильный выбор реально осуществимой технологии — залог быстрого внедрения СВЧ узла в серию.

## 4.2. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ПОЛОСКОВЫХ УЗЛОВ

### ВЫБОР ПОДЛОЖКИ ПОЛОСКОВОЙ ПЛАТЫ

При выборе подложки учитывают в основном следующие факторы: требуемое значение $\varepsilon_r$; стабильность $\varepsilon_r$ в пределах подложки, в партии подложек, от партии к партии подложек; малая частотная зависимость $\varepsilon_r$; малый $\operatorname{tg}\delta$; стабильность $\operatorname{tg}\delta$ в пределах подложки, в партии подложек, от партии к партии; малая частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta$; требуемые габаритные размеры подложки; малый разброс длины, ширины, толщины подложки; высокая плоскопараллельность поверхностей подложки; малая шероховатость поверхности подложки; устойчивость материала подложки к климатическим воздействиям и технологическим воздействиям в процессе изготовления схемы; механическая прочность;

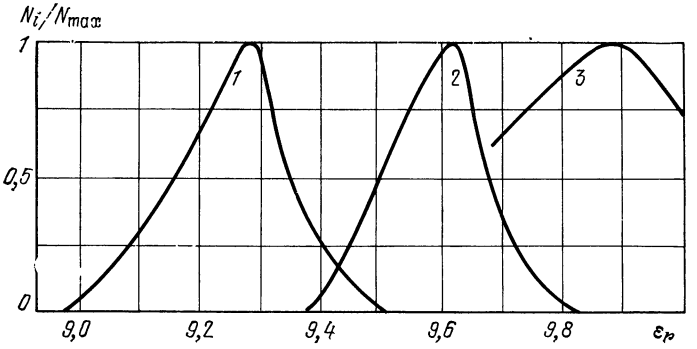



Рис. 4.2

стабильность характеристик материала в процессе эксплуатации. Выбор подложки нередко оказывается случайным и определяется наличием того или иного материала, возможностью быстрого освоения его в производстве, опытом разработчика и т. п. и не может быть строго регламентирован, так как основан на учете многих часто противоречивых требований и обстоятельств, т. е. является компромиссным. Условно при выборе можно выделить следующие основные этапы:

1. Уяснение требований к узлу и условиям его эксплуатации. На этом этапе выясняется, каким воздействиям будет подвергаться материал в процессе эксплуатации, будет ли происходить его старение.

2. Выбор материалов с требуемым $\varepsilon_r$. Решающими факторами являются степень миниатюризации узла и вид используемой линии передачи.

3. Сравнение материалов по диэлектрическим потерям, что нередко существенно ограничивает выбор материала подложки.

4. Оценка материалов по качеству (шероховатости) их поверхности с учетом применяемого способа металлизации подложки. На этом этапе оценивается уровень потерь, обусловленных неидеальностью поверхности платы.

5. Оценка влияния разброса $\varepsilon_r$ и $\operatorname{tg}\delta$ подложки на электрические характеристики узла. Процент выхода годных узлов может в значительной степени определяться колебаниями данных параметров в поступающих партиях диэлектриков, причем в первую очередь приходится учитывать колебания $\varepsilon_r$. Для увеличения доли годных узлов в отдельных случаях применяется отбор подложек по значению $\varepsilon_r$. На рис. 4.2 приведены кривые распределения диэлектрической проницаемости для керамики 22ХС (*1*), поликора (*2*) и ситалла 32-1 (*3*), полученные при измерении $\varepsilon_r$ партии подложек в количестве 500 ...1000 шт.

6. Сравнение существующих подложек по габаритным размерам (имеется ли возможность разместить проектируемое устройство на подложке, сколько подложек потребуется для полной компоновки узла и т. д.). Учитываются также диапазон толщин различных типов подложек и разброс толщины подложки, составляющий обычно 3 ...10%.

После предварительного выбора материала (или группы материалов) анализируется его устойчивость к воздействию процессов производства схемы, т. е.

таких технологических факторов, как нагрев, воздействие кислот, щелочей, растворителей и т. п. В итоге возможна ситуация, когда предъявляемым требованиям удовлетворяет сразу несколько материалов. В этом случае для принятия окончательного решения необходимо учесть экономические факторы и другие чисто практические обстоятельства: сравнить стоимость материалов, наличие и объемы серийного выпуска подложек, организацию поставок, вид конструктивного оформления заготовок (размеры, металлизация заготовок поставщиком и пр.).

Типичные размеры заготовок из основных органических материалов: ПТ и СТ 200 × 200, 200 × 300, 300 × 300 мм; ФФ-4 170 × 280, 250 × 250 мм; ФАФ-4 250 × 500, 300 × 500, 500 × 500 мм; ФЛАН 260 × 340 мм; СФ-1-35 400 × 600 мм. Толщина листов диэлектрика 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0 мм. В зависимости от конкретных условий производства и назначения габаритные размеры заготовок могут изменяться. Предпочтительная форма подложки полосковой схемы — прямоугольная. Типичные соотношения между размерами $a$ и $b$ ($a$ и $b$ — стороны прямоугольных подложек) приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Соотношение размеров прямоугольных подложек**

| $a$, мм | $b$, мм | | $a$, мм | $b$, мм | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Рекомендуемый | Допустимый | | Рекомендуемый | Допустимый |
| 50 | 50, 100 | 60, 70, 80, 150 | 180 | 180, 360 | 300 |
| 60 | 60, 120 | 80, 100, 180 | 200 | 200, 300 | 250 |
| 100 | 100, 200 | 150, 300 | 250 | 250 | 350 |
| 120 | 120, 240 | 150, 300, 360 | 300 | 300 | 400, 450 |
| 150 | 150, 300 | 200, 250 | | | |

Наиболее типичный размер подложки из неорганического материала 60× 48 мм выбран, исходя из стандартов на подложки для низкочастотных микросхем. При необходимости подложка разрезается на части меньшего размера: 12 × 15; 15 × 24; 24 × 30; 30 × 48 мм. Некоторые из подложек этих размеров поставляются заводами-изготовителями (поликор 24 × 30, 30 × 48 мм; 22ХС 24 × 30 мм и т. п.); разработаны подложки (ситалл СТ32-1, СТ38-1) с габаритными размерами 75 × 48; 150 × 48 мм. Зарубежные фирмы выпускают квадратные подложки 50 × 50, 25 × 25 мм и т. д., удобные для размещения некоторых СВЧ схем.

Важную роль играет качество обработки поверхности диэлектрика, используемого для подложки. Шероховатость поверхности увеличивает потери в линиях передачи, влияет на характеристики резисторов (ухудшение стабильности номинала и ТКС, разброс поверхностного сопротивления и пр.), на качество тонкопленочных конденсаторов (возможность «проколов» диэлектрика на шероховатой подложке). При изготовлении шероховатость подложки — одна из причин неоднородности краев полоски, т. е. снижения точности изготовления элементов схемы. Подложки из органических диэлектриков имеют поверхность 8 ...12-го классов шероховатости. Подложки из неорганических диэлектриков выпускаются с различными классами обработки поверхности: шлифованные (класс чистоты 8—10, $R_A$ = 0,63 ...0,08 мкм), полированные (класс чистоты 12 ...14, $R_A$ = = 0,04 мкм). Подложка может иметь одно - или двустороннюю полировку, двустороннюю шлифовку.

На рис. 4.3 изображена зависимость изменения поверхностного сопротивления от соотношения среднеквадратичной высоты $d$ неровностей (степени шероховатости) к глубине $\Delta$ скин-слоя [4.21]. При анализе предполагалось, что профиль шероховатостей треугольный. Причина возрастания поверхностного сопротивления, а следовательно, и потерь в полосковой линии — увеличение протяженности пути тока в проводнике, имеющем шероховатую поверхность.

На рис. 4.4 приведена зависимость от частоты отношения потерь $\alpha_{MR}$ в линии передачи на подложке с треугольным профилем шероховатости к потерям $\alpha_{MO}$ в линии на идеально гладкой подложке в зависимости от степени шероховатости ($d/40$) подложки. Результаты расчета хорошо коррелированы с эксперимен-

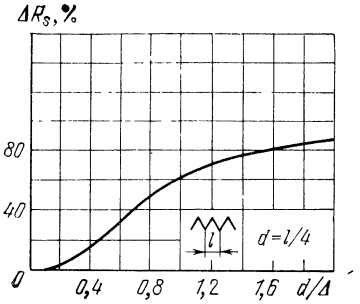



Рис. 4.3

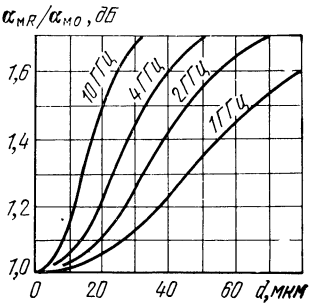



Рис. 4.4

тальными данными [4.21]. Допустимым значением неровностей в диапазоне 8 ...12 ГГц считают $d = 0{,}12$ мкм, в диапазоне 1,1 ...1,7 ГГц — $d = 0{,}25$ ... 0,5 мкм (увеличение на 5% потерь в линии по сравнению с линией на идеально гладкой подложке).

## ПОЛОСКОВЫЕ ПРОВОДНИКИ И КОНТАКТНЫЕ ПЛОЩАДКИ

**Полосковые проводники.** Это наиболее распространенные элементы полосковых узлов. С их помощью выполняются как соединения, так и элементы (резонансные отрезки, связанные линии, элементы мостов, делителей и т. п.). Ширина, толщина и форма поперечного сечения проводника, материалы, из которых он изготовлен, допуски на его изготовление, способ изготовления — все это влияет на основные характеристики полосковой линии: волновое сопротивление, постоянную распространения и погонное затухание. Самая рациональная форма полоски — прямой отрезок. Такая форма является основной для коротковолновой части дециметрового и сантиметрового диапазонов. В метровом и длинноволновой части дециметрового диапазона при существующих размерах подложек для получения приемлемых размеров СВЧ узлов используют проводники, свернутые в «меандр». При построении линии в виде меандра или расположении на плате двух полосковых линий, связь между которыми должна быть мала, следует придерживаться при $\varepsilon_r > 9$ ...10 следующего соотношения (рис. 4.5) [4.22]: $s > 4w$. При уменьшении $\varepsilon_r$ расстояние увеличивают. Уменьшение шага меандра приводит к усилению взаимного влияния соседних участков полосковых проводников, которое можно ослабить, уменьшив их ширину. При расположении прямых отрезков проводников параллельно краю платы также $s > 4w$ ($s$ — расстояние от края проводника до стенки корпуса). Расстояние $d$ вывода полосковой линии под разъем (переход) от края платы принято не менее 500 мкм в полосковых платах из органических диэлектриков и 200 ...300 мкм в платах из неорганических. На краях при фотолитографии образуется наплыв из светочувствительного материала (фоторезиста), и при массовом производстве в этой зоне трудно гарантировать получение требуемой формы проводника.

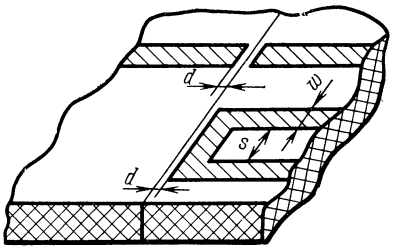



Рис. 4.5

В лабораторных условиях, используя ретушь, можно получить проводник, выходящий на край платы.

При размещении проводника параллельно краю платы из неорганических диэлектриков (например, при стыковке двух плат, как показано на рис. 4.5) следует соблюдать расстояние 200 ...300 мкм от ее края. Для полосковых плат из органических диэлектриков установлены следующие ограничения на размещение проводников параллельно краю платы: не менее 2 мм для плат с максимальным размером 60 мм, не менее 3 мм для плат с максимальным размером 150 мм, не менее 4 мм для плат с максимальным размером свыше 150 мм.

**Влияние толщины и многослойной структуры проводника на потери.** В табл. 4.4 приведены типичные структуры слоев проводников полосковых линий, изготовленных по различной технологии [4.12]. Толщина и проводимость слоев, определяющие поверхностное сопротивление полосок, а также их число выбираются конструктором в зависимости от требований к потерям с учетом возможной технологии изготовления и могут не совпадать с указанными в табл. 4.4. Следует учитывать, что при изготовлении проводников возможны отклонения в чистоте (составе) и, следовательно, проводимости материала слоев, разброс толщины и ширины слоев из-за нестабильности технологии, появление дефектов металлизации (поры, неровность края) и т. д.

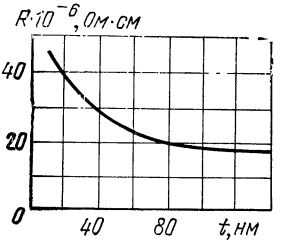


Рис. 4.6

Так как адгезионный подслой выполняется на основе металлов с высоким по сравнению, например, с медью сопротивлением, то толщина подслоя существенно влияет на потери в линии передачи, особенно на высоких частотах. Необходим компромисс, поскольку слишком тонкий подслой не обеспечивает достаточной адгезии. Кроме того, у очень тонких пленок сопротивление возрастает с уменьшением толщины, как это видно из рис. 4.6, где приведена зависимость сопротивления пленок хрома от их толщины. Потери в двух- и трехслойном проводниках рассмотрены в [4.21]. Вещественная часть поверхностного сопротивления двухслойного проводника

$$R_S = R_1 \frac{(1+R_2/R_1)^2 \exp(4t/\Delta) + 2\,[(R_2/R_1)^2 - 1] \sin(2t/\Delta) \exp(2t/\Delta) - (R_2/R_1 - 1)^2}{(1+R_2/R_1)^2 \exp(4t/\Delta) - 2\,[(R_2/R_1)^2 - 1] \cos(2t/\Delta) \exp(2t/\Delta) + (R_2/R_1 - 1)^2}, \quad (4.1)$$

где $R_1$ — удельное сопротивление адгезионной пленки: $R_2$ — удельное сопротивление основного слоя проводника; $t$ — толщина адгезионной пленки; $\Delta$ — глубина скин-слоя для материала адгезионной пленки. Отношение поверхностного сопротивления двухслойной проводящей пленки к удельному сопротивлению адгезионного подслоя в зависимости от толщины этого подслоя по сравнению с толщиной скин-слоя для него приведено на рис. 4.7. На рис. 4.8 и 4.9 построена зависимость относительного возрастания затухания $\Delta A$ в двух- и трехслойной НПЛ от толщины адгезионных слоев (по отношению к идеализированному проводнику из золота) на различных частотах. Как следует из рисунков, увеличение толщины адгезионного подслоя наиболее резко сказывается на частотах выше 10 ГГц; ниже 1 ...2 ГГц влияние толщины подслоя на потери существенно слабее, что позволяет несколько расширить допуски на изготовление адгезионных слоев [4.12, 4.21].

Толщина основного проводящего слоя также выбирается в зависимости от рабочей частоты. На практике как в СПЛ, так и НПЛ достаточно выполнить проводник, толщина которого в 2 ...5 раз больше толщины скин-слоя (см. табл. 1.6) для данного материала [4.2]. В нормах конструирования для полосковых плат, работающих в диапазоне до 300 МГц, толщина проводников устанавливается не менее 15 мкм; до 2 ГГц — не менее 12 мкм; в диапазоне 2... 8 ГГц — не менее 6 мкм.

Обобщенные теоретические кривые изменения затухания $\alpha_м$ в МПЛ в зависимости от толщины $t$ полоски по отношению к глубине скин-слоя $\Delta$ приведе-

Таблица 4.4

**Расположение слоев материалов, используемых при создании полосок**

| Технология нанесения слоев | Схема расположения слоев | Используемые материалы | Толщина, мкм | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | подслоя | основного слоя | защитного покрытия |
| Приклейка фольги, прессование платы с проводящим слоем, вакуумное осаждение металла без адгезионного подслоя | 2, 1 | 1. Медная фольга[1] (алюминий при вакуумном напылении) | | 10...50 | |
| | | 2. Защитное покрытие (серебро, олово—висмут, золото и др.) | | 5...10 | 3...10 |
| Химико-гальваническая металлизация | 5, 4, 3, 2, 1 | 1. Адгезионный подслой — палладий | 0,01...0,5 | | |
| | | 2. Химически осажденная медь | | 0,2...0,5 | |
| | | 3. Гальванически осажденная медь | | 3...20 | |
| | | 4. Защитное покрытие (олово, олово—висмут, серебро, золото) | | | 1...10 |
| | | 5. Дополнительная защитная пленка[2] диэлектрика (лак, фоторезист и т. п.) | | | 1...5 |
| Вакуумное напыление с последующим гальваническим наращиванием | 4, 3, 2, 1 | 1. Адгезионный подслой (хром, нихром, титан, тантал, ванадий) | 0,01...0,5 | | |
| | | 2. Напыленная в вакууме медь (золото) | | 1...2 | |
| | | 3. Гальванически осажденная медь (золото) | | 5...20 | |
| | | 4. Защитное покрытие (по меди) — золото, серебро, олово, олово—висмут и др.[3] | | | 1...10 |
| Вакуумное напыление толстого слоя проводника | 3, 2, 1 | 1. Адгезионный подолой (хром, нихром, титан, тантал, ванадий) | 0,01...0,5 | | |
| | | 2. Напыленная в вакууме медь | | 5...20 | |
| | | 3. Защитное покрытие — золото (серебро, олово, олово — висмут, никель) | | | 1...10 |
| Изготовление проводников по толстопленочной технологии | 1 | 1. Проводящий слой на основе композиций серебра, палладия, золота (одно-, двух-, трехкомпонентные составы) | | 10...25 | |

[1] Медная фольга может иметь хромовый слой или оксидированную поверхность для улучшения адгезии. Между подложкой и фольгой для приклейки существует слой клея.

[2] Используется для защиты олова, олова — висмута при жестких условиях эксплуатации и в негерметичных конструкциях.

[3] Возможно использование двухслойных защитных покрытий, например никель (3 мкм) — золото (1 мкм).

ны на рис. 4.10 [4.23]. Проводимость полоски выбрана равной проводимости монолитной меди, диэлектрическая проницаемость подложки 11, толщина 0,5 мм. Как видно из рисунка, толщина проводника в два скин-слоя достаточна для достижения малых потерь в линии передачи. Наблюдается определенный минимум потерь при толщине, близкой к трем скин-слоям. Дальнейшее увеличение толщины проводника не приводит к заметному уменьшению потерь. Однако на практике толщину полоски приходится увеличивать из-за необходимости ослабить

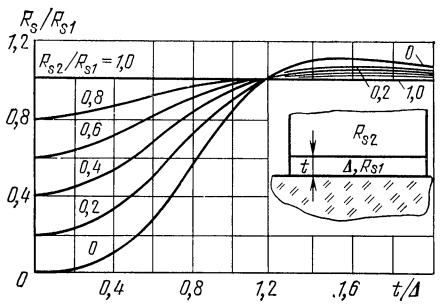



Рис. 4.7

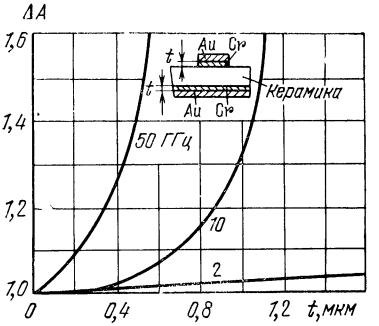



Рис. 4.8

влияние низкой проводимости подслоя, уменьшить потери, вносимые слоем защитного покрытия, если оно выполняется из материала с низкой проводимостью (никеля, олова и т. п.), для компенсации неравномерности нанесения пленки, так как разброс ее толщины может составить несколько Δ.

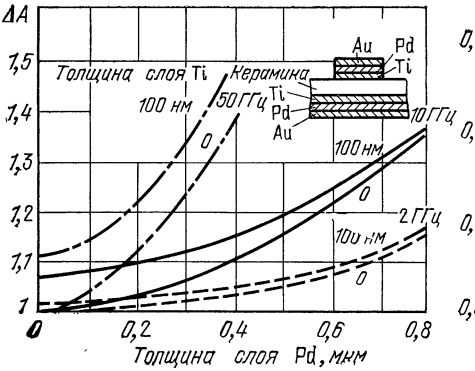



Рис. 4.9

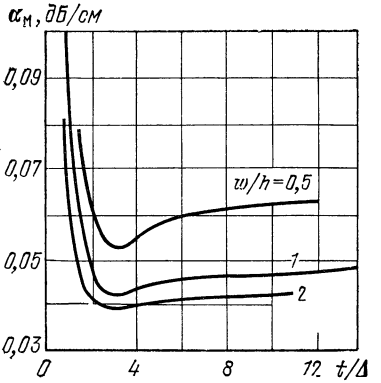



Рис. 4.10

**Влияние формы поперечного сечения проводника.** Форма поперечного сечения полоски оказывает заметное влияние на затухание в линии и ее предельную мощность, так как обе эти величины зависят от распределения плотности тока по сечению проводника [4.12; 4.24; 4.27]. Наличие «острых» кромок у проводника приводит к повышению плотности тока в местах резких «изломов» сечения, что вызывает увеличение потерь. Скругление кромок позволяет не только снизить потери в линии передачи, но и повысить ее электрическую прочность. На рис. 4.11, *а* приведено распределение плотности поверхностного тока по контуру профиля сечения полоски НПЛ с малым радиусом кривизны в углах (справа) и

Таблица 4.5

**Свойства пленок металлов, полученных различными технологическими методами [4.25]**

| Материал | Толщина, мкм | Проводимость $\sigma \cdot 10^{-7}$, См·м | | | Отношение проводимости на СВЧ к теоретической, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | | на постоянном токе | на СВЧ | теоретическая на постоянном токе | |
| Гальванически осажденное золото | 4,6 | 3,69 (4,04)[1] | 3,45 (3,66)[1] | 4,1 | 84,1 (89,3)[1] |
| Осажденное в вакууме золото | 2,5 | 3,48 | 3,25 | 4,1 | 79,3 |
| Гальванически осажденное серебро | 3,3 | 4,78 | 4,37 (4,65)[1] | 6,21 | 69,5 (73,9)[1] |
| Гальванически осажденная медь из кислого электролита | 3,5 | 4,97 (5,05)[1] | 4,4 (4,49)[1] | 5,8 | 76,2 (77,5)[1] |
| Гальванически осажденная медь из кислого электролита с блескообразователем | 3,2 | 5,27 (5,3)[1] | 4,68 (4,88)[1] | 5,8 | 80,7 (84,2)[1] |
| Гальванически осажденная медь из пирофосфатного электролита | 4,5 | 4,72 | 4,71 | 5,8 | 81,2 |
| Осажденная в вакууме медь | 3,1 | 5,21 | 4,81 | 5,8 | 82,9 |

[1] Пленка отожжена в вакууме (250 °С, 2 ч).

для более «толстого» проводника с увеличенным радиусом кромок (слева), близкого по конфигурации поперечного сечения к полоске, форма которой оптимизирована с помощью ЭВМ (рис. 4.11, *б*). Полоску, близкую по форме к оптимальной, получают, например, при гальваническом наращивании проводников.

**Влияние проводимости металла проводника на потери.** Проводимость зависит от материала проводника и способа его нанесения на диэлектрическое основание. В табл. 4.5 приведены данные по тонким металлическим пленкам, изме-

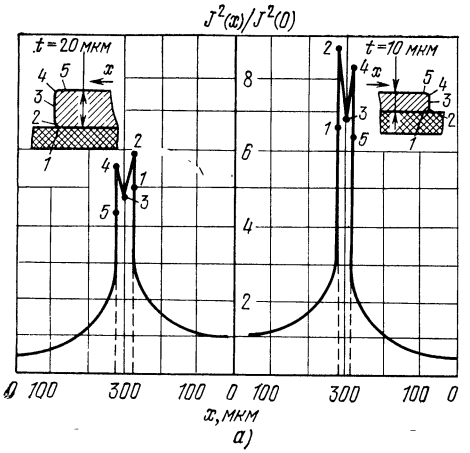
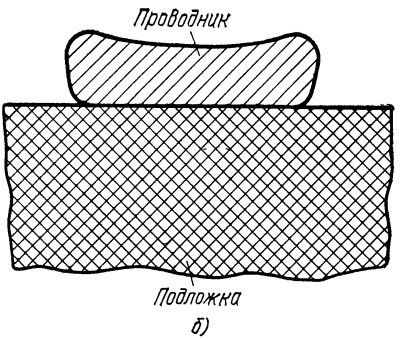



Рис. 4.11



ренные на постоянном токе и на СВЧ (10 ГГц), в зависимости от способа их получения [4.25]. Из таблицы видно, что на СВЧ осажденная гальванически или в вакууме медь имеет наилучшую проводимость. Гальванически осажденное серебро, несмотря на высокую проводимость этого материала в монолитных образцах, не может быть рекомендовано в качестве основного материала для изготовления тонкопленочных проводников и обычно используется в качестве защитного покрытия.

Серебро является наиболее распространенным материалом, на основе которого изготовляются проводниковые пасты для толстопленочной технологии (см. гл. 1). Результаты испытаний толстопленочных полосковых линий на СВЧ и рекомендации по их применению достаточно противоречивы, что объясняется различием в составе используемых паст, значительным влиянием на потери режима вжигания паст и непрерывным совершенствованием процесса изготовления проводников (замена трафаретной печати фотолитографией для получения больше-

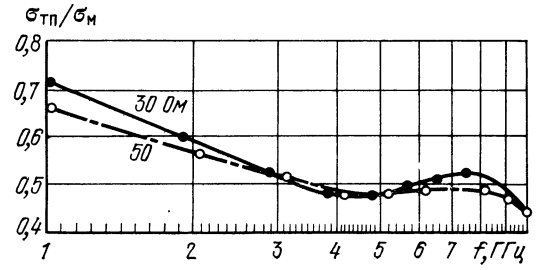



Рис. 4.12

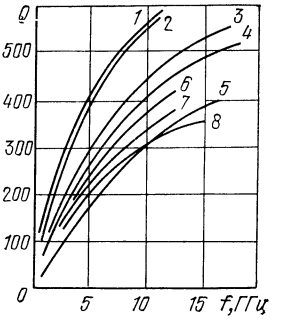



Рис. 4.13

го разрешения, создание паст без стеклянной фритты и т. д.). Считается, что проводники, выполненные на основе толстопленочной технологии, имеют большее (в среднем в 2 раза) затухание, чем тонкопленочные [4.21]. Это обусловлено более «пористой» структурой и, как правило, повышенной шероховатостью поверхности этих проводников по сравнению с тонкопленочными, а также худшим качеством края (бóльшей глубиной дефектов, «растеканием» края полоски), неоптимальным сечением полоски. В результате проводимость толстопленочного проводника на высоких частотах (10 ГГц) может составлять 10 ...30% проводимости монóлитного металла, который использован для изготовления пасты [4.21]. Относительная проводимость $\sigma_{тп}$ толстопленочной полоски в линии с 30 и 50 Ом по сравнению с расчетной проводимостью $\sigma_м$ полоски, равной проводимости монолитного материала, приведена на рис. 4.12 [4.26].

Зависимость от частоты добротности $Q$ кольцевых полосковых резонаторов при $Z_в = 50$ Ом на подложке из двуокиси алюминия толщиной 0,635 мм, изготовленных на основе толсто- и тонкопленочной технологии, представлена на рис. 4.13. Кривые *1* и *2* — теоретическая добротность резонаторов, выполненных из меди (*1*) и золота (*2*), кривая *3* — резонатора, изготовленного химико-гальваническим способом из меди, кривая *4* — резонатора из тонкопленочного золотого проводника (вакуумное напыление), кривые *5—8* — толстопленочных резонаторов, изготовленных разными способами из паст различных составов. Как видно из рисунка, во всем диапазоне частот полосковая линия, изготовленная методом тонкопленочной технологии, лучше толстопленочной полоски по затуханию[1] [4.27; 4.28]. Наименьшее затухание в диапазоне до 16 ГГц обеспечивает полосковый проводник, изготовленный методом гальванического наращивания (кривая *3*) и имеющий сечение, близкое к оптимальному (рис. 4.11, *в*). Напыленные в вакууме золотые проводники также обеспечивают малое затухание. Толстопленочные проводники, изготовленные методами травления толстых пле-

[1] $\alpha$ [дБ] $= 8{,}868\pi/Q\Lambda$.

нок серебра (кривая *6*) и трафаретной печати серебра (кривая *7*), приближаются по своим характеристикам к тонкопленочным. Достигнуты следующие наилучшие значения затухания в толстопленочных полосковых линиях: 0,03 дБ/см на 1 ГГц, 0,08 дБ/см на 10 ГГц. Паста 3711 (см. гл. 1), содержащая 81% серебра, имеет удельную проводимость на постоянном токе $4 \cdot 10^7$ См/м и затухание на 10 ГГц менее 0,2 дБ/см [4.29].

**Влияние потерь в экране на общие потери в полосковой линии.** Учитывая более равномерное распределение плотности тока в экранной поверхности и большие размеры поверхности, по которой протекает ток, по сравнению с полоской, следует ожидать, что экранная поверхность вносит меньший вклад в потери, чем полоска. На рис. 4.14 представлено отношение потерь в экране $\alpha_э$ к общим потерям $\alpha_м$ в НПЛ, выполненной на подложке из окиси алюминия толщиной 0,635 мм

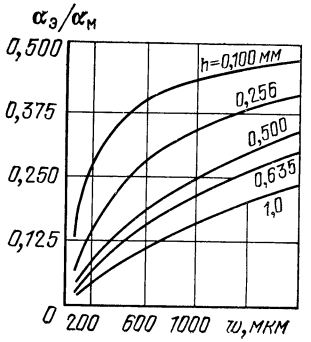



Рис. 4.14

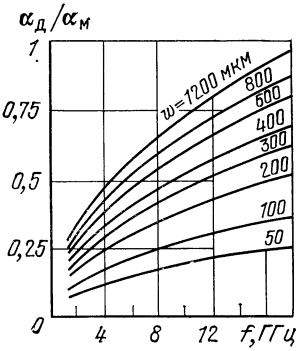



Рис. 4.15

[4.27]. Естественно, что с ростом волнового сопротивления потери в экране возрастают. Но при $Z_в = 50$ Ом эти потери составляют менее 15% общих потерь в линии передачи. Поэтому экранную сторону можно выполнять, в частности, для снижения стоимости узлов, из материалов с пониженной проводимостью [4.27], например, при невысоких требованиях к уровню потерь, рисунок платы — из медных проводников, а экран — из толстопленочных материалов.

**Соотношение между потерями в диэлектрике и проводниках линии.** Потери в диэлектрике полосковой линии определяются значением tg δ выбранного материала подложки (гл. 2). Принято считать, что на частотах ниже 6 ...7 ГГц вклад потерь в диэлектрике $\alpha_д$ в общие потери в линии передачи невелик. Соотношение $\alpha_д$ и $\alpha_м$ в функции частоты для НПЛ различной ширины приведено на рис. 4.15 (подложка из двуокиси алюминия толщиной 0,635 мм, толщина полосок 8Δ) [4.27].

**Контактные площадки.** При размещении на плате навесных компонентов для подачи напряжения питания или управления и т. п. в топологический рисунок платы вводятся контактные площадки, к которым (пайкой, сваркой и т. п.) прикрепляются выводы навесных компонентов, провода и т. д. Контактные площадки могут иметь различную форму и размер в зависимости от их назначения и размеров вывода навесного компонента или провода, присоединяемого к этой площадке. Иногда в качестве контактной площадки используют проводники полосковой линии. Размеры контактной площадки или полоскового проводника должны быть с каждой стороны на 0,2 мм больше размера закрепляемой части вывода. На рис. 4.16 схематически изображена установка компонента, на контактной площадке. На рис. 4.17 показана контактная площадка, которая используется для точной установки навесных компонентов. Выступ или впадина на полоске указывает место крепления навесного компонента при монтаже. На одну контактную площадку можно устанавливать несколько навесных компонентов при условии, что ее площадь будет равна сумме минимально допустимых пло-

щадей контактных площадок под выводы каждого отдельного компонента. Виды контактных площадок вокруг отверстий в платах показаны на рис. 4.18.

Минимальные размеры контактных площадок под пайку проводников 500 × 500 мкм, под сварку 300 × 300 мкм. Минимальное расстояние между контактными площадками выбирается 300 мкм, минимальное расстояние контактной площадки от края платы 200 мкм. При конструировании контактные площадки под низкочастотные выводы и цепи питания предпочтительно размещать с одной стороны платы или с противоположных сторон, соблюдая определенный шаг в

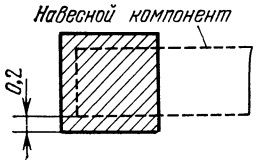



Рис. 4.16

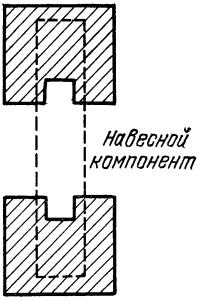



Рис. 4.17

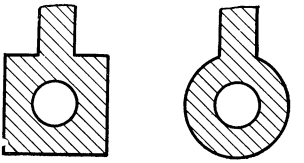


Рис. 4.18

их расположении. Контактные площадки в СВЧ тракте необходимо выполнять таким образом, чтобы они представляли собой минимальную неоднородность. Установка малогабаритного резистора или конденсатора в разрыве полосковой линии более целесообразна, чем введение в полосковой линии контактных площадок, более широких, чем полоска, и имеющих заметные линейные размеры. Точность изготовления контактных площадок такая же, как и полосок, толщина металлизации равна толщине полосок данной схемы, структура контактной площадки может включать специальный слой полуды.

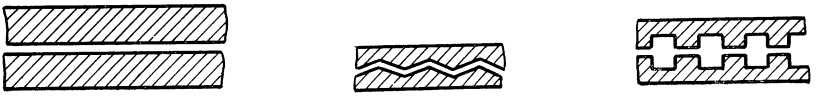


Рис. 4.19

**Зазоры между полосковыми проводниками.** При разработке топологии полосковой платы и изготовлении СВЧ схем к ширине и равномерности зазоров предъявляются наиболее жесткие требования, так как от этого зависят параметры связанных отрезков линии. Зазор может быть прямолинейным, плавно изогнутым, «зубчатым», пилообразным, иметь форму меандра и т. п. (рис. 4.19). Допуски при изготовлении зазоров устанавливаются исходя из требуемого разброса электрических характеристик СВЧ устройств, где используются связанные линии, при этом допуски такие же, как и на полосковые проводники (см. табл. 4.2). Для типичных полосковых схем на органических диэлектриках зазоры выполняются с допуском 0,05 ...0,15 мм. Допуск увеличивается с увеличением толщины металлизации, протяженности и ширины зазора. Наименьшее значение допуска устанавливается для зазоров шириной менее 6 мм и длиной менее 100 мм.

В схемах на НПЛ, выполненных на неорганических диэлектриках, минимальная ширина зазора и допуск зависят от способа изготовления. Так, например, если тонкопленочная технология обеспечивает ширину линии 70 мкм с допуском ±20 мкм, то считается возможным получить с тем же допуском ширину

зазора 50 мкм; при ширине линии 40 мкм и допуске ±15 мкм можно получить зазор в 30 мкм. Эти значения реализуемы и при массовом производстве. Для толстопленочных схем в массовом производстве типичная ширина зазора — 150 ... 200 мкм при допуске ±30 ... 50 мкм.

## ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛОСКОВЫХ СХЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Сосредоточенными принято считать элементы, линейные размеры которых не превышают (0,01 ...0,03)Λ. При столь малых размерах элемента можно пренебречь эффектами, обусловленными волновым характером электромагнитного поля, в частности сдвигом по фазе между входом и выходом элемента. Используются и так называемые «полусосредоточенные» элементы [4.30], образованные отрезками полосковых линий длиной менее четверти длины волны и имеющие в относительно небольшом диапазоне частот свойства сосредоточенных емкостей или индуктивностей.

**Конденсаторы.** В табл. 4.6 приведены схематическое изображение и основные формулы для расчета печатных и пленочных емкостных элементов. Конденсатор, изображенный в табл. 4.6 (рис. *а*), прост в изготовлении, его недостаток — относительно большие размеры. Этот элемент может быть выполнен с точностью, которая обеспечивается при изготовлении проводников.

В полосковых схемах на органических диэлектриках получила распространение емкость (рис. *б*), образуемая при наложении части полоски на ее продолжение через слой пленочного диэлектрика (пленка из фторопласта, полиамидная и т. п.). В интегральных ИС СВЧ подобные емкости выполняются методами толстопленочной технологии. На рис. 4.20 и 4.21 приведены типичные топологии пленочных конденсаторов. Отклонения от номинала в среднем 10 ...15%. Для получения более близких к номиналу значений применяют подстройку емкости.

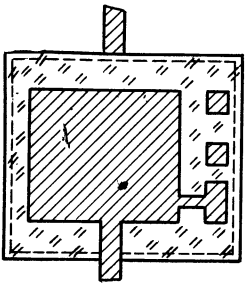


Рис. 4.20

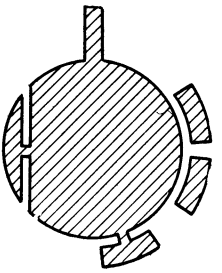


Рис. 4.21

При составлении топологии отдельных слоев следует учитывать, что нижняя обкладка должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, а диэлектрик должен выступать за границы площадки перекрытия обкладок не менее чем на 200 мкм. Расчет емкости $C$ по формуле плоского конденсатора вносит погрешность не более 5%, обусловленную пренебрежением краевыми эффектами, если $l \ll \Lambda$. Добротность конденсатора рассчитывается по формуле

$$1/Q_C = 1/Q_S + 1/Q_d,$$

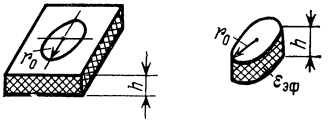
где $Q_S = 3w/2\omega C l^2 R_S$ — добротность проводящих пластин [4.22]; $Q_d = 1/\mathrm{tg}\,\delta$ — добротность диэлектрической пленки.

Несмотря на универсальность, многослойная пленочная конструкция конденсатора обладает недостатками; трудно создать высокочастотные конденсаторы с высокой удельной емкостью (получены удельные емкости до 30 ...50 пФ/мм²); появляются дефекты (проколы) при изготовлении диэлектрических слоев; из-за

Таблица 4.6

**Основные типы конденсаторов в полосковых схемах**

| Тип конденсатора | Формула для расчета |
|---|---|
| *а*. Отрезок полосковой линии передачи, эквивалентный параллельной емкости [4.30]<br>$Z_1 \gg Z_0$<br>$l < \frac{\Lambda}{8}$ | $C\,[\Phi] \approx \frac{1}{Z_0} \frac{l\sqrt{\varepsilon_{эф}}}{c}$,<br>$Z_0$ [Ом], $l$ [м], $c = 3 \cdot 10^8$ м/с |
| *б*. Последовательная емкость в полосковой линии передачи; пленочная емкость в ИС [4.12] | $C$ [пФ] $= 0{,}885\ \varepsilon_r\ wl/h$,<br>$w$ [см], $l$ [см], $h$ [см] |
| *в*. Планарный штыревой (гребенчатый) конденсатор [4.12, 4.22] | $C$ [пФ/ед. длины] $= (\varepsilon_r + 1)\ \varepsilon_0\ b\ [2A_1 \times (N-1) + A_2]$,<br>$A_1 = 0{,}614\ (h/s)^{0,25}\ (t/h)^{0,439}$,<br>$A_2 = 0{,}775\ t/(2N-1)\ (t+s) + 0{,}408$,<br>$N$ — число секций, $h$ — толщина подложки |
| *г*. Плоский конденсатор прямоугольного сечения на материале подложки [4.31, 4.32] | $C\,[\Phi] = C_0 + 2\,C_{к1} + 2\,C_{к2}$,<br>$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r wl/h$,<br>$C_{к1} = (\varepsilon_0 l/2)\,[120\,\pi Z_в(w, h, 1)/z_в^2(w, h, \varepsilon_r) - \varepsilon_r w/h]$,<br>$C_{к2} = (\varepsilon_0\, w/2)\,[120\,\pi Z_в(l, h, 1)/Z_в^2(l, h, \varepsilon_r) - \varepsilon_r\, l/h]$<br>$l$ [м], $w$ [м], $h$ [м] |

| Тип конденсатора | Формула для расчета |
|---|---|
| *д*. Плоский конденсатор круглого сечения на материале подложки [4.31, 4.32]   | $C$ [Ф] $= C_0 + C_{кр}$,<br>$C_0 = \varepsilon_{эф}\varepsilon_0 \pi r_0^2/h$,<br>$C_{кр} = 2\,\varepsilon_{эф}\varepsilon_0 r_0\,[\ln(\pi r_0/2h) + 1{,}7726]$,<br>$r_0$ [м], $h$ [м] |

малой толщины диэлектрического слоя не удается достичь высокого пробивного напряжения. Для создания конденсаторов небольшой емкости нередко используют конструкции без дополнительных диэлектрических слоев. К таким конденсаторам относятся торцевой зазор в полоске, гребенчатый зазор, плоский конденсатор на материале подложки. Конденсатор в виде торцевого зазора рассчитывается по формулам и графикам, приведенным в гл. 3. Планарный (гребенчатый) штыревой конденсатор изображен в табл. 4.6 (рис. *в*). Погрешность расчета емкости по приведенным формулам — до 5%. Добротность $Q_C = 1/\omega CR$, где $R = (4/3)\,bR_S/Nt$, $R_S$ — поверхностное сопротивление проводника, в котором сформирована емкость. На частоте 2 ГГц достигнута добротность конденсатора ($C = 2{,}9$ пФ), равная 677 [4.22]. Достоинство конструкции — в ее простоте, несмотря на высокие требования к качеству изготовления штырей и зазоров, недостатки — сложность подстройки и малый номинал.

Плоский конденсатор прямоугольного сечения на материале подложки (табл. 4.6, рис. *г*), иногда называемый сосредоточенным конденсатором на подложке, применяется вплоть до сантиметрового диапазона. Расчет подобных элементов, если их линейные размеры $w$ и $l$ меньше $\Lambda$, основан на представлении плоского конденсатора в виде отрезка полосковой линии шириной $w$ и длиной $l$ [4.31]. Емкость конденсатора с учетом краевого эффекта рассчитывается по формуле, приведенной в табл. 4.6. Величины $Z_В$, используемые в формулах (4.3) и (4.4), вычисляются по формулам (2.69), (2.70). Смысл обозначения $Z_В(w, h, \varepsilon_r)$ и порядок вычисления описаны в § 3.4. Погрешность результатов, получаемых по формулам (4.3), (4.4), при $2h/w \leqslant 1$ около 1%; при $2h/w \leqslant 2$ $\approx 2\%$ и $2h/w \leqslant 4$ $\approx 20\%$.

На рис. 4.22 представлена зависимость емкости прямоугольного конденсатора от отношения $w/l$ при различных значениях параметра $l/h$, $\varepsilon_r$ и толщины подложки, рассчитанная по формулам (4.2)—(4.4). Например, емкость при $\varepsilon_r = 2{,}5$ равна среднему арифметическому ее значений при $\varepsilon_r = 2{,}3$ и 2,7. Наличие двух значений $\varepsilon_r$ позволяет оценить влияние разброса $\varepsilon_r$ на емкость. В табл. 4.6 (рис. *д*) изображен плоский конденсатор круглого сечения на материале подложки. Методы расчета и ограничения при расчете его емкости те же, что и для конденсатора прямоугольного сечения. Емкость конденсатора круглого сечения с учетом краевого эффекта определяется по формуле [4.31], приведенной в табл. 4.6:

$$\varepsilon_{эф} = \frac{120\pi Z_В(2r_0 h, 1)/Z_В(2r_0, h, \varepsilon_r) - \varepsilon_r r_0/h}{120\pi/Z_В(2r_0 h, \varepsilon_r) - r_0/h}. \qquad (4.2)$$

Величина $Z_В$ вычисляется по формуле (2.70) при $w = 2r_0$ сначала при $\varepsilon_r = 1$, а затем при заданном $\varepsilon_r$. На рис. 4.23 представлены зависимость $\varepsilon_{эф}$ от отношения $r_0/h$ при различных значениях $\varepsilon_r$ и зависимость емкости конденсатора круглого сечения от тех же параметров. Преимущества сосредоточенных конденса-

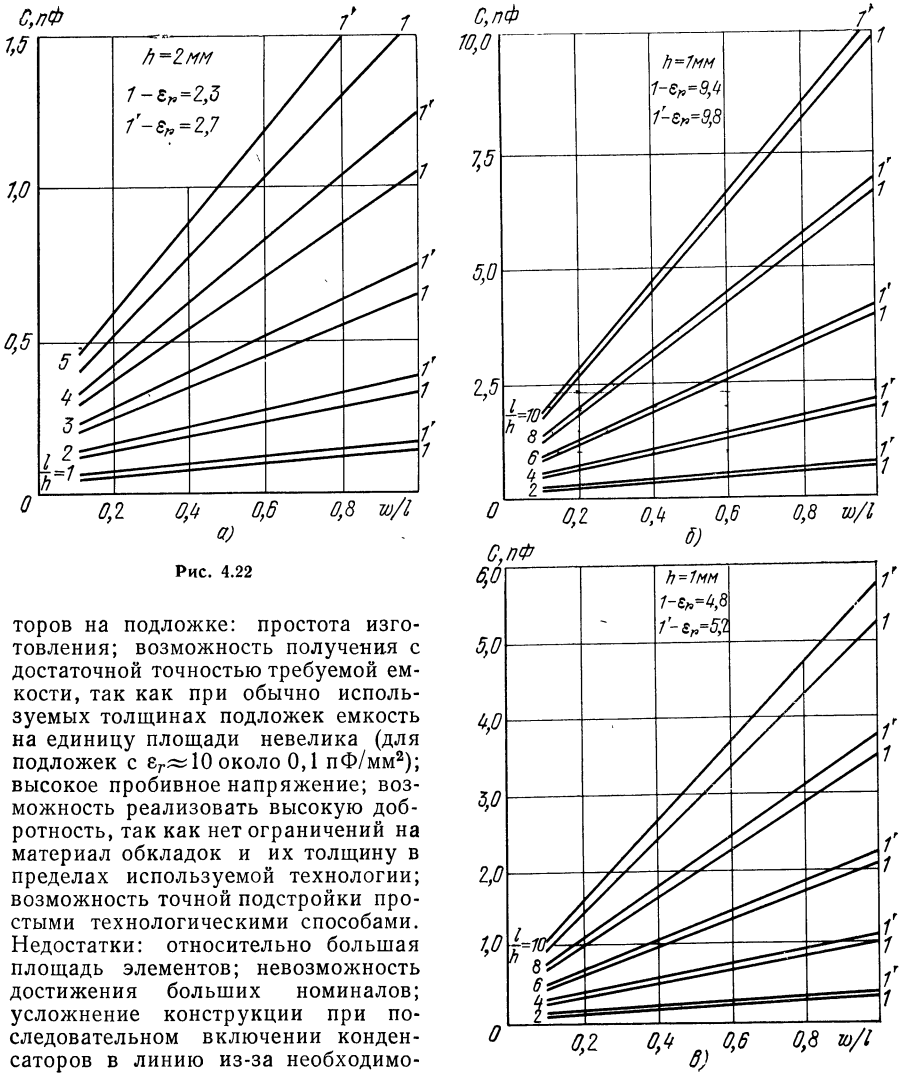



Рис. 4.22

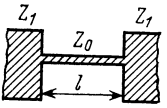
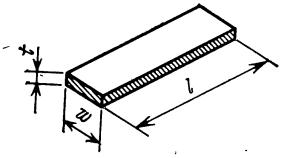
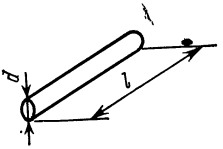
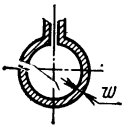
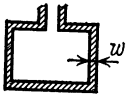
торов на подложке: простота изготовления; возможность получения с достаточной точностью требуемой емкости, так как при обычно используемых толщинах подложек емкость на единицу площади невелика (для подложек с $\varepsilon_r \approx 10$ около 0,1 пФ/мм²); высокое пробивное напряжение; возможность реализовать высокую добротность, так как нет ограничений на материал обкладок и их толщину в пределах используемой технологии; возможность точной подстройки простыми технологическими способами. Недостатки: относительно большая площадь элементов; невозможность достижения больших номиналов; усложнение конструкции при последовательном включении конденсаторов в линию из-за необходимости использовать отверстия и т. п. На рис. 4.24 изображены конструкции таких конденсаторов с различными типами соединений в линиях передачи.

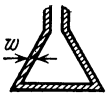
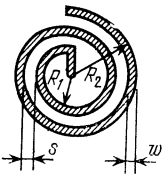
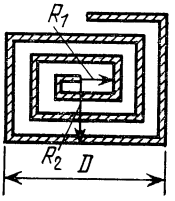
**Индуктивные элементы.** В табл. 4.7 схематически изображены плоские индуктивные элементы СВЧ схем и даны формулы для их расчета. Элемент, изображенный на рис. *а*, находит применение в полосковых схемах на органических и неорганических диэлектриках и является по существу отрезком линии передачи, что упрощает технологию изготовления. Погрешности при реализации такие же, как при изготовлении проводников. Недостатки: большие габаритные размеры и отсутствие возможности простой подстройки.

С помощью прямоугольного проводника (рис. *б*) можно реализовать индуктивности малых номиналов (до единиц наногенри). Приведенная формула позволяет оценивать индуктивность плоских выводов навесных компонентов. Рассмотрение прямоугольного отрезка, как короткозамкнутого отрезка линии передачи

Таблица 4.7

**Основные типы индуктивных элементов**

| Типы индуктивных элементов | Формулы для расчета |
|---|---|
| *а*. Отрезок полосковой линии передачи со свойствами последовательной индуктивности [4.30]   | $L$ [Гн] $\approx Z_0\, l_0 \sqrt{\varepsilon_{эф}}/c$, $Z_0 \gg Z_1$, $c = 3\cdot 10^{11}$ мм/с, $l_0$, мм, $l_0 < \frac{\Lambda}{8}$, $Z_0$, Ом |
| *б*. Плоский прямоугольный проводник [4.22, 4.51]   | $L$ [нГн] $= 0{,}2\, l\, [\ln (l/w+t) + 1{,}19 + 0{,}22 \times (w+t)/l]$, $w$, мм, $l$, мм, |
| *в*. Цилиндрический проводник [4.51]   | $L$ [нГн] $= 0{,}2\, l\, [\ln (l/d) + 0{,}386]$ $d$, мм, $l$, мм, |
| *г*. Круглая петля [4.51]   | $L$ [нГн] $= 0{,}2\, l\, [\ln (2l/(w+t)) - 2{,}451]$, $l$ — периметр, мм, $w$, $t$ — ширина и толщина витка, мм |
| *д*. Квадратная петля [4.51]   | $L$ [нГн] $= 0{,}2l\, [\ln (2\, l/(w+t) - 2{,}853]$, $l$ — сторона квадрата, мм, $w$, $t$ — ширина и толщина витка, мм |

| Типы индуктивных элементов | Формулы для расчета |
|---|---|
| *е*. Петля — равносторонний треугольник [4.51]   | $L$ [нГн] $=0{,}2\ l\ [\ln\ (2l/(W+t))-3{,}197]$<br>$l$ — сторона треугольника, мм,<br>$w$, $t$ — ширина и толщина витка, мм |
| *ж*. Плоская круглая спираль [4.12, 4.51, 4.52, 4.57]   | 1) $L$ [нГн] $=0{,}4\ \pi\cdot N^2\cdot a\left[\left(\ln\frac{8a}{c}-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{24}\times\right.$ $\left.\times\left(\frac{c}{a}\right)^2\left(\ln\frac{8a}{c}+3{,}583\right)\right]$,<br>2) $L$ [нГн] $=10N^2\ (R_2+R_1)^2/(15\ R_2-7\ R_1)$<br>3) $L$ [нГн] $=39{,}3\ (0{,}8\ a^2N^2)/(6a+10\ c)$,<br>$R_1$, $R_2$ — внутренний и внешний радиус, мм,<br>$N$ — число витков,<br>$a$ [мм] $=(R_1+R_2)/2$,<br>$c$ [мм] $=R_2-R_1$ |
| *з*. Плоская квадратная спираль [4.22, 4.51, 4.53]   | 1) $L$ [нГн] $=2{,}41\ aN^{5/3}\ \ln\ (8a/c)$,<br>2) $L$ [нГн] $=8{,}5\ S^{1/2}\ N^{5/3}\ (R_1=0)$,<br>3) $L$ [нГн] $=0{,}27\ \frac{D^{8/3}}{\rho^{5/3}}\ \frac{1}{(1+q/\rho)^{5/3}}$,<br>$a=(R_1+R_2)/2$, $c=R_2-R_1$.<br>$S$ — площадь, см², $\rho$ — ширина витка, мм, $q$ — ширина зазора, мм, $D$ — сторона квадрата, мм |

позволяет вывести выражение для полного сопротивления такого элемента [4.22]:

$$Z = Rl + j\omega Ll,$$

где $R$ — погонное активное сопротивление; $L$ — погонная индуктивность; $l$ — длина рассматриваемого отрезка линии.

Добротность индуктивности [4.22]

$$Q_L = \omega L/R.$$

Сопротивление прямоугольной полоски

$$R = \nu R_s l/2\ (w + t),$$

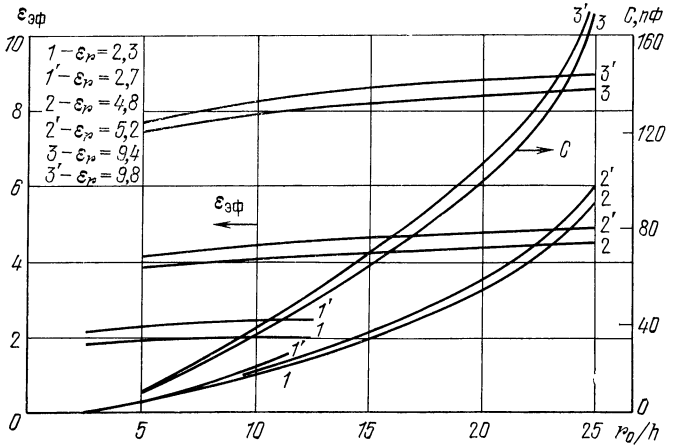



Рис. 4.23

где $R_s$ — поверхностное сопротивление, Ом (см. гл. 1); $\nu$ — поправочный коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока в полоске (рис. 4.25).

Отрезок цилиндрического проводника (рис. *в*) в качестве индуктивности употребляется редко. Соответствующая формула позволяет учитывать индуктивность выводов навесных элементов, используемых в схеме. Добротность такой индуктивности [4.22]

$$Q_L = 3{,}38 \cdot 10^3 \sqrt{f/2q}\,(Ld/l),$$

где $L$ — индуктивность нГн; $f$ — частота, ГГц.

Одновитковые петли (рис. *г—е*) различной конфигурации также применяются в полосковых схемах. Чаще используются прямоугольные и круглые петли.

Плоские спиральные индуктивности (рис. *ж, з*) круглой или прямоугольной (квадратной) формы применяются в качестве контурных индуктивностей или дросселей, позволяя реализовать значения индуктивности от единиц наногенри до сотен микрогенри. Добротность круглой спиральной индуктивности

$$Q_L = 2 \cdot 10^3 WN\,(d_2 + d_1)\sqrt{f/2q}/\nu'\sqrt{15d_2 - 7d_1}.$$

Добротность квадратной спиральной индуктивности

$$Q_L = 1{,}6 \cdot 10^3 WN\,(d_2 + d_1)\sqrt{f/2q}/\nu'\sqrt{15d_2 - 7d_1},$$

где $L$ — индуктивность, нГн; $d_1 = 2R_1$; $d_2 = 2R_2$; $f$ — частота, ГГц; $q$ определяется из табл. 1.6; $\nu'$ — поправочный коэффициент, учитывающий эффект «близости» витков плоской катушки.

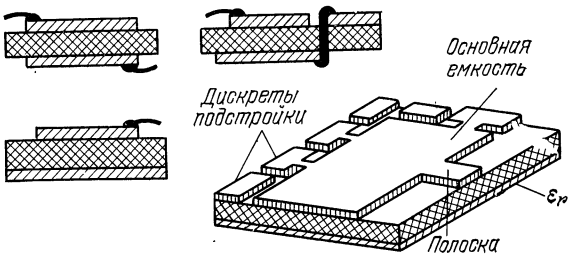



Рис. 4.24

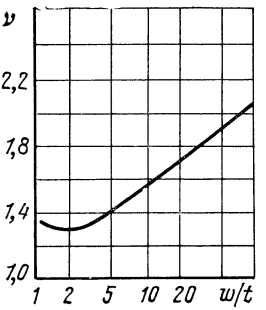



Рис. 4.25

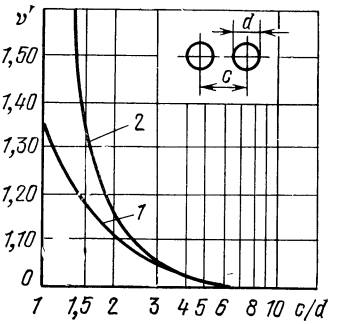



Рис. 4.26

Наилучшее значение $Q_L$ получают при $d_1/d_2 = 0{,}2$. Экспериментально установлено, что выбор одинаковой ширины витков и зазоров между ними ($w = s$) позволяет получить оптимальную добротность [4.22]. На рис. 4.26 представлена зависимость $\nu'$ для круглых проводников от соотношения их диаметра и межвиткового расстояния $c$. Кривая *1* соответствует синфазным токам в соседних витках, кривая *2* — противофазным. Эффект близости изменяет распределение тока в проводниках и приводит к возрастанию сопротивления (до 30 ...35% при малом $s$). При использовании данных рис. 4.26 для прямоугольных проводников полагают, что $c/d = (s + w)/w$.

**Пленочные резисторы.** В полосковых схемах резисторы используются в качестве схемных СВЧ элементов (табл. 4.8, рис. *а*), оконечных нагрузок (табл. 4.8, рис. *б—з*) и входят в состав низкочастотных цепей управления и питания. Применяются резисторы двух типов: с сосредоточенными параметрами (много меньше длины волны в линии) и распределенными. Предпочтительная форма резистора с сосредоточенными параметрами — прямоугольная. Резистор, включенный в полосковую линию, представляет собой отрезок линии передачи, выполненный из материала с высоким поверхностным сопротивлением. Входное сопротивление резистора [4.22]

$$Z_{\text{вх}} \approx R/(1 + \mathrm{j}\omega CR/3),$$

где $R = R_s l/w$ — номинальное сопротивление резистора ($R_s$ — поверхностное сопротивление резистивного участка); $C$ — емкость резистора. При выводе предполагалось, что $R \ll \omega L$; $L$ — индуктивность. Емкость $C$ можно оценить по формуле для плоского конденсатора. Эквивалентная схема пленочного резистора на СВЧ, учитывающая структуру тонкой резистивной пленки, в которой отдельные гранулы резистивного материала разделены воздушными промежутками, окисными пленками или диэлектрическим материалом, приведена на рис. 4.27. В СВЧ резисторе существует распределенная шунтирующая емкость $C_р$, на высоких частотах возникает последовательная индуктивность. В общем случае наличие паразитной емкости приводит к уменьшению сопротивления $R_1$ на высоких частотах по сравнению с $R$ на постоянном токе (рис. 4.28).

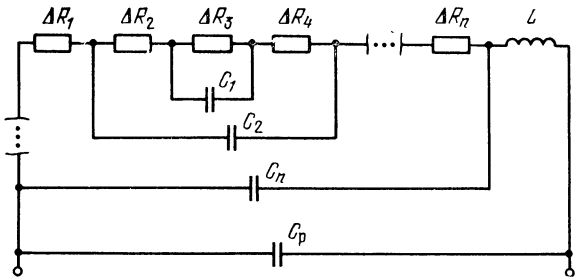



Рис. 4.27

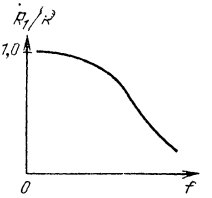
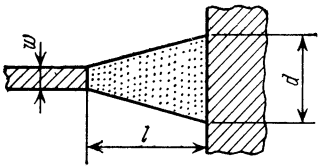
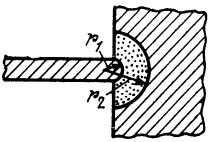
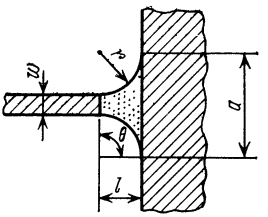



Рис. 4.28

Таблица 4.8

**Основные типы пленочных СВЧ резисторов**

| Тип резистора | Формулы для расчета $R$ |
|---|---|
| *а*. Пленочный прямоугольный резистор [4.34] | $R$ [Ом] $= R_s\ l/w$ |
| *б*. Резистор, замкнутый на землю через проводящую плоскость на верхней поверхности платы [4.58, 4.2] ($K_{стU}$ резистора улучшается при заземлении через металлизированный торец платы) | $R$ [Ом] $= R_s\ l/w$ |
| Резистор, заземленный через отверстие | |
| *в*. Резистор, заземленный с помощью четвертьволнового разомкнутого шлейфа [4.2] | $Z_ш$ [Ом] $\approx 0{,}1\ R\,\mathrm{tg}\left(\pi/2\ \sqrt{k}\right)$, $k = f_2/f_1$, $f_1$ и $f_2$ — граничные частоты полосы, $R = R_s\ l/w$ |
| *г*. Резистор в форме сектора [4.56] | $R$ [Ом] $= R_s\ \alpha°\pi/180\ \ln\ (r_2/r_1)$ |

| Тип резистора | Формулы для расчета $R$ |
|---|---|
| *д.* Резистор в форме трапеции [4.55]   | $R\ [\text{Ом}] = \dfrac{R_s\, l}{d-w} \ln \dfrac{d}{w}$ |
| *е.* Резистор в форме полуокружности [4.56]   | $R\ [\text{Ом}] = R_s \dfrac{\pi}{\ln (r_2/r_1)}$ |
| *ж.* Резистор, сопряженный по окружности с полоской и заземленной поверхностью [4.55]   | $R\ [\text{Ом}] = R_s \left[ \dfrac{k}{\sqrt{k^2-1}} \operatorname{arctg} \times \left( \dfrac{k+1}{\sqrt{k^2-1}} \operatorname{tg} \dfrac{\theta}{2} \right) - \dfrac{\theta}{2} \right]$<br>$k = 1 + w/2r;\ \theta = \arcsin\ (l/r)$ |
| *з.* Резистор в виде линии передачи с большим затуханием [4.2] | Коэффициент отражения<br>$\lvert\Gamma\rvert \approx 0{,}7\, \dfrac{R_s \Lambda}{Z_в\, w}$ |

При проектировании резисторов важную роль играет выбор такого перекрытия $N$ (табл. 4.8, *а*), при котором наблюдается стабилизация переходного контактного сопротивления. Рекомендуется для сопротивлений 25 ...50 Ом $N =$ $= 0{,}7$ ... 0,5 мм; 50 ...200 Ом $N = 0{,}5$ ...0,4 мм; 200 ...500 Ом $N = 0{,}4$ ...0,2 мм. Для резисторов, у которых $b < w$, элемент стыковки с полоской, расширенный по сравнению с его рабочей частью, должен выступать из-под проводниковой пленки на расстояние $\delta_1$ (см. табл. 4.8, рис. *а*) в 1,5 ... 2 раза превышающее ошибку на совмещение слоев при изготовлении платы, т. е. $\Delta_{см} < 0{,}1\ b$. Подобные выступы допускаются для резисторов с сопротивлением 50 ...100 Ом. Ширина проводящей пленки в месте стыковки ее с резистивной должна превышать ширину последней на $2\delta$ (не менее двойного допуска на совмещение слоев). Для резисторов шириной $b$, более чем в 10 раз превышающей $\Delta_{см}$ (см. табл. 4.8), с сопротивлением более 5 Ом ширина проводящей пленки в месте стыковки может быть равна ширине резистивной пленки или более. При этом, если произойдет смещение в пределах допуска, номинал резистора увеличится на 0,5 ...1%. На практике для резисторов устанавливают минимальные ширину 200 мкм, длину 300 мкм (при напылении через маску), длину и ширину 50 мкм (при изготовлении методом фотолитографии), зазоры между резистивными участками 200 и 80 мкм в зависимости от способа изготовления [4.34].

Резисторы с мощностью рассеяния до 0,5 Вт обычно выполняют в виде малогабаритных пленочных конструкций (табл. 4.8, рис. *а*, *б*, *в*). При более высокой мощности рассеяния используют конструкции, имеющие большую площадь (рис. *г*, *д*, *е*, *ж*, *з*). В нагрузочных резисторах на ситалле допустимо рассеивать до 3 Вт/см$^2$, на поликоре — до 20 Вт/см$^2$.

Малогабаритные пленочные резисторы с сосредоточенными параметрами длиной до 1 мм используются до 18 ГГц, резисторы большой площади — на частотах не более 1—2 ГГц. Одним из способов уменьшения шунтирующей емкости резистора является удаление экранной металлизации под резистором; иногда для улучшения частотных свойств увеличивают толщину подложки.

**Подстроечные элементы** [4.35; 4.36]. Необходимость в подстроечных элементах вызвана разбросом характеристик схем из-за технологических, производственных и других причин, неидентичности характеристик навесных компонентов и т. д. Подстраивать можно большинство топологических элементов полосковых схем.

На рис. 4.29 изображены конструктивные элементы, позволяющие в СПЛ и НПЛ осуществить: изменение длины прямого и ступенчатого проводников напайкой или разрывом перемычек (рис. 4.29, *а*, *б*); изменение длины проводника, замкнутого на землю, напайкой или разрывом перемычек (рис. 4.29, *в*); изменение $Z_В$ полосковой линии (рис. 4.29, *г*). Между подстроечными полосковыми элементами наиболее типичны зазоры 0,3 мм, что вполне доступно для изготовления печатных плат и микросхем СВЧ.

На рис. 4.30 изображены наиболее часто употребляемые конфигурации верхних обкладок конденсаторов площадью $S_0$. Данная форма обкладок и методы присоединения (и отсоединения) подстроечных секций могут употребляться в любом типе пленочных конденсаторов (рис. 4.30, *а*, *б*). Настройка штыревых (планарных) конденсаторов разрывом или напайкой перемычек в отдельных штырях (рис. 4.30, *в*) позволяет так же, как в пленочных, получать высокую точность настройки схем.

Подстройка индуктивных элементов осуществляется в небольших пределах с помощью изменения числа витков (рис. 4.31). При этом ограничения на размер зазора те же, что и для полосковых проводников.

СВЧ резистор можно подстроить, изменив его форму (лазерная подгонка номинала в сторону его увеличения — рис. 4.32, *а*) либо толщину резистивного слоя (абразивная подгонка номинала толстопленочного резистора соскабливанием слоя материала с его поверхности). Резисторы, входящие в состав низкочастотных цепей (питания и управления), можно подстраивать, как показано на рис. 4.32, *б* (разрывом перемычек).

**Элементы заземления.** Основные элементы заземления изображены на рис. 4.33: заземление через металлизированное отверстие в плате (*а*); заземленная плоскость на лицевой поверхности платы, соединенная с экраном через металлизированный торец платы (*б*); заземление с помощью перемычек через от-

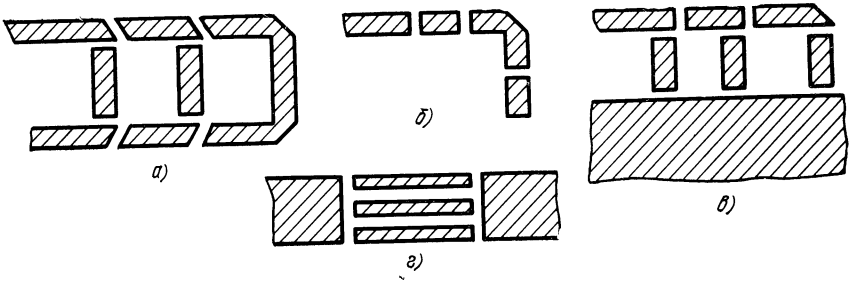



Рис. 4.29

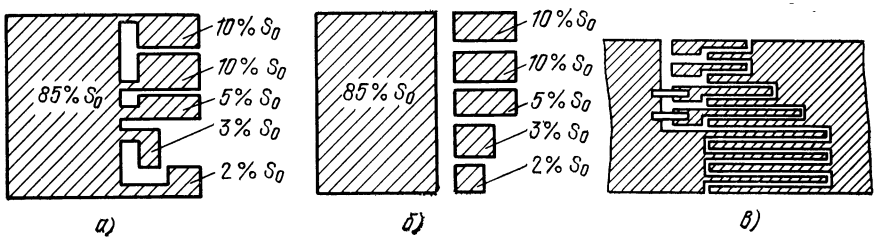



Рис. 4.30

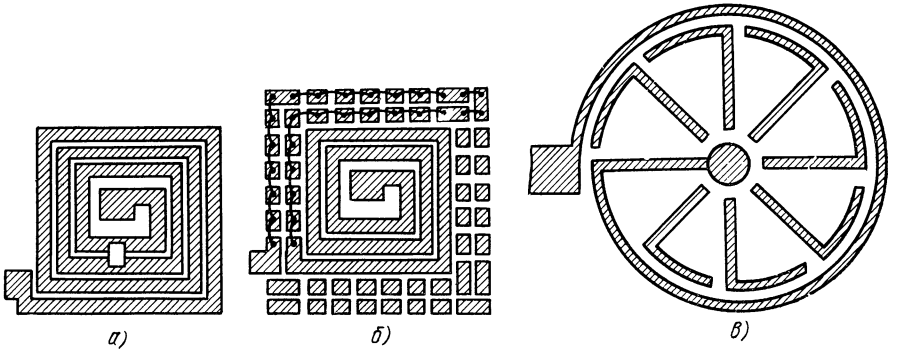



Рис. 4.31

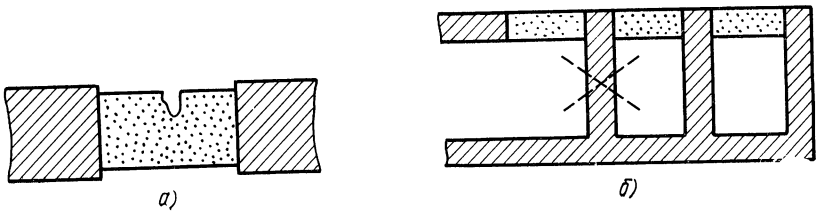



Рис. 4.32

верстие (*в*). Вывод заземленной плоскости на лицевую сторону полосковой платы используется в платах на органических диэлектриках (с малым $\varepsilon_r$) или в платах на неорганических диэлектриках (с большим $\varepsilon_r$) на относительно низких частотах (до 1 ...2 ГГц). На частотах выше 1 ...2 ГГц необходимо использовать в платах заземление через отверстие: при расположении точки заземления на краю платы нередко используют соединение с экраном через торец платы.

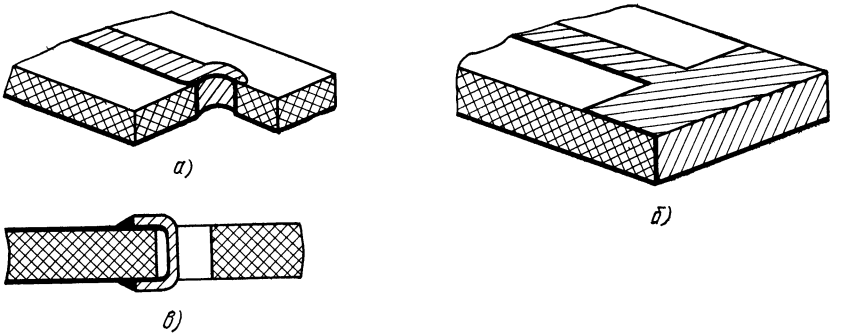



Рис. 4.33

**Пересечение полосковых линий.** Пересечение проводников возникает при конструировании индуктивностей, в многоканальных делителях мощности и т. д. На рис. 4.34 приведены два наиболее распространенных типа пересечений: с помощью многослойной структуры (металл — диэлектрик — металл), типичной для плат, изготавливаемых по пленочной технологии; с помощью присоединения перемычек различной формы. Подобные способы пересечения полосковых линий используют в диапазонах до 3 ...5 ГГц, обеспечивая $K_{ст\,U}$ меньше 1,1 ..1,15.

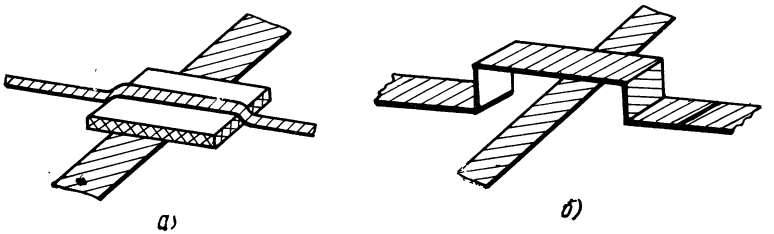



Рис. 4.34

## НАВЕСНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

В полосковой технике СВЧ применяется широкий класс навесных компонентов, как специально созданных для полосковой и интегральной техники, так и предназначенных для объемного монтажа.

**Навесные резисторы.** В полосковых схемах используются различные типы навесных резисторов: низкочастотные конструкции, которые в силу своих размеров сохраняют свойства сосредоточенных резистивных элементов с незначительной реактивностью вплоть до частот дециметрового диапазона (ОМЛТ, С2-10 и т. п.); конструкции, предназначенные для использования в коаксиальных узлах (МОУ, УНУ, С3-2); резисторы, специально созданные для полосковых конструкций (С6-4, С6-9 и т. п.). Номиналы резисторов соответствуют стандартным шкалам по рядам ГОСТ 2852—67. Номиналы определяются по формуле

$R = a10^n$, где $n$ — целое положительное или отрицательное число; $a$ — значение коэффициента из соответствующего ряда.

Значения коэффициента $a$ для ряда Е192: 1,00; 1,01; 1,02; 1,04; 1,05; 1,06; 1,07; 1,09; 1,11; 1,13; 1,14; 1,15; 1,17; 1,18; 1,20; 1,21; 1,23; 1,24; 1,26; 1,27; 1,29; 1,30; 1,32; 1,33; 1,35; 1,37; 1,38; 1,40; 1,42; 1,43; 1,45; 1,47; 1,50; 1,52; 1,54; 1,56; 1,58; 1,60; 1,62; 1,64; 1,65; 1,67; 1,69; 1,72; 1,74; 1,76; 1,78; 1,80; 1,82; 1,84; 1,87; 1,89; 1,91; 1,93; 1,96; 1,98; 2,00; 2,03; 2,05; 2,08; 2,10; 2,13; 2,15; 2,18; 2,21; 2,23; 2,26; 2,29; 2,32; 2,34; 2,37; 2,40; 2,43; 2,46; 2,49; 2,52; 2,55; 2,58; 2,61; 2,64; 2,67; 2,71; 2,74; 2,77; 2,80; 2,84; 2,87; 2,91; 2,94; 2,98; 3,01; 3,05; 3,09; 3,12; 3,16; 3,20; 3,24; 3,28; 3,32; 3,36; 3,40; 3,44; 3,48; 3,52; 3,57; 3,61; 3,65; 3,70; 3,74; 3,79; 3,83; 3,88; 3,92; 3,97; 4,02; 4,07; 4,12; 4,17; 4,22; 4,27; 4,32; 4,37; 4,42; 4,48; 4,53; 4,59; 4,64; 4,70; 4,75; 4,81; 4,87; 4,93; 4,99; 5,05; 5,11; 5,17; 5,23; 5,30; 5,36; 5,42; 5,49; 5,56; 5,62; 5,69; 5,76; 5,83; 5,90; 5,97; 6,04; 6,12; 6,19; 6,26; 6,34; 6,42; 6,49; 6,57; 6,65; 6,73; 6,81; 6,90; 6,98; 7,06; 7,15; 7,23; 7,32; 7,41; 7,50; 7,59; 7,68; 7,77; 7,87; 7,96; 8,06; 8,16; 8,25; 8,35; 8,45; 8,56; 8,66; 8,76; 8,87; 8,98; 9,09; 9,20; 9,31; 9,42; 9,53; 9,65; 9,76; 9,88.

Значения коэффициента $a$ для ряда Е96 выбраны через одно число ряда Е192 (1,00; 1,02; 1,05 и. т. д.) ; для ряда Е48 — через три числа (1,00; 1,05; 1,11 и т. д.). Значения коэффициента $a$ для ряда Е24: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,2; 5,6; 6,8 7,5; 8,2; 9,1. Значения коэффициента $a$ для ряда Е12 выбраны через одно число ряда Е24 (1,0; 1,2; 1,5 и т. д.); для ряда Е6 — через три числа ряда Е24 (1,0; 1,5; 2,2 и т. д.). Максимальное и минимальное значения номинала определяются конкретным типом резистора, номинальная допустимая мощность рассеяния зависит от конструкции и размеров резистора. Допустимое отклонение сопротивления резистора от номинального определяется тремя основными классами точности: I — с отклонением от номинала ±5% (Е24); II — ±10% (Е12); III — ±20% (Е6). Резисторы высокой точности могут выполняться с отклонением от номинала ±0,01, ±0,02, ±0,05, ±0,1; ±0,2; ±0,5; ±1; ±2% (Е192, Е96, Е48). Некоторые характеристики резисторов, которые могут быть использованы в СВЧ диапазонах в составе полосковых или комбинированных (полосково-коаксиальных) конструкций, приведены в табл. 4.9.

**Конструктивные типы СВЧ резисторов.** Габаритные размеры и конструкция резисторов определяют способ их размещения и крепления в полосковой схеме и соответственно параметры нагрузок. На согласование нагрузок заметно влия-

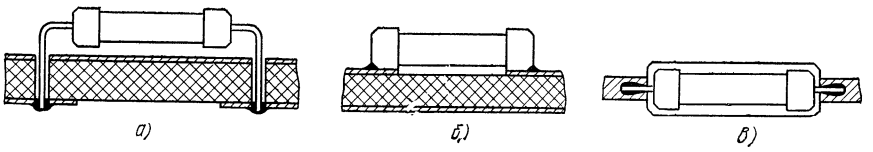



Рис. 4.35

ет способ заземления резисторов. В полосковых узлах на СПЛ в большинстве случаев для размещения резисторов необходимо изготовлять монтажное отверстие или углубление в плате, в узлах на НПЛ резисторы обычно располагают на поверхности платы. Резисторы больших габаритных размеров: можно размещать вне платы, и их крепление в конструкции осуществляется механическим способом (на винтах, в цанговых зажимах и т. п.), а контакт с полоской создается с помощью прижима или пайки вывода. Трубчатые или стержневые резисторы (С2-10, ОМЛТЕ, МОУ, МОН) присоединяются к контактным площадкам за выводы (рис. 4.35, *а*, *в*) или за колпачки (рис. 4.35, *б*). Эти резисторы сохраняют свойства сосредоточенных в диапазоне до 1 ...2 ГГц в зависимости от типа подложки, способа включения, размера и т. п. На рис. 4.36 представлена зависимость $K_{ст\,V}$ от частоты для резистора С2-10-0,125 Вт, используемого в качестве оконечной

Таблица 4.9

**Характеристики резисторов**

| Тип резистора, технические условия | Мощность рассеяния, Вт | Габаритные размеры, мм | | | Номинальные значения, Ом; ряд, отклонение от номинала | Масса, г (не более) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $l$, | $d$ | $d_{вывода}$ | | |
| ОМЛТЕ ОЖО.467.022 ТУ (металлопленочные, лакированные, теплостойкие, повышенной надежности) | 0,5 | 10,8 | 4,2 | 0,8±0,1 | 8,2...5,1·10⁶ | 1,0 |
| | 1,0 | 13,0 | 6,6 | 0,8±0,1 | 8,2...10·10⁶ | 2,0 |
| | 2,0 | 18,5 | 8,6 | 1,0±0,1 | 8,2...10·10⁶ E24; ±5, ±10% | 3,5 |
| ОМЛТ-0,125 ОЖО.467.089 ТУ | 0,125 | | | | 100...2,2·10⁶ E96; ±0,5 %, ±1% | |
| МОН ОЖО.467.106 ТУ (металлоокисные низкоомные) *а* — с выводами; *б* — без выводов, с колпачками; *в* — с контактными поясками | 0,5 | 10,8 (*а*) | 4,2 | 0,8±0,1 | 1...100; ±0,5, ±10% | 1,0 |
| | | 10,8 (*б*) | 3,9 | | 50, 75, 100; ±5% | 1,0 |
| | | 9,2 (*в*) | 3 | | 50, 75, 100; ±5% | 1,0 |
| | 1,0 | 13 (*а*) | 6,6 | 0,8±0,1 | 2...100; ±5 %; ±10% | 2,0 |
| | | 13 (*б*) | 6,3 | | 50, 75, 100; ±5% | 2,0 |
| | | 11,8 (*в*) | 5,4 | | 50, 75, 100; ±5% | 2,0 |
| | 2,0 | 18,5 (*а*) | 8,6 | 1,0±0,1 | 2...100; ±5, ±10 % | 3,5 |
| | | 18,5 (*б*) | 8,3 | | 50, 75; ±5 % | 3,5 |
| | | 17 (*в*) | 7,4 | | 50, 75; ±5 % | 3,5 |
| МОУ ОЖО.467.026 ТУ (металлоокисные ультравысокочастотные) | | | | | | |
| стержневые | 0,1 | 9,5 | 1,6 | | 10...39; 43...100 | 0,07 |
| | 0,15 | 12,5 | 1,6 | | 10...39; 43...100 | 0,09 |
| | 0,25 | 14,5 | 1,6 | | 10...39; 43...100 | 0,11 |
| | 0,5 | 16,5 | 1,6 | | 10...47; 51...150 | 0,12 |
| трубчатые | 1 | 30 | 3 | 2[1] | 10...47, 50; 51...150 | 0,55 |
| | 2 | 40 | 4 | 2 | 10...47; 50, 51...150 | 1,1 |
| | 5 | 60 | 6 | 3 | 10...47, 50, 51...150 | 4,5 |
| | 10 | 80,5 | 8 | 4 | 10...47, 50, 51...150 | 9,5 |
| | 25 | 130 | 13 | 8 | 17; 25; 37,5; 50; 75 | 36 |
| | 50 | 180 | 18 | 12 | 17; 25; 37,5; 50; 75 | 77 |
| | 100 | 300 | 21 | 15 | 17; 25; 37,5; 50; 75 | 155 |

| Тип резистора, технические условия | Мощность рассеяния, Вт | Габаритные размеры, мм | | | Номинальные значения, Ом; ряд, отклонение от номинала | Масса, г (не более) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $l$, | $d$ | $d_{вывода}$ | | |
| МОУ-Ш (шайбовые) | 200 | 300 | 21 | 15 | 25; 37,5; 50; 75 E24; ±5% | 155 |
| | 0,15 | | 10±0,2 | 1,75; ±0,1 | 16...39; 43...75 | 0,2 |
| | 0,5 | | 16±0,2 | 2,1±0,1[2] | 4,3...15; 16...39; 43...150 E24; ±10% | 1,0 |
| С2-10 ОЖО.467.072 ТУ (прецизионные) | 0,125 | 6,0 | 2,0 | 0,6±0,1 | 10...100 | 0,15 |
| | 0,25 | 8,0 | 2,7 | 0,6±0,1 | 1...3010 | 0,3 |
| | 0,5 | 10,8 | 4,2 | 0,8±0,1 | 1...3010 | 1,0 |
| | 1,0 | 13 | 6,6 | 0,8±0,1 | 1...3010 | 2,0 |
| | 2,0 | 18,5 | 8,6 | 1,0±0,1 | 1...3010 E192; ±0,5, ±1 % | 3,5 |
| С2-12 ОЖО.467.055 ТУ (ниточной конструкции) | 0,05 | 3±0,6 | 0,3[3] | — | 5,6...2700 | 0,0008 |
| | 0,125 | $6^{+0,6}_{-0,4}$ | 0,5 | | 560...5100 | 0,0016 |
| | 0,25 | $6^{+0,6}_{-0,4}$ | 0,5 | | 10...510 E24; ±5; ±10; ±20 % | 0,0016 |
| С3-2 ОЖО.467.070 ТУ (композиционные таблеточные) | 0,025 | 1,7[4]—0,15 | 1,5[4]—0,15 | — | $1...10^6$ | 0,012 |
| | 0,125 | 2,7—0,15 | 5—0,15 | | E24; ±5; ±10; ±20 % | 0,025 |
| С3-3, ОЖО.467.056 ТУ (ниточные композиционные) | 0,025 | 3 | 0,8 | 10 | $150...10^6$ | 0,0004 |
| | 0,125 | 6 | 1,0 | | $100...3,3\cdot10^6$ E24; ±5; ±10; ±20 % | 0,0015 |
| С6-3 ОЖО.467.101 ТУ | 0,5 | 14 | 3 | | 50 | — |
| С6-4 ОЖО.467.110 ТУ (высокочастотный неизолированный, безвыводный) | 0,025 | 1±0,1[5] | 1±0,1[5] | 0,8[5] | 5,11...1000 | 0,002 |
| | 0,05 | 2±0,1 | 1±0,1 | 0,8 | 5,11...3010 | 0,004 |
| | 0.05 | 2±0,1 | 2±0,1 | 0,8 | 5,11...1000 | 0,008 |
| | 0,125 | 4±0,1 | 2±0,1 | 0,8 | 5,11...3010 E48; ±2; ±5 % | 0,016 |
| С6-5 ОЖО.467.111 ТУ (плоский с ленточными выводами) | 10 | 14,3 | 7 | — | 30; 47; 62 | — |

| Тип резистора, технические условия | Мощность рассеяния, Вт | Габаритные размеры, мм | | | Номинальные значения, Ом; ряд, отклонение от номинала | Масса, г (не более) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $l$, | $d$ | $d_{вывода}$ | | |
| С6-9 ОЖО.467.140 ТУ (безвыводный кубической формы) | 0,1 | 1 | 1 | | 10...1000 Е48; с номиналами 50; 61,2; 96,5; 150; 291; 437; ±2 % | 0,01 |

[1] Диаметр отверстия в трубчатой конструкции.
[2] Внутренний диаметр шайбы.
[3] Длина контактного пояска.
[4] $l$ — диаметр таблетки; $d$ — высота.
[5] $l$ — длина пластинки; $d$ — ширина; $d_в$ — высота.

Примечание. Все резисторы эксплуатируются при —60...+125° С; резисторы типа МОН и С6-4 эксплуатируются при относительной влажности до 98% (25° С), остальные — до 98% (40° С); резисторы ОМЛТ-0,125, С2-10, С2-17 устойчивы к вибрациям с частотой 5...2500 Гц (максимальное ускорение 18*g*), С2-12, С3-2, С3-3 — с частотой 5...5000 Гц (40*g*). ОМЛТЕ — с частотой 5...2000 Гц (15*g*), МОН — с частотой 1...600 Гц (10*g*), МОУ 0,1...0,5 с частотой 1...1000 Гц (7,5*g*), МОУ1...10 — с частотой 10...600 Гц (2,5*g*), МОУ25...200 — с частотой 10...80 Гц (2,5*g*).

нагрузки НПЛ при разных способах включения (*1* — заземление на плоскости, *2* — через отверстие, *3* — с помощью четвертьволнового разомкнутого шлейфа).

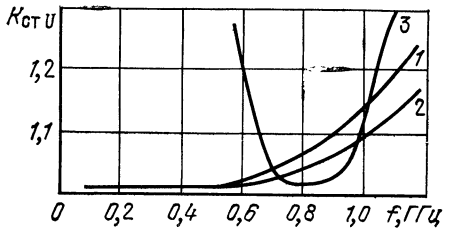
Резисторы ниточной конструкции (С2-12, С3-3 и т. д.) из-за небольшого диаметра одинаково удобно монтируются в СПЛ и НПЛ (рис. 4.37), а малые линейные размеры этих резисторов позволяют использовать их в диапазоне до 3 ГГц и выше. Таблеточные резисторы (С3-2) устанавливаются внутри отверстий в полосковых платах (рис. 4.38) между полоской и заземленным основанием, что позволяет добиться хорошего согласования при использовании их в качестве, например, оконечных нагрузок.

Чип[1]-резисторы (рис. 4.39) — элементы, специально разработанные для использования в НПЛ в составе ГИС СВЧ. Это миниатюрные элементы, у которых, например, при размерах 1 × 1 × 0,6 мм размер резистивного участка 0,5 × 1 мм, а контактных площадок 0,25 × 1 мм. Малые размеры резистивного участка обусловливают возможность работы этих резисторов до 12 ...18 ГГц, $K_{ст\,V}$ этих резисторов при включении их в качестве нагрузки в НПЛ не превышает 1,1 ...1,4 (табл. 4.8, *б*). Отечественные резисторы этого типа С6-4, С6-9; известны зарубежные аналоги (фирм «EMC Technology», LRC, TEC WAVE). В качестве материалов оснований Чип-резисторов используются ситаллы, керамика из окиси алюминия, кремний. Контактные площадки выполнены облуженными (для пайки) либо золочеными (для сварки). В некоторых конструкциях обратная сторона подложки металлизируется. Способы установки на платах показаны на рис. 4.40 (*а* — основной способ установки, *б* — «перевернутый монтаж» с помощью проволочных проводников, *в* — установка резистора типа С6-9 в отверстии в плате).

**Резисторы с повышенной мощностью рассеяния.** Для рассеяния мощности больше 1 Вт на частотах до 12 ...18 ГГц используются специальные резисторы, конструкция которых (рис. 4.41) обеспечивает как достаточно хорошее согласование с линией передачи, так и эффективный теплоотвод. Резисторы типа «болт» (рис. 4.41, *а*) представляют собой прямоугольную пластинку из керамики, размещенную на металлическом основании, являющемся единым целым с металлическим стержнем. Резьба на стержне позволяет разместить на нем радиатор или

[1] Чип (chip) — прямое заимствование термина, не имеющее адекватного значения в русском языке (буквально — обломок, осколок).

Рис. 4.36



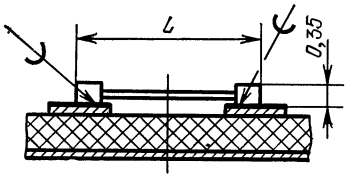




Рис. 4.37

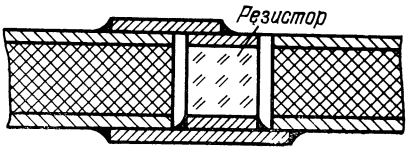



Рис. 4.38

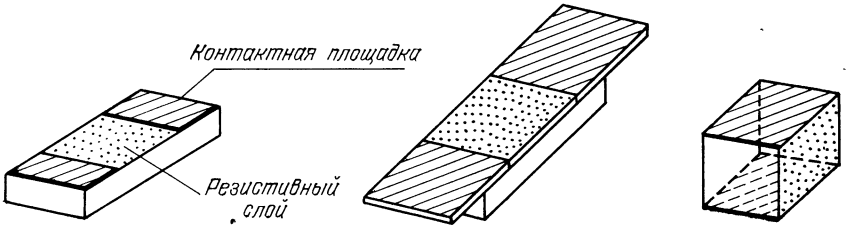



Рис. 4.39

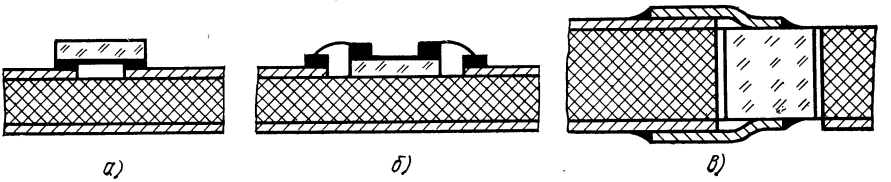



Рис. 4.40

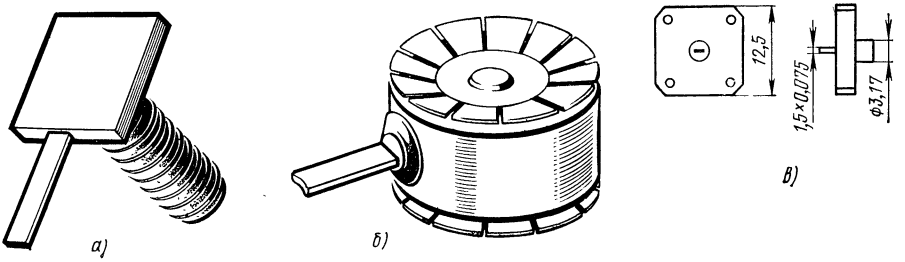



Рис. 4.41

другое устройство для интенсивного отвода тепла и рассеивать до 50 Вт. Резистор может иметь один или два плоских вывода для присоединения к полосковой линии, номиналы 50 и 100 Ом. Наличие шунтирующей емкости, возникающей из-за большой площади резистора (порядка 1 см$^2$), снижает верхние граничные частоты их использования (в диапазоне 4 ГГц $K_{ст\,V} \leqslant 1{,}25$). Типичные габаритные размеры резистора: керамическое основание 6,5 × 6,5 мм (12 × 12 мм), диаметр теплоотводящего стержня 4 мм, ширина вывода 1,5 мм, длина вывода 12 мм, толщина 0,075 мм.

Конструкции со сжимными контактами или «таблеточного» типа (рис. 4.41, *б*) устанавливаются, как правило, в СПЛ (воздушных и на органических диэлектриках) между экранными поверхностями плат или крышками корпуса, через

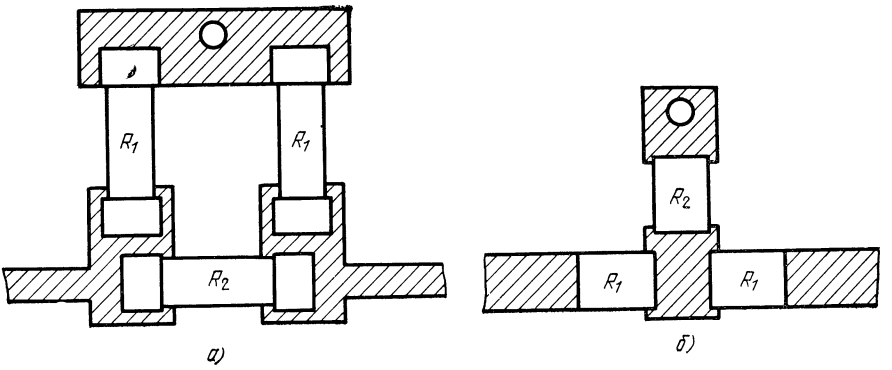



Рис. 4.42

которые осуществляется теплоотвод. Поскольку такие резисторы обычно применяются как встроенные нагрузки внутри полосковых схем, их сопротивление обычно 50 Ом; известны также серии резисторов с сопротивлением 50 ...500 Ом. Мощность рассеяния 1 и 3 Вт (непрерывная). Резисторы используются в диапазонах до 12 ГГц, имея $K_{ст\,V} = 1{,}1$ ниже 4 НГГц, 1,25 до 8 ...10 ГГц; 1,35 до 12 ГГц.

Плоские навесные резисторы подобны по форме и расположению выводов аналогичным маломощным резисторам. В зависимости от площади резистора и материала подложки (поликор, окись бериллия и др.) они способны рассеивать мощность без теплоотвода 0,05 ...1 Вт, с теплоотводом от 3 Вт (размер резистора 6 × 2,5 мм) до 50 Вт (18 × 9 мм) и выдерживают напряжение до 100 ...300 В, номиналы резисторов 10 ...500 Ом. Предельные рабочие частоты в зависимости от размеров 3 ...5 ГГц.

Фланцевые резисторы (рис. 4.41, *в*) находят применение в качестве оконечных нагрузок. Они представляют собой переходы от полосковой линии к коаксиальному резистору. Разнообразные виды контактов с полосками и разные присоединительные размеры фланцев позволяют присоединять их к полосковым линиям аналогично коаксиально-полосковым переходам разных коаксиальных каналов. Нагрузочный резистор оказывается вынесенным за пределы полосковой схемы, что облегчает теплоотвод. Подобные резисторы рассеивают мощность 1 ...15 Вт.

**Навесные аттенюаторы (резистивные поглотители).** Наиболее простая конструкция СВЧ аттенюатора — сборка из навесных резисторов, включенных по Т- или П-схеме. На рис. 4.42, *а* показана такая сборка на основе резисторов С2-10, используемая в диапазоне 500 МГц, на рис. 4.42, *б* — сборка на основе резисторов С6-4. Номиналы резисторов для Т- и П-секций аттенюаторов выбираются по следующим формулам:

1) для П-секции

$$R_1/Z_в = (K_U + 1)/(K_U - 1),\ R_2/Z_в = (K_U^2 - 1)/2K_U,$$

2) для Т-секции

$$R_1/Z_в = (K_U - 1)/(K_U + 1),\ R_2/Z_в = 2K_U/(K_U^2 - 1),$$

где $R_1$ и $R_2$ — номиналы резисторов, Ом; $K_U$ — коэффициент передачи по напряжению.

В табл. 4.10 и 4.11 приведены расчетные величины $R_1$ и $R_2$ при различных ослаблениях для Т- и П-схем соответственно. Если $Z_в \neq 50$ Ом, то соответствующие значения $R_1$ и $R_2$ следует умножить на отношение $50/Z_в$ ($Z_в$ — требуемое волновое сопротивление).

Таблица 4.10

**Значения сопротивлений для П-секции аттенюаторов ($Z_в = 50$ Ом)**

| Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом | Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом | Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 1744,9 | 2,856 | 11,0 | 89,24 | 81,66 | 25,0 | 55,96 | 443,18 |
| 1,0 | 869,67 | 5,753 | 12,0 | 83,54 | 93,25 | 26,0 | 55,27 | 497,5 |
| 2,0 | 437,59 | 11,565 | 13,0 | 78,84 | 106,09 | 27,0 | 54,67 | 558,56 |
| 3.0 | 292,42 | 17,61 | 14,0 | 74,92 | 120,31 | 30,0 | 53,26 | 789,80 |
| 4,0 | 221,23 | 23,81 | 15,0 | 71,63 | 136,15 | 35,0 | 51,81 | 1405,4 |
| 5,0 | 178,53 | 30,4 | 16,0 | 68,83 | 153,79 | 40,0 | 51,01 | 2499,75 |
| 6,0 | 150,48 | 37,35 | 17,0 | 66,45 | 173,46 | 45,0 | 50,56 | 4475,75 |
| 7,0 | 130,73 | 44,81 | 18,0 | 64,40 | 195,44 | 50,0 | 50,31 | 7905,82 |
| 8,0 | 116,146 | 52,84 | 19,0 | 62,63 | 220,02 | 55,0 | 50,18 | 14058,51 |
| 9,0 | 104,99 | 61,59 | 20,0 | 61,11 | 247,5 | 60,0 | 50,1 | 24999,9 |
| 10,0 | 96,25 | 71,153 | 23,0 | 57,62 | 351,37 | | | |

На практике редко используют полный набор секций аттенюаторов, соответствующих каждому требуемому значению ослабления. Например, при создании дискретного аттенюатора, обеспечивающего затухание 0,5 ...60 дБ с дискретом в 0,5 дБ, целесообразно ограничить набор ступеней затухания 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32 дБ, комбинация которых позволяет получить любые промежуточные значения затухания. В Чип-аттенюаторах (рис. 4.43) Т- или П-секция размещается на подложке малых размеров. Схемы имеют три или четыре вывода (контактные площадки) для установки на полосковую плату. Подобные элементы работоспособны до частот 12 ... 18 ГГц ($K_{ст\,V}$ —не более 1,1[1]) и рассеивают мощность 0,125 ... 5 Вт. Материалы основания, на которых располагаются аттенюаторы, — алюмооксидная керамика, ситалл, высокоомный крем-

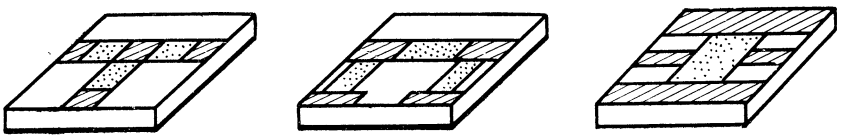


Рис. 4.43

[1] Данные о $K_{ст\,V}$, сообщаемые в рекламных проспектах, не всегда относятся к реальным полосковым схемам с высокой диэлектрической проницаемостью подложки, а часто отражают результаты измерений в специальных приспособлениях коаксиальной и других конструкций, где $\varepsilon_{эф} \approx 1$.

Таблица 4.11

**Значения сопротивлений для Т-секции аттенюаторов ($Z_В = 50$ Ом)**

| Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом | Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом | Ослабление, дБ | $R_1$, Ом | $R_2$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 1,432 | 872,32 | 11,0 | 28,01 | 30,62 | 25,0 | 44,67 | 5,641 |
| 1,0 | 2,875 | 433,3 | 12,0 | 29,92 | 26,81 | 26,0 | 45,23 | 5,024 |
| 2,0 | 5,731 | 215,2 | 13,0 | 31,71 | 23,57 | 27,0 | 45,72 | 4,476 |
| 3,0 | 8,549 | 141,9 | 14,0 | 33,37 | 20,78 | 30,0 | 46,92 | 3,165 |
| 4,0 | 11,31 | 104,8 | 15,0 | 34,90 | 18,36 | 35,0 | 48,23 | 1,778 |
| 5,0 | 14,00 | 82,24 | 16,0 | 36,32 | 16,26 | 40,0 | 49,00 | 1,00 |
| 6,0 | 16,61 | 66,93 | 17,0 | 37,62 | 14,41 | 45,0 | 49,44 | 0,562 |
| 7,0 | 19,12 | 55,8 | 18,0 | 38,82 | 12,79 | 50,0 | 49,68 | 0,316 |
| 8,0 | 21,63 | 47,31 | 19,0 | 39,91 | 11,36 | 55,0 | 49,82 | 0,177 |
| 9,0 | 23,82 | 40,59 | 20,0 | 40,91 | 10,1 | 60,0 | 49,90 | 0,1 |
| 10,0 | 25,97 | 35,14 | 23,0 | 43,39 | 7,115 | | | |

ний. Обратная сторона подложки Чип-аттенюаторов в некоторых конструктивных исполнениях металлизируется. Точность выполнения номиналов затухания 0,1 ...0,2 дБ для затухания до 10 дБ, 0,4 ...0,5 дБ для затуханий до 30 дБ. Характеристики резистивных поглотителей приведены в табл. 4.12.

**Навесные конденсаторы постоянной емкости.** В полосковых схемах в зависимости от типа конструкции используются: конденсаторы постоянной и переменной емкостей, предназначенные для относительно низкочастотных цепей, если они сохраняют свойства сосредоточенных элементов в СВЧ диапазоне; конденсаторы, разработанные специально для СВЧ диапазона. Номиналы конденсаторов соответствуют стандартным шкалам (рядам) по ГОСТ 2519—67 и определяются по тем же рядам, что и резисторы. Конкретная емкость определяется по формуле $C = a \cdot 10^n$. Допустимое отклонение емкости от номинальной зависит от класса точности. Изготовляются конденсаторы трех классов: I (±5%), II (±10%), III (±20%). Существуют более высокие классы точности: 0 (±2%), 00 (±1%), 05 (±0,5%), 02 (±0,2%), 01 (±0,1%). По отклонению ТКЕ конденсаторы разделяются на две подгруппы: I — керамические, стеклокерамические и стеклянные на номинальное рабочее напряжение до 1600 В, изолированные емкостью до 47 пФ, незащищенные и неизолированные емкостью до 20 пФ; II — керамические, стеклокерамические и стеклянные на номинальное рабочее напряжение до 1600 В, изолированные емкостью больше 47 пФ, незащищенные и неизолированные емкостью больше 20 пФ, керамические, стеклокерамические и стеклянные на номинальное рабочее напряжение выше 1600 В. Соответствущие значения ТКЕ приведены в табл. 4.13.

Конденсаторы типа К10-9, К10-17, К10-42, К10-43 и т. п. представляют собой миниатюрные керамические параллелепипеды (рис. 4.44), торцы которых металлизированы и облужены. Конденсаторы с помощью пайки крепятся к контактным площадкам схем (рис. 4.45). Габаритные размеры этих конденсаторов невелики: К10-9 (ОЖО.460.068 ТУ); 2 × 2 × 1,2; 2 × 4 × 1,2; 4 × 4 × 1,2; 2,5 × 5,5 × 1,2 мм; К10-17: 1,5 × 1,4 × 1,2; 2 × 1,9 × 1,2; 4 × 3 × 1,2; 5,5 × 4,6 × 2,0 мм; К10-42: 1,5 × 1,4 × 1,2 мм; К10-43: 4 × 2,9 × 2,4, 5,5 × 3,2 × 2,7; 8 × 6,8 × 2,4; 12 × 10,6 × 2,4 мм и т. д. Конденсаторы типа К10-9 имеют номиналы 2,2 ...47 000 пФ, допуск на емкость ±5 и ±10%, ТКЕ + + 33 · $10^{-6}$ (П33), — 47 · $10^{-6}$ (М47) и т. п., рабочее напряжение — до 25 В. Конденсаторы типа К10-17 (ОЖО.460.107 ТУ) имеют номиналы 22 ...330 000 пФ, допуск на емкость ±5 и ±10%, по ТКЕ эти конденсаторы относятся к группам М33, М47, М75 и т. п., рабочее напряжение — до 25 В. Конденсаторы типа К10-42 имеют номиналы 1 ...22 пФ, допуск на емкость ±0,25 пФ для емкости менее 4,7 пФ; ±0,25 и ±0,5 пФ для емкости 4,7 ...10 пФ и ±5; ±10; ±20% для емко-

Таблица 4.12

**Характеристики аттенюаторов**

| Тип аттенюатора, технические условия | Мощность рассеяния, Вт | Габаритные размеры, мм | | Номинальные значения, дБ; отклонение от номинала | Масса, г, не более |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $l$[1] | $w$[1] | | |
| С2-20 (металлопленочные пластинчатые) | 0,2[2] | 2,6 | 16 | 5±0,5 | 0,2 |
| | 0,4[2] | 5,2 | 16 | 10±0,8 | 0,4 |
| | 0,5[2] | 7,1 | 16 | 15±1,2 | 0,6 |
| | 0,75[2] | 9,0 | 16 | 20±1,7 | 0,8 |
| | 0,75[2] | 16,1 | 16 | 40±3,2 | 1,4 |
| | 0,5[2] | 3,7 | 22 | 5±0,5 | 0,5 |
| | 0,75[2] | 7,4 | 22 | 10±0,8 | 0,8 |
| | 0,75[2] | 10 | 22 | 15±1,2 | 1,3 |
| | 0,75[2] | 13,8 | 22 | 20±1,7 | 1,6 |
| | 0,75[2] | 26 | 22 | 40±3,2 | 2,5 |
| | 0,5[3] | 3,7 | 22 | 5±0,5 | 0,5 |
| | 0,75[3] | 6,5 | 22 | 10±0,8 | 0,8 |
| | 0,75[3] | 10 | 22 | 15±1,2 | 1,3 |
| | 0,75[3] | 13,3 | 22 | 20±1,7 | 1,6 |
| | 0,75[3] | 26 | 22 | 40±3,2 | 2,5 |
| С6-1[2] ОЖО.467.078 ТУ (тонкослойные, металлизированные, пластинчатые) | 0,125 | 4,5 | 20 | 1 | 0,7 |
| | 0,125 | 5 | 20 | 2 | 0,8 |
| | 0,125 | 5 | 20 | 3 | 0,9 |
| | 0,25 | 5,6 | 20 | 4 | 1,0 |
| | 0,5 | 6,1 | 20 | 5 | 1,1 |
| | 0,75 | 6,6 | 20 | 6 | 1,2 |
| | 1,0 | 7,1 | 20 | 7 | 1,5 |
| | 1,0 | 7,6 | 20 | 8 | 1,8 |
| | 1,0 | 8,2 | 20 | 9 | 2,0 |
| | 1,0 | 8,7 | 20 | 10 | 2,5 |
| | 1,0 | 11,8 | 20 | 15 | 3,0 |
| ПР1-1[2] ОЖО.224.015 ТУ (поглотитель непроволочный) | 0,5 | 2 | 2 | — | 0,5±0,1 |
| | | | | | 1±0,1 |
| | | | | | 2±0,1 |
| | | | | | 4±0,1 |
| | | | | | 8±0,1 |
| | | | | | 16±0,2 |
| | | | | | 32±0,5 |

[1] $l$ — длина пластинки, $w$ — ширина.
[2] Волновое сопротивление 50 Ом.
[3] Волновое сопротивление 75 Ом.

Примечание. Поглотители С2-20 и С6-1 эксплуатируются при —60 ... +85 С°, ПР1-1 при —60 ... +125° С; поглотитель С2-20 эксплуатируется при относительной влажности до 80% (35 °С)), С6-1 и ПР1-1 — до 98% (40 °С); поглотитель С2-20 устойчив к вибрации с частотой 5 ... 80 Гц (максимальное ускорение 4 $g$), С6-1 с частотой 5 ... 1000 Гц (7,5 $g$); максимальная рабочая частота поглотителя ПР1-1 18 ГГц, $K_{стV}<1,5$.

стей больше 10 пФ; ТКЕ (—47 ± 30) · $10^{-6}$ (группа М47); рабочее напряжение 50 В, tg $\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$.

Конденсаторы К10-43 имеют номиналы 21,5 пФ ...0,0442 мкФ с допуском ±1, ±2, ±5%; ТКЕ (0 ± 30) · $10^{-6}$ (группа МПО); рабочее напряжение 25 В tg $\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$. Конденсаторы К10-42 имеют наименьшие габаритные размеры и разработаны специально для применения в ГИС СВЧ на частотах до

Таблица 4.13

**ТКЕ ($10^{-6}$ на 1°С) и допустимое отклонение емкости конденсаторов**

| Группа по температурной стабильности | Номинальное значение ТКЕ | Допустимое отклонение ТКЕ для подгруппы | | Изменение емкости, %, не более в интервале температуре | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | I | II | 20...60°С | 20...155°С |
| П100 | +100 | +120...—40 | ±40 | —2 | +2 |
| П60 | +60 | +120...—40 | ±40 | —1,5 | +2 |
| П33 | +33 | +120...—40 | ±30 | —1 | +1 |
| МПО | 0 | +120...—40 | ±30 | ±1 | ±1 |
| М33 | —33 | +120...—40 | ±30 | +1 | —1 |
| М47 | —47 | +120...—40 | ±40 | +1,5 | —1,5 |
| М75 | —75 | +120...—40 | ±40 | +2 | —2 |
| М150 | —150 | +120...—40 | ±40 | +3 | —3 |
| М220 | —220 | +120...—40 | ±40 | +4 | —4 |
| М330 | —330 | +120...—40 | ±60 | +6 | —6 |
| М470 | —470 | +120...—90 | ±90 | +8 | —8 |
| М750 | —750 | +250...—120 | ±120 | +12 | —12 |
| (М700) | (—700) | | | | |
| М1500 | —1500 | ±250 | +250 | +25 | —25 |
| (М1300) | (—1300) | — | | | |
| М2200 | —2200 | — | ±500 | +40 | —40 |
| М3300 | —3300 | — | ±1000 | +60 | —60 |

Примечание. Изменение емкости в интервале рабочих температур для групп Н10... Н90: Н10±10%, Н20±20%; Н30±30%, Н50±50%, Н70±70%, Н90±90%.

2 ГГц. Остальные типы безвыводных конденсаторов для работы на СВЧ не предназначены, однако опыт свидетельствует о возможности их использования до 1,5 ...2 ГГц.

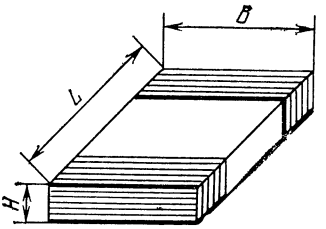



Рис. 4.44

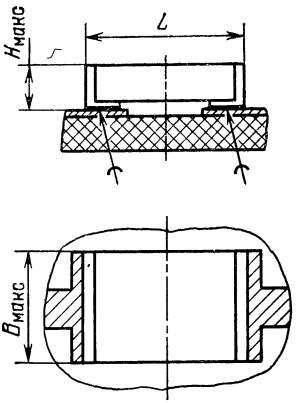



Рис. 4.45

Конденсаторы с проволочными или плоскими выводами (КД-1, КТ-2, КДУ и т. п.) устанавливаются на платах с помощью пайки выводов к контактным площадкам или установки выводов в отверстия платы и припайки выводов к контактным площадкам вокруг отверстий (рис. 4.46), как это делается в низкочастотных печатных платах. Применение таких конденсаторов ограничено относительно низкими частотами (до 0,5 ГГц) и чаще всего имеет место в воздушных полосковых линиях и схемах на органических диэлектриках с малым $\varepsilon_r$.

**Конденсаторы переменной емкости.** В полосковых схемах можно использовать как малогабаритные конденсаторы, не предназначенные для СВЧ техники, до 0,5 ГГц, так и конструкции, специально разработанные для СВЧ диапазона. Конденсаторы типа КТ4-25 (рис. 4.47, *а*) имеют габаритные размеры 8,5×4,5 (для номинального напряжения 250 В), 5 × 3,5 (100 В); 5 × 5×3,5 (100 В); 8,5 × 8,5 × 4,5 мм (250 В) и т. д. Они обеспечивают диапазоны изменения емкостей 1 ...5; 2 ...10; 5 ...25; 6 ...30 (100 В); 0,4 ...4; 2...20; 1 ...8; 5 ...40 пФ (250 В); ТКЕ $(0 + 30) \cdot 10^{-6}$ (группа МП0), $-(75 \pm 30) \cdot 10^{-6}$ (группа (М75) и $-(750 \pm 100) \cdot 10^{-6}$ (группа М750); $\operatorname{tg} \delta \leqslant 2 \cdot 10^{-4}$. Конденсаторы выдерживают до 100 перестроек, масса — не более 0,6 г. На частотах до 100—300 МГц можно применять малогабаритные пластинчатые конденсаторы с воз-

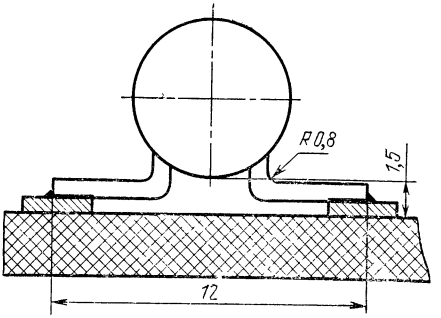



Рис. 4.46

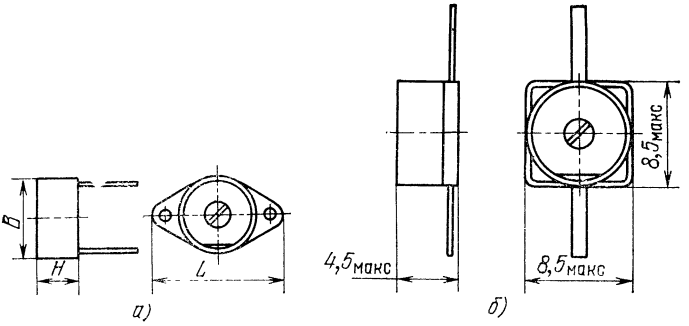



Рис. 4.47

душным диэлектриком типа КПВ-1, обеспечивающие диапазоны изменения емкости 2 ...12 пФ. Однако из-за относительно больших для СВЧ цепей размеров и массы (15—20 г) эти типы конденсаторов используются редко.

Для диапазона СВЧ предназначены конденсаторы КТ4-22, имеющие размеры 8,5 × 8,5 × × 4,5 мм (рис. 4.47, *б*) и перестраиваемые от 0,21 до 2; от 1 до 5; от 2 до 10; от 3 до 15 и от 4 до 20 пФ. Номинальное напряжение конденсаторов 250 В; $\operatorname{tg} \delta \leqslant 20 \cdot 10^{-4}$; ТКЕ — $(75 \pm 75) \cdot 10^{-6}$; масса — не более 0,7 г.

Конденсаторы типа КТ4-27 (рис. 4.48) выдерживают до 50 циклов перестройки, разработаны, в частности, для ИС СВЧ и работают при номинальных напряжениях 25 и 50 В. Габаритные размеры 2,8 × 2,6×1,2 (25 В) и 5×4,7×1,8 мм. (50 В), диапазоны перестройки 0,4 ...2, 1 ...5 (25 В), 1 ...5, 2 ...10, 3 ...15, 4 ...20 пФ (50 В); ТКЕ — $(75 \pm 125) \cdot 10^{-6}$; $\operatorname{tg} \delta = 20 \cdot 10^{-4}$. Масса 0,07 г (25 В) и 0,2 г (50 В).

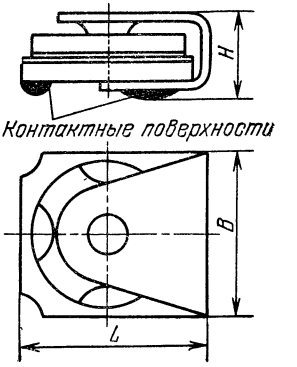



Рис. 4.48

В диапазоне до 5 ГГц находит применение миниатюрный плоский конденсатор (рис. 4.49), обеспечивающий при габаритных размерах 5 × 1 × 0,5 мм перестройку 0,1 ...2,5 пФ. На частоте 1,4 ГГц потери 0,04 дБ.

**Индуктивные элементы.** Несмотря на относительную простоту изготовления пленочных индуктивностей, навесные индуктивные элементы также находят широкое применение в качестве дросселей питания и элементов гибридных схем СВЧ. Навесные бескорпусные печатные катушки индуктивности используют в ГИС на частотах до 200 МГц [4.38]: номиналы 26...230 мкГн; размеры 6 × 6 мм при толщине 0,25 мм; добротность — в пределах 20 — 30; рабочий ток — до 250 мА.

В качестве дросселей до 100 мкГн могут быть использованы индуктивности на тороидальных сердечниках диаметром 2 мм. Разработаны чип-индуктивности, имеющие номиналы 15 ...1000 мкГн при добротности 70 ...80, используемые на

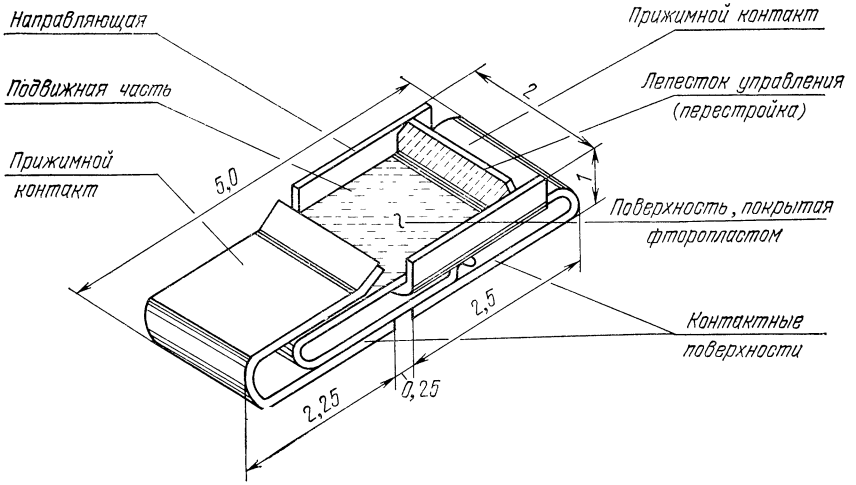



Рис. 4.49

частотах до 300 ...400 МГц. Конструкции, предназначенные для высокочастотных трансформаторов, применяются также и для создания высокочастотных индуктивностей в диапазоне сотен мегагерц: номинал — от единиц до 1000 мкГн. В метровом и дециметровом диапазоне используются высокочастотные дроссели типа ДМ (рис. 4.50, *а*). Паразитные параметры этих дросселей можно компенсировать в узкой полосе частот с помощью коротких индуктивных отрезков (рис. 4.50, *б*). Дроссели (ГИ 0.477.005ТУ) выпускаются трех типоразмеров на 64 номинала. Габаритные размеры типоразмеров: I: $L = 70$ мм; $l = 11{,}5$ мм; $D = 3{,}8$ *мм*; II: $L = 72$ мм; $l = 13{,}5$ мм; $D = 4{,}4$ мм; III: $L = 80$ мм; $l = 21{,}5$ мм; $D = 5{,}1$ мм. По значению рабочего тока различаются семь типов дросселей: на 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 1,2; 2,4; 3 А. В зависимости от типоразмера и рабочего тока устанавливается диапазон номиналов дросселей. Например, дроссели ДМ-0,1 имеют номиналы —40 ... 125 мкГн (типоразмер I), 140 ... 200 мкГн (типоразмер II), 200 ... 500 мкГн (типоразмер III). Точность выполнения номиналов составляет ±5%, добротность 80 ...100. Дроссели типа ДМ работают при температуре —60 ...155° С при относительной влажности 98% (40° С), выдерживают вибрации в диапазоне 5 ...2500 Гц (ускорение 20 *g*). На параметры НПЛ дроссели оказывают минимальное влияние при включении их над платой перпендикулярно оси полоски (рис. 4.50, *в*) в области малой концентрации электромагнитного поля. Однако технологически подобное включение трудно осуществить с достаточной надежностью в тех случаях, когда вывод дросселя необходимо паять к полоске НПЛ. Существует ряд конструкций дросселей, использующих прижимной контакт одного из выводов дросселя к полоске (сверху); подобные конструкции мо-

гут быть использованы в сантиметровом диапазоне (рис. 4.50, *г*: *1* — прижимной контакт; *2* — вывод дросселя; *3* — диэлектрический сердечник; *4* — полоска).

**Навесные диоды и транзисторы.** Большинство диодов и транзисторов выпускается в конструктивном исполнении, специально приспособленном для установки в полосковые схемы: используются плоские выводы, расположенные в одной плоскости и плотно прилегающие после установки к контактным площадкам схем. Находят некоторое применение и приборы, предназначенные для коаксиальных и других конструкций. В миниатюрных схемах, особенно сантиметрового и миллиметрового диапазонов, широко используются бескорпусные приборы, представляющие собой полупроводниковые структуры (иногда укрепленные на керамическом основании), которые не имеют защитных корпусов, что позволяет уменьшить размеры этих элементов и их выводов. Применение бескорпусных

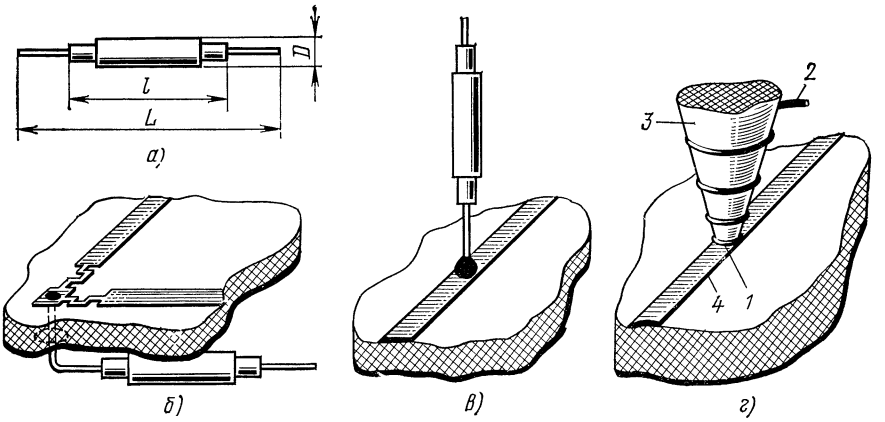



Рис. 4.50

приборов предъявляет повышенные требования к конструкции полоскового узла, требуя обеспечения герметичности всего устройства. В ТУ на бескорпусные и некоторые элементы в миниатюрных корпусах имеется ограничение на применение, формулируемое обычно следующим образом: «...предназначен для использования в герметизированных устройствах (объемах)».

Одна из особенностей применения навесных полупроводниковых приборов — необходимость в целом ряде случаев создавать в подложках полосковых схем отверстия различных размеров и конфигураций, что усложняет конструкцию схемы и ее изготовление. Другая особенность, связанная с мощными приборами,— необходимость в специальной конструкции корпуса с радиатором, системой охлаждения, чтобы разместить прибор и обеспечить отвод тепла от него.

Основные конструкции корпусов диодов приведены на рис. 4.51: *а*—диоды в керамических или стеклянных корпусах с выводами (плоскими или круглыми); *б* — малокорпусные конструкции; *в* — бескорпусные чип-структуры и близкие к ним по конструкции; *г* — диоды коаксиальной конструкции. Типы *а*, *б*, *г* в большинстве случаев требуют создания в плате специальных отверстий для их размещения, тип *в* устанавливается на поверхности подложки. На рис. 4.51 показаны также способы крепления диодов к контактным площадкам и наиболее распространенная конфигурация этих площадок. В диодах с плоскими и круглыми выводами применяется формовка выводов, что позволяет во многих случаях размещать их на плате, не создавая отверстий или углублений под эти приборы. Наиболее распространенный способ крепления диодов к контактным площадкам— пайка припоями: ПОСК 50-18 (для приборов в корпусах с плоскими и круглыми выводами), ПСр3И (для миниатюрных диодов, которые недопустимо перегревать), ПОИ-50 (для миниатюрных и бескорпусных приборов, которые в про-

цессе эксплуатации не нагреваются выше 85° С). Круглые выводы малого диаметра (до 100 мкм) и плоские малой толщины могут привариваться к контактным площадкам обычными способами микросварки (термокомпрессия, ультразвуковая сварка и т. п.). Для увеличения механической устойчивости схемы диоды закрепляются на плате с помощью клея.

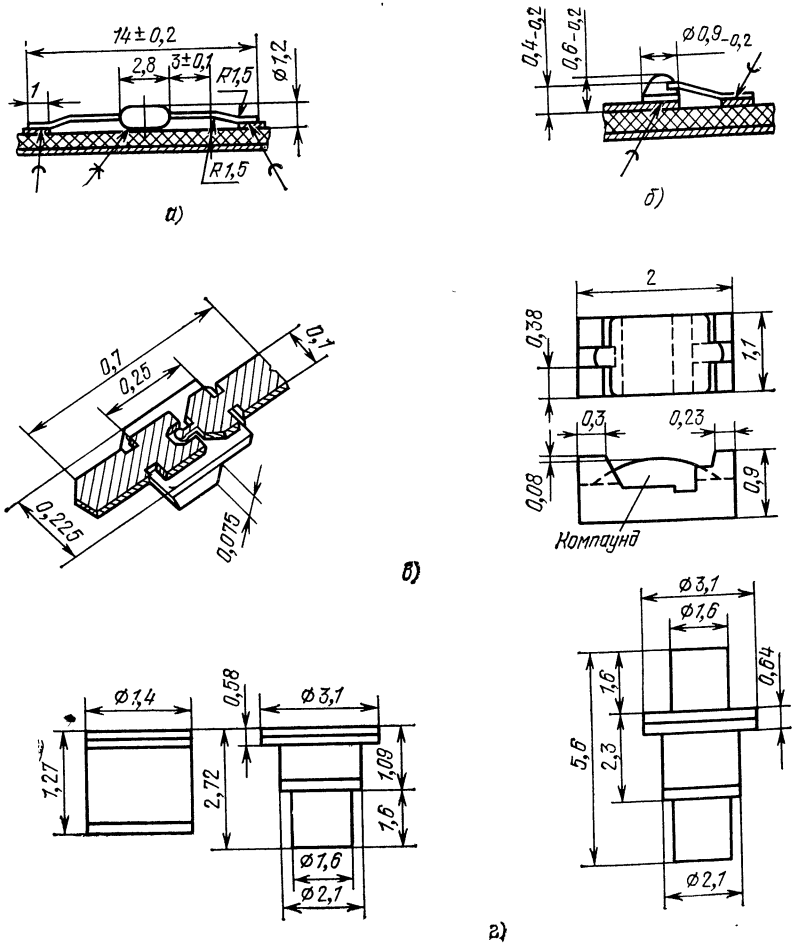



Рис. 4.51

Основные конструкции транзисторов представлены на рис. 4.52: *а* — в металлостеклянных корпусах (ГТ 329, ГТ 376); *б* — в керамических корпусах (КТ371, КТ382, ГТ387А и КТ372); *в* — в миниатюрных керамических корпусах (малокорпусные) и бескорпусные (ГТ 374; КТ607; КТ354); *е* — предназначенные для усиления мощности, имеющие достаточно большие габаритные размеры. Все типы транзисторов, кроме малокорпусных и бескорпусных, требуют, как правило, создания к плате специальных отверстий для их установки и крепления. В ряде случаев применяется формовка выводов транзисторов, что упрощает установку этих приборов на платы. Наиболее распространенный способ крепления транзисторов к контактным площадкам — пайка. Иногда при установке малокорпусных или бескорпусных приборов используется микросварка. Для увеличения

механической прочности конструкции транзисторы закрепляются на плате с помощью клея.

Транзисторы в металлостеклянных корпусах используются в основном в схемах на СПЛ и НПЛ с подложками из органических диэлектриков. В ГИС СВЧ на подложках из неорганических диэлектриков они применяются редко, так как их габаритные размеры не удовлетворяют требованиям миниатюризации. Кроме того, наличие протяженных выводов со значительной паразитной индуктивностью не позволяет эффективно использовать их на частотах выше 1,5—2 ГГц.

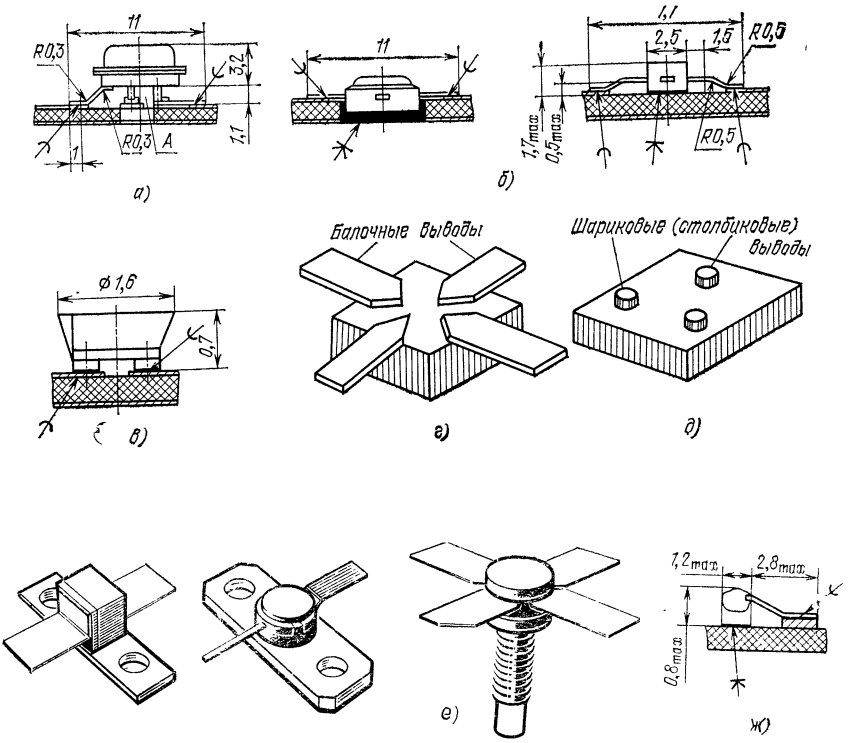



Рис. 4.52

Конструкции, имеющие «полосковые» выводы (рис. 4.52, *б*), хорошо сопрягаются с полосковыми проводниками, являясь отрезками этих линий. Наиболее эффективными в сантиметровом диапазоне оказываются приборы в миниатюрных корпусах и бескорпусные приборы, где паразитные емкости и индуктивности корпусов и выводов минимальны. В гибридных конструкциях транзисторных усилителей используются транзисторы типов: «безвыводный перевернутый» (рис. 4.52, *в*, ГТ 374); с балочными выводами (рис. 4.52, *г*); с шариковыми выводами (рис. 4.52, *д*); с проволочными выводами (рис. 4.52, *ж*). Все эти конструкции требуют эксплуатации в герметизированных объемах.

Особую группу составляют транзисторы, предназначенные для работы на повышенной мощности. Для теплоотвода используются массивные основания из материалов с высокой теплопроводностью, на которых располагается полупроводниковый элемент, в конструкции вводится «болт», на который устанавливается радиатор, и т. п. (рис. 4.52, *е*).

## 4.3. КОРПУСА

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОРПУСОВ

Корпус полосковой схемы обеспечивает: жесткое закрепление платы и соединение ее выводов с переходами, предназначенными для связи с внешними цепями; защиту платы и ее элементов от внешних климатических, механических и других воздействий (корпус должен быть при необходимости герметичным); экранировку схемы от внешних электромагнитных излучений (наводок) и подавление излучения во внешнюю среду; теплоотвод от участков схемы, в которых рассеивается электромагнитная энергия. Кроме того, корпус должен быть технологичным, экономически выгодным, обеспечивать возможность сборки схемы, контроль, подстройку, ремонт и т. д.

Максимальные размеры корпуса ограничены возможностью возбуждения колебаний в прямоугольном резонаторе, которым в большинстве случаев является внутренняя полость корпуса (см. § 3.4). Амплитуда паразитных колебаний пренебрежимо мала, и их влиянием на характеристики полосковой схемы можно пренебречь, если высота экрана $B$ (рис. 3.11) не больше $\Lambda/2$ ($\Lambda \approx \approx \lambda/\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{рез})^2}$, $\lambda_{рез}$ описывается выражением (3.55)), а размеры экрана $A$ и $B$ таковы, что удовлетворяется неравенство $\lambda > \lambda_{рез}$ во всей рабочей полосе полосковой схемы.

Разработаны разнообразные типы корпусов для полосковых схем, которые делятся на два класса: герметизированные и негерметизированные. В табл. 4.14 представлены основные материалы, используемые для корпусов, и указаны технологические процессы их изготовления. В табл. 4.15 содержатся данные о плотности и КТЛР (в диапазоне 20 ...200° С) материалов корпусов. По типу конструкции корпуса подразделяются на коробчатые, рамочные, пенальные, пластинчатые, составные, испытательные и др.

Таблица 4.14

**Материалы и способы изготовления корпусов**

| Вид корпуса | Способ изготовления | Материал |
|---|---|---|
| Рамочный | Сборка (пайка)<br>Штамповка<br>Прессование<br>Фрезерование | Латунь, медь<br>Латунь, титан, ковар<br>АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, ДСВ-4Р-2М, керамика<br>Латунь, титан, алюминий |
| Коробчатый (чашечный) | Литье<br>Штамповка<br>Фрезерование | Латунь, алюминий<br>Титан, латунь, алюминий<br>Латунь, медь, алюминий, титан |
| Пенальный | Сборка (пайка)<br>Штамповка<br>Фрезерование | Алюминий, латунь, медь (волновод)<br>Ковар, титан, алюминий<br>Латунь, алюминий |
| Пластинчатый | Литье<br>Штамповка<br>Прессование<br>Фрезерование | Латунь, алюминий<br>Латунь, алюминий<br>АГ-4В, ДСВ-2Р-2М, ДСВ-4Р-2М<br>Латунь, алюминий |

Таблица 4.15

**Свойства материалов корпусов**

| Материал (ГОСТ) | Плотность, г/см³ | КТЛР·10⁶, 1/°С (при 0°С) |
|---|---|---|
| Титановый сплав ВТ1-0 (ГОСТ 1980—74) | 4,52 | 8,2 |
| Титановый сплав ВТ5-1 (ГОСТ 19807—74) | 4,42 | 8,3...8,9 |
| Алюминиевый сплав В-95 (ГОСТ 4784—74) | 2,85 | 24 |
| Алюминиевый сплав Д-16 (ГОСТ 4784—74) | 2,78 | 22 |
| Алюминиевый сплав Ал-9 (ГОСТ 2685—63) | 2,66 | 23...24,5 |
| Алюминиевый сплав Ал-2 (ГОСТ 2685—63) | 2,65 | 21,1...23,3 |
| Медь М1 | 8,94 | 16,6...17,1 |
| Сплав 29НК (ковар) (ГОСТ 10994—74) | 8,2 | 4...5,2 |
| Латунь Л-63 (ГОСТ 15527—70) | 8,43 | 20,6 |
| Пресс-материал АГ-4В (ГОСТ 10087—75) | 1,7...1,9 | 5...8,5 |
| Пресс-материал АГ-4С | 1,7...1,9 | 2...3 |
| Пресс-материал ДСВ-2Р-2М | 1,7...1,85 | 9...12 |
| Пресс-материал ДСВ-4Р-2М (ГОСТ 17478—72) | 1,7...1,85 | 4...12 |

## ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОРПУСОВ

**Коробчатые (чашечные) корпуса.** Общий вид корпуса изображен на рис. 4.53, где *1* — корпус, *2* — переход высокочастотный, *3* — плата, *4* — резиновая прокладка, *5* — крышка, *6* — трубка (для заполнения инертным газом), *7* — низкочастотный вывод, *8* — проволока. Корпус часто используется в экспериментальных устройствах, так как его легко изготовить фрезерованием, а наличие боковых стенок позволяет располагать на них коаксиальные переходы фланцевой и соосной конструкций. При серийном изготовлении можно использовать литье, штамповку, прессование из пластмассы и металлизацию гальванопластическим или химико-гальваническим способом. Плата в корпусе крепится либо механическим прижимом ее ко дну корпуса с помощью винтов или других элементов (например, верхней крышки при сборке конструкции на СПЛ), либо припайкой металлизированной экранированной стороны платы к дну корпуса (не-

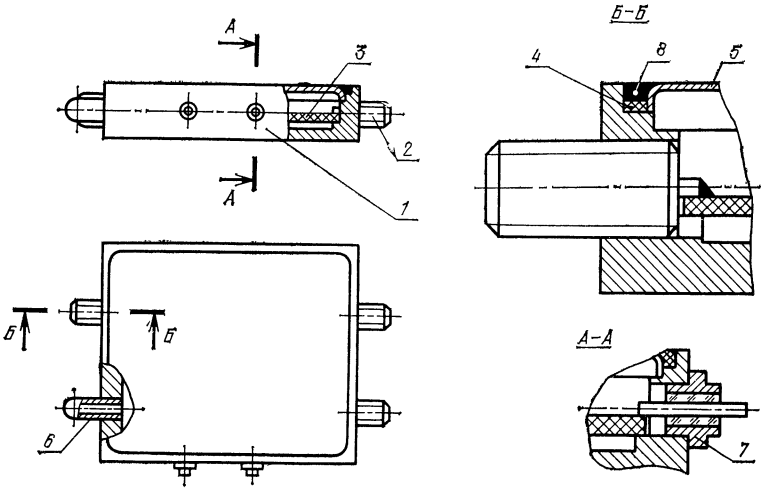



Рис. 4.53

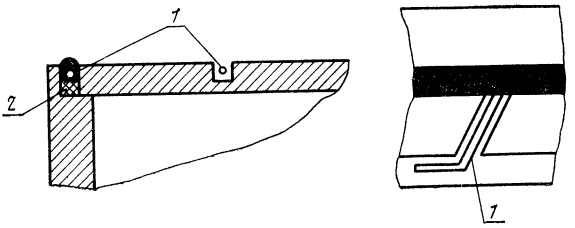



Рис. 4.54

посредственно или через компенсирующие прокладки из металлической сетки, чтобы снизить напряжения, возникающие из-за разности КТЛР).

Герметизация корпуса производится пайкой по контуру крышки и переходов, заливкой щелей компаундами. При использовании пайки (рис. 4.54) предпочтительно выполнять шов с закладкой проволоки (*1*), что обеспечивает возможность вскрытия корпуса при ремонте, и использовать резиновую прокладку (*2*), препятствующую попаданию припоя и флюса внутрь корпуса.

Недостатки корпуса: сложность размещения навесных компонентов на экранной стороне платы, сложность припайки платы ко дну корпуса и соответственно смены платы при ремонте.

**Рамочные корпуса.** Эти корпуса (рис. 4.55) в основном используются в узлах на НПЛ, СПЛ с воздушным заполнением, копланарных и щелевых линиях. Конструкция позволяет осуществить одно- (рис. 4.55, *а*) и двухъярусное расположение плат. На стенках корпуса удобно располагать фланцевые и вставные коаксиальные переходы, обозначения на рис. 4.55, *а*: *1* — корпус, *2* — переход высокочастотный, *3* — плата, *4* — резиновая прокладка, *5* — крышка, *6* — трубка, *7* — проволока (для вскрытия блока), *8* — низкочастотный ввод. Корпуса удобны для серийного изготовления, так как при их производстве можно применять высокопроизводительные методы: литье, штамповку, прессовку из пластмассы.

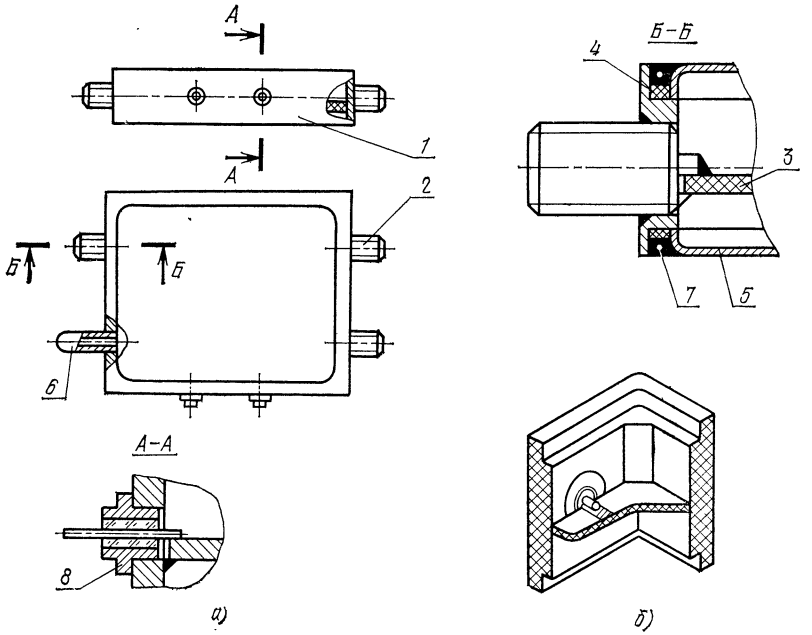



Рис. 4.55

Крепление платы в корпусе проводится установкой ее на уступы вдоль стенок или выступы в углах рамки (рис. 4.55, *б*) с последующей пайкой по периметру платы. Иногда плата устанавливается на одну из крышек (пьедестал), а затем собирается вся конструкция [4.40]. В этом случае на рамке закрепляют СВЧ соединители. Рамочные корпуса герметизируются аналогично коробчатым, т. е. сваркой или пайкой швов в местах соединения крышек и СВЧ переходов с рамкой. Используются также герметизирующие (уплотнительные) прокладки из мягкого металла, проводящей резины или установка крышек на эпоксидные компаунды.

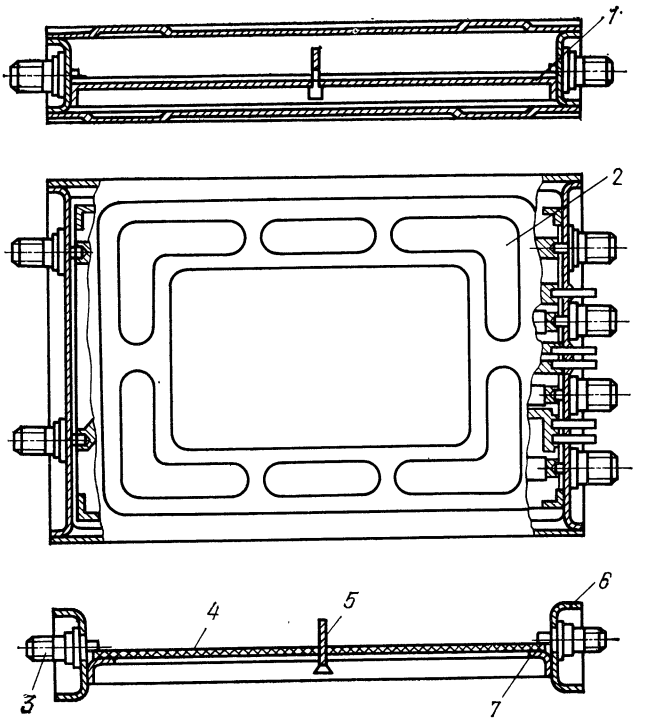



**Рис. 4.56**

Достоинство корпусов — в их технологичности и дешевизне, простоте сборки, удобстве расположения навесных компонентов с обеих сторон платы, относительной легкости смены платы при ремонтных работах. Особенно выделяются простотой установки и смены плат корпуса из металлизированной пластмассы [4.41]. В схемах на НПЛ можно производить подстройку и проверку до окончательной установки крышек. К недостаткам следует отнести довольно большую (по сравнению с другими типами) протяженность швов, которые необходимо герметизировать.

**Пенальные корпуса.** Конструкция корпуса изображена на рис. 4.56, где *1* — основание корпуса, *2* — пенал, *3* — переход высокочастотный, *4* — плата, *5* — экран, *6* — стенка основания, *7* — поддон. Конструкция позволяет осуществить одно- и двухъярусное расположение плат. Плата предварительно устанавливается на специальное основание, а затем вдвигается в пенал (кожух). Основание крепится к пеналу пайкой, сваркой или механически (на винтах). СВЧ переходы устанавливаются на основание в процессе сборки. Корпуса удобны для серийного производства (табл. 4.15), в качестве пенала могут быть использованы стандартные волноводные трубы (например, сечения 23 × 10, 48 × 24,

72 × 34 мм и т. д.). Плата крепится к основанию пайкой ее по всей плоскости или по периметру в зависимости от конструкции основания. Герметизация корпуса осуществляется сваркой или пайкой швов в местах соединения пенала и основания и в местах установки переходов.

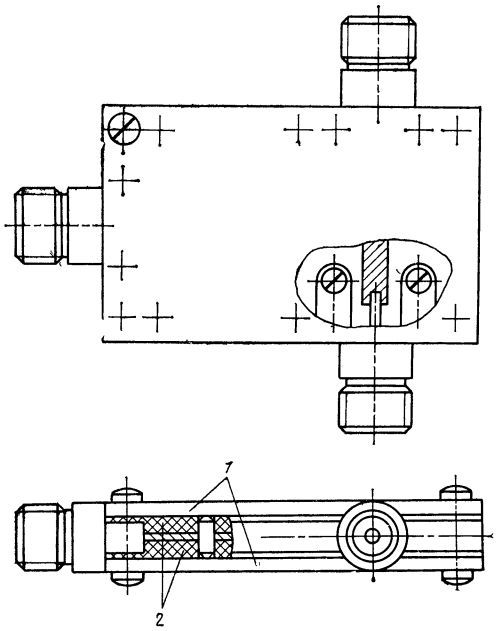



Рис. 4.57

Достоинства корпусов: возможность предварительного контроля и подстройки схем на НПЛ перед установкой в пенал, уменьшенная длина шва, который необходимо герметизировать. Недостатки: возможность расположения СВЧ переходов только на двух станках корпуса, сложность ремонтных работ, для проведения которых требуются разгерметизация шва и полная разборка корпуса.

**Пластинчатые корпуса.** Конструкция корпуса изображена на рис. 4.57. Эти корпуса используются в устройствах на СПЛ. Существует несколько вариантов конструкции данного корпуса, отличающихся в основном материалами, используемыми для создания пластин (обкладок). Между обкладками корпуса (*1*) располагаются диэлектрические пластины (*2*), образующие СПЛ; в линии с воздушным диэлектриком (или в высокодобротной линии) обкладки корпуса являются заземленными

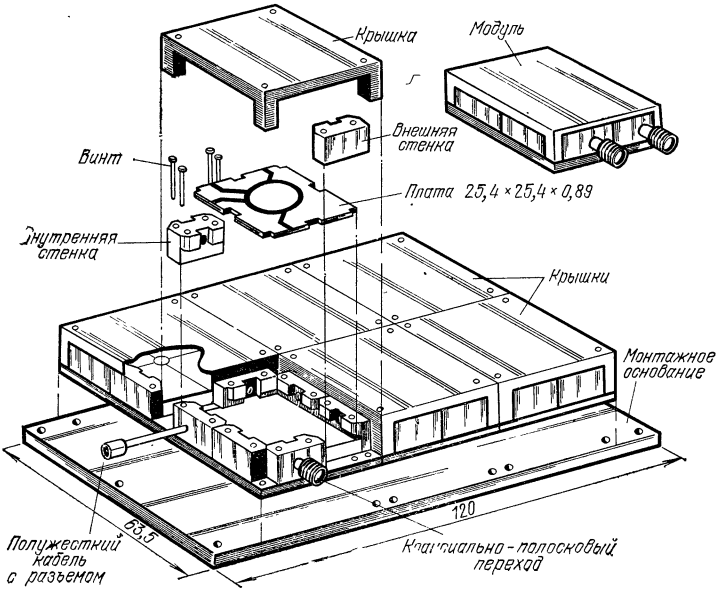



Рис. 4.58

поверхностями линии передачи. Наружные обкладки могут выполняться из металла или металлизированного диэлектрика (пресс-материал, компаунд). Конструкция (форма сечения) наружных обкладок определяется способом сборки узла, требованиями к массе и механической прочности. При необходимости устройство в пластинчатом корпусе можно разместить в кожухе для создания дополнительной защиты от внешних воздействий. Плата в корпусе крепится механическим прижимом по плоскости ее экранной стороны. Герметизация обеспечивается заливкой компаундами.

Достоинство пластинчатых корпусов — в их конструктивной простоте, что упрощает их серийный выпуск и облегчает сборку и ремонт. Эта конструкция более предпочтительна для негерметизированных узлов. Недостатки: относительная сложность герметизации корпуса, зависимость параметров узла от равномерности прижима плат друг к другу, т. е. от качества механической сборки.

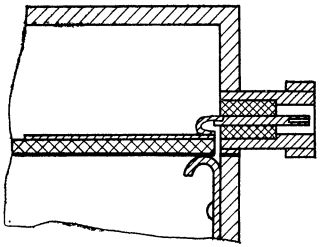
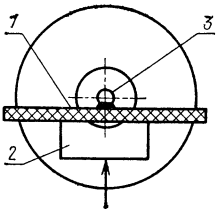


Рис. 4.59



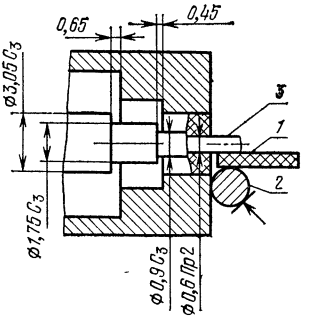




Рис. 4.60

**Испытательные корпуса.** Корпуса, предназначенные для быстрой сборки широкого класса экспериментальных устройств, применяются обычно при разработке и создании схем на НПЛ. Корпус фирмы «Western Microwave» (рис. 4.58) позволяет собрать сложное СВЧ устройство на нескольких подложках, используя различные типы соединителей и кабельных выводов. Недостаток такого устройства — специальная форма подложки (с пазами для крепежа). В производственных условиях при проверке больших партий плат до их установки в корпусе могут быть использованы испытательные корпуса, позволяющие проводить проверку и отбраковку плат, не повреждая их (без пайки СВЧ выводов и экранной стороны). На рис. 4.59 показан корпус для измерений в диапазоне до 500 МГц. Соединение с СВЧ выводами обеспечивается с помощью пружинного контакта, соединение экранной стороны платы с корпусом осуществляется пружинными контактами по всему периметру платы. На рис. 4.60 представлен корпус для проверки плат в диапазоне до 10 ГГц [4.42]; $K_{стV}$ коаксиально-полоскового перехода в этом устройстве — менее 1,08; прижим платы (*1*) к СВЧ вводу (*3*) и контакт с землей обеспечивается подвижным роликом (*2*).

## 4.4. КОАКСИАЛЬНО-ПОЛОСКОВЫЕ СОЕДИНИТЕЛИ (ПЕРЕХОДЫ)

Соединение коаксиального тракта с полосковой схемой можно выполнить двумя способами: с помощью непосредственного соединения жилы коаксиального кабеля с полосковым проводником (прямой кабельный ввод) или через коаксиально-полосковый переход, представляющий собой элемент, имеющий коаксиальную часть, которая соединяется с наружными цепями, и переходную секцию для соединения с полосковой линией.

**Прямой кабельный ввод** (рис. 4.61, *а*). Применяется как в СПЛ, так и в НПЛ и чаще всего используется в экспериментальных конструкциях. Это объясняется тем, что при изгибах наружной части кабеля усилие, прикладываемое к центральной жиле, передается на место пайки жилы кабеля к полоске (контактной

площадке), что создает опасность отрыва жилы кабеля. Поэтому подобную конструкцию нельзя рекомендовать для узлов, подвергаемых значительным механическим нагрузкам.

Заливка места пайки (рис. 4.61, *б*) компаундом, например при герметизации ввода или для закрепления соединения, позволяет несколько повысить механическую устойчивость такого ввода, однако и это решение нельзя признать удачным. Соединение жилы с полоской можно осуществить как для гибких кабелей (РК-50-4-11, РК-50-2-11, РК-50-2-21 и т. п.), так и для полужестких (РК-50-2-25,

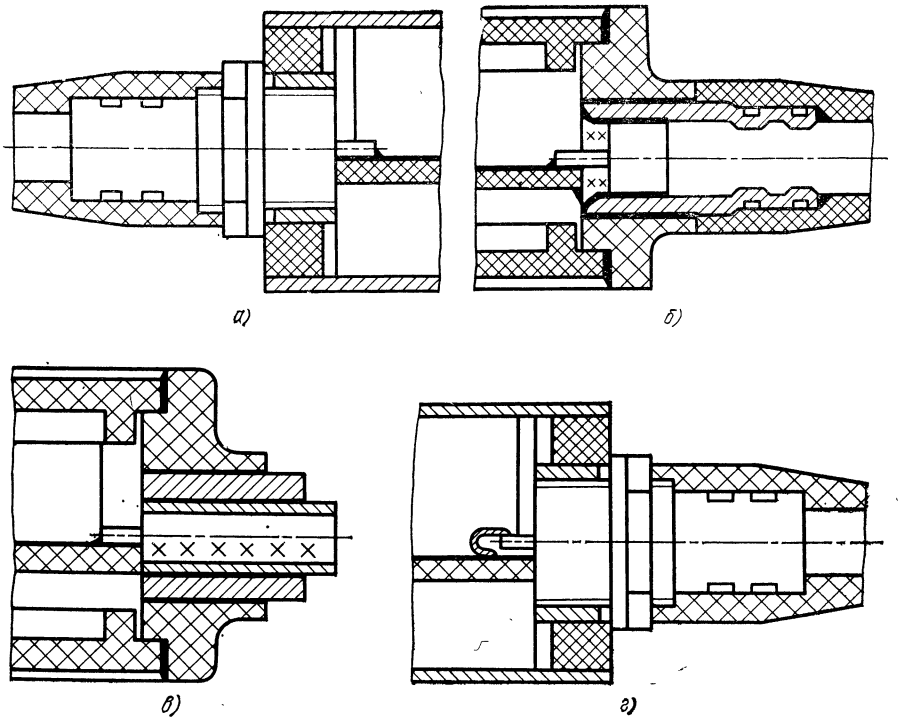



Рис. 4.61

РК-50-1,5-25 и т. п.). Полужесткий кабель позволяет осуществить прямой ввод (рис. 4.61, *в*) более надежно, чем гибкий, тем не менее при эксплуатации и монтаже узлов с подобными вводами необходимо соблюдать осторожность при транспортировке, предусматривая специальную тару, где располагается узел с кабелем. Недопустима скрутка кабеля, требуется тщательное соблюдение правил изгиба полужесткого кабеля. Механическую устойчивость кабельного ввода значительно повышает использование гибкой перемычки из фольги, которая устанавливается между центральной жилой и контактной площадкой (рис. 4.61, *г*). Такая перемычка может эффективно использоваться до частот 300 ...600 МГц без заметного ухудшения согласования. Удовлетворительное согласование сохраняется до частот порядка 1 ГГц ($K_{\text{ст}V} \approx 1{,}15 \ldots 1{,}2$); на более высоких частотах согласование заметно ухудшается.

Основные рекомендованные присоединительные размеры трактов различных сечений установлены ГОСТ 13317—73. Соединители радиочастотные радиоизмерительные. Присоединительные размеры и ГОСТ 20265—74. Соединители радиочастотные общего применения. Присоединительные размеры.

Из всего многообразия существующих соединителей можно выделить два типа, получившие распространение за рубежом и все шире применяемые в отечест-

венной аппаратуре: соединители типа *N* (США) и «Экспертиза» (СССР) для канала 7/3 мм (сечение коаксиала) и соединители типа OSM/SMA (США) и «Град» (СССР) для канала 3,5/1,5 мм (4,15/1,3 мм для канала с диэлектриком типа «Фторопласт-4»). Данные соединители по своему сечению наилучшим образом подходят для малогабаритных и миниатюрных полосковых узлов. В сверхминиатюрных узлах используют соединители для канала 1,75/0,75 мм типа OSSM (США). В прецизионных узлах для канала 7/3 мм находят применение униполярные соединители повышенной точности изготовления (типа APC-7, APC-7S (США)).

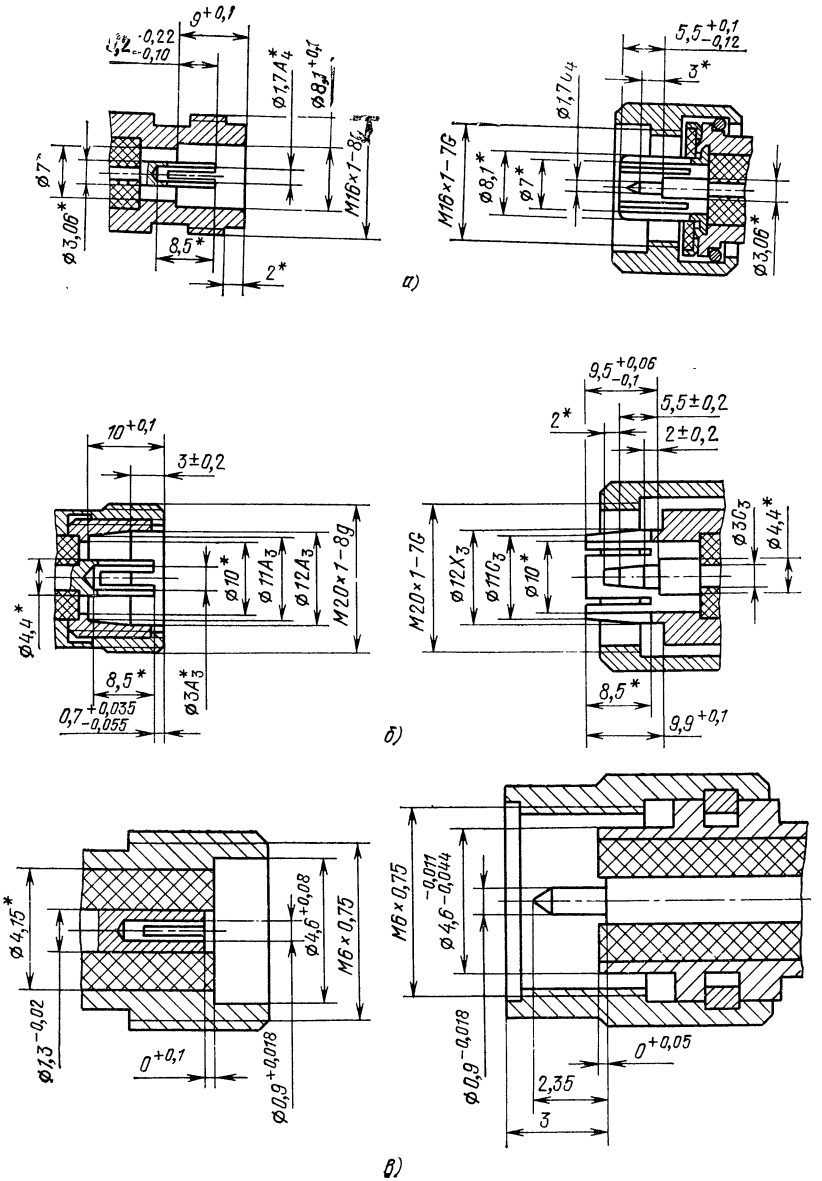



Рис. 4.62

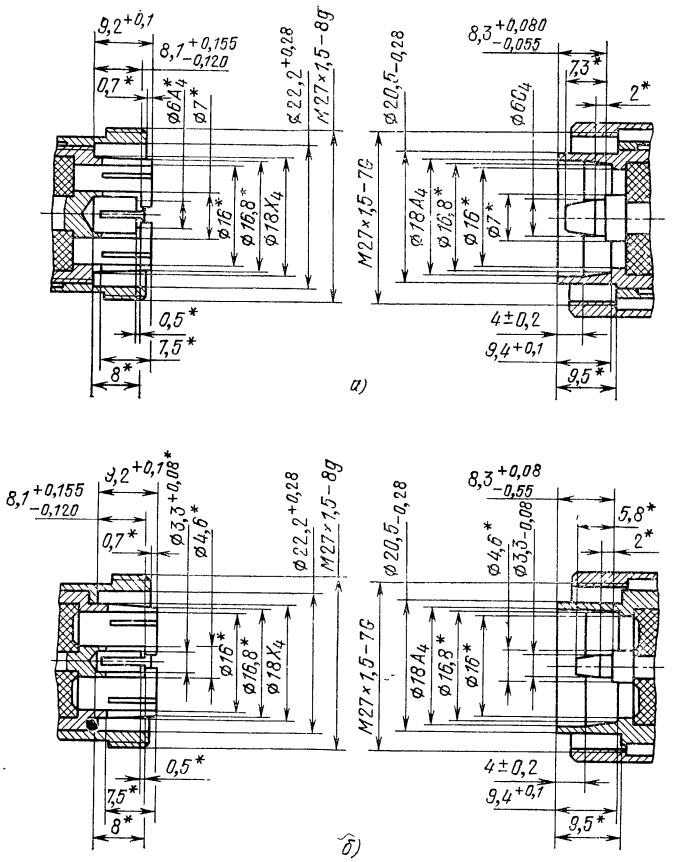



Рис. 4.63

На рис. 4.62 указаны присоединительные размеры соединителей каналов 7/3 мм (*а*), 10/4,34 мм (*б*), 3,5/1,5 мм (*в*). На рис. 4.63, *а* и *б* изображено сечение коаксиальных соединителей соответственно для каналов 16/7 мм ($Z_в$ = 50 Ом) и 16/4,6 мм ($Z_в$ = 75 Ом[1]). Необходимо всячески ограничивать номенклатуру используемых соединителей (число присоединительных рядов). Введение соединителя с новым присоединительным размером приводит к необходимости создания всей гаммы соответствующих коаксиальных элементов, число которых может составлять 16—20 типов и более.

**Коаксиально-полосковые переходы (КПП).** Это наиболее распространенный элемент соединения коаксиала с полоской, позволяющей добиться хороших электрических параметров и удовлетворительных конструктивных и эксплуатационных характеристик. Требования к КПП: малый уровень отражений и потерь в широкой полосе частот, небольшие размеры, удобство сборки, установки в узел и соединения с полосковой линией, механическая прочность и число сочленений, которые выдерживает переход при эксплуатации; в интегральных узлах желательна герметичность конструкции.

[1]Соединители канала 10/4,4 мм иногда называют «Пихта», соединители канала 16 мм — РД.

Конструкции КПП делятся на два основных класса по виду взаимного расположения оси коаксиала и полоски: соосные (аксиальные) и перпендикулярные. Кроме того, они классифицируются по виду полосковой линии, с которой соединяется коаксиал: симметричной (воздушной, высокодобротной, заполненной диэлектриком), несимметричной, щелевой, копланарной и др. По типу переходного участка различают КПП без изменения сечения коаксиала, со ступенчатым изменением сечения, с плавным изменением сечения и др., а по конструкции соединения с полосковой линией — переходы с полосковым выводом, круглым выводом, являющимся продолжением центральной жилы коаксиала, игольчатым и т. д. Переход присоединяется к полоске пайкой, сваркой, механическим прижимом. К полосковому узлу КПП крепится с помощью фланца, крепежной части в виде «сухаря», цилиндрической конструкции под впаивание и т. п.

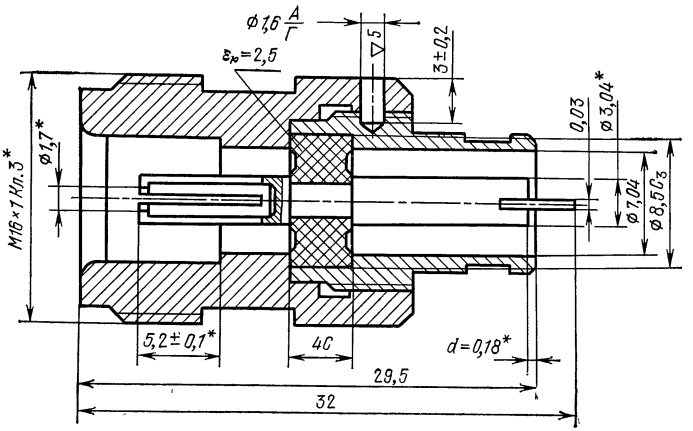



Рис. 4.64

Возникновение отражений электромагнитной энергии в КПП связано с наличием в нем ряда неоднородностей: опорной диэлектрической шайбы, скачкообразного изменения размеров сечения коаксиала, емкости, обусловленной искажениями структуры поля в месте сочленения коаксиальной и полосковой линий, и др. Емкость компенсируется с помощью дополнительной индуктивности, образующейся, например, за счет плоскости раздела диэлектрик — воздух на расстояние $d$ (рис. 4.64), которое зависит от диаметра коаксиала, высоты полосковой линии и материала диэлектрической подложки [4.33].

Изображенный на рис. 4.64 КПП предназначен для использования в НПЛ на подложке из диэлектрика с $\varepsilon_r \approx 10$ ($h = 0{,}5$; 1 мм). Более сложная конструкция (рис. 4.65) перехода (двухшайбового), которую можно использовать как в СПЛ, так и в НПЛ, обеспечивает удовлетворительное согласование до 6 ...8 ГГц ($K_{\text{ст}V}$ пары переходов ниже 1,35). При изготовлении данных типов переходов следует соблюдать высокие механические допуски; при ухудшении качества деталей и сборки существенно ухудшаются электрические характеристики КПП, особенно на частотах выше 1 ГГц. Простые конструкции переходов, приведенные на рис. 4.66, где емкостная неоднородность торцевого соединения внутренних проводников скомпенсирована смещением его от плоскости соединения внешних проводников, имеют $K_{\text{ст}V}$ не выше 1,05 в диапазоне 3,0 ...11 ГГц [4.33]. На рис. 4.66, *а* изображен переход на симметричную линию с воздушным заполнением; на рис. 4.66, *б* — переход на высокодобротную линию, диэлектрик — «рексолит 2200» ($\varepsilon_r = 2{,}62$) или «рексолит 1433» ($\varepsilon_r = 2{,}53$).

С миниатюрными конструкциями микросборок СВЧ удобней использовать малогабаритные КПП для каналов 3,5 и 1,7 мм, диаметр сечения которых достаточно близок к толщине подложек, что уменьшает неоднородность в месте соединения коаксиала и полоски. На рис. 4.67 изображены конструкция КПП (OSM-244-4ASP) [4.45] и его эквивалентная электрическая схема в диапазоне

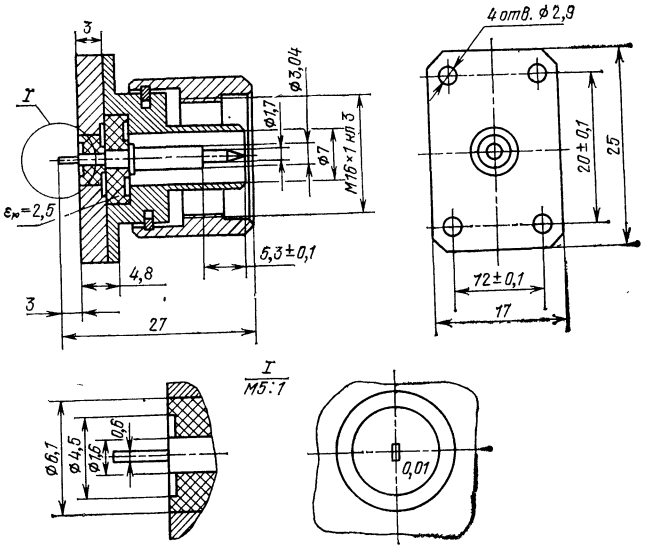



Рис. 4.65

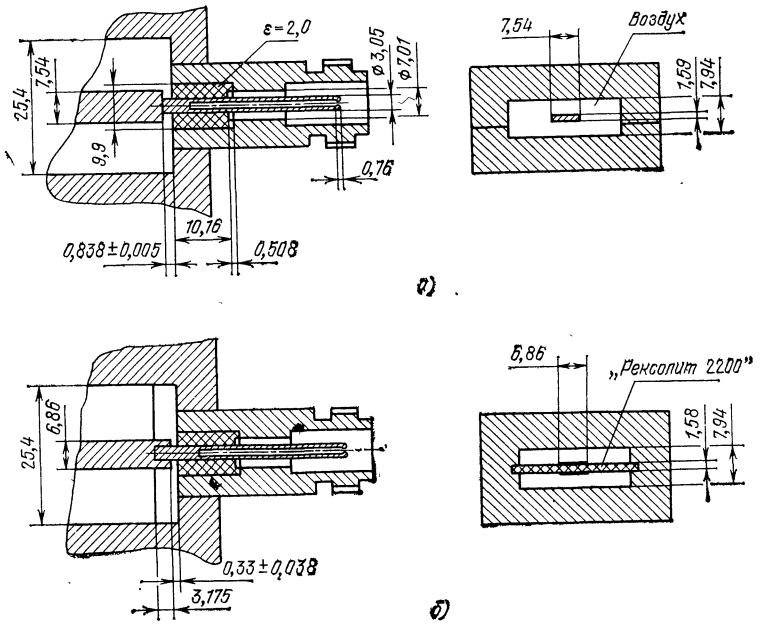



Рис. 4.66

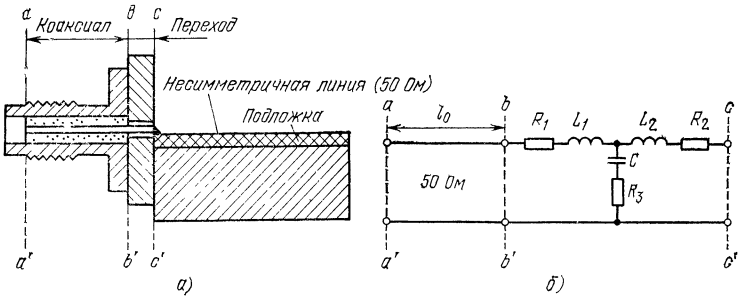



Рис. 4.67

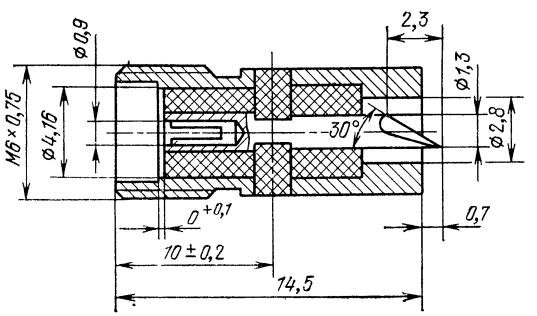



Рис. 4.68

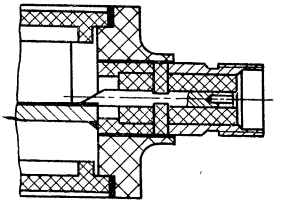


Рис. 4.69

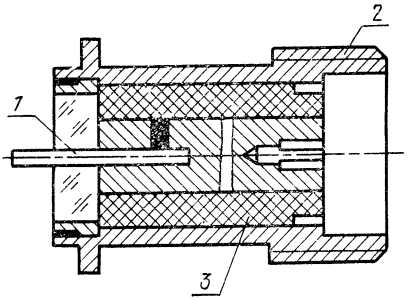



Рис. 4.70

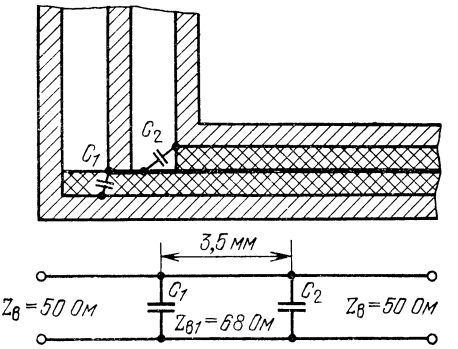



Рис. 4.71

8 ...12 ГГц. В этом диапазоне $C$ = 0,15 пФ; $L_1$ = 0,28 нГн; $L_2$ = 0,21 нГн; сопротивления, характеризующие наличие потерь на излучение; $R_1$ = 0,8 Ом; $R_2$ = = 2,04 Ом; $R_3$ = 2,23 Ом ($K_{стV}$ перехода до 4 ГГц не выше 1,1); подложка с параметрами $\varepsilon_r$ = 9,7; толщина 0,635 или 1,27 мм. Похожий по конструкции переход (рис. 4.68) с игольчатым выводом к полоске [4.46] обеспечивает $K_{стV}$ ниже 1,2 в диапазоне до 10 ГГц и предназначен для впаивания в корпус при пайке центральной жилы к полоске (рис. 4.69). На рис. 4.70 приведена конструкция герметичного перехода, где *1* — металлостеклянная герметичная вставка, *2* — корпус, впаиваемый в корпус узла, *3* — диэлектрический изолятор.

Перпендикулярные КПП в СПЛ и НПЛ применяются реже, чем соосные, На рис. 4.71 изображены перпендикулярный переход на СПЛ и его эквивалентная схема ($K_{\text{ст}V} < 1{,}4$ в диапазоне до 7 ГГц).

В конструировании КПП преобладает тенденция создавать широкополосные переходы универсального назначения. Однако в последнее время появились конструкции, в которых осуществляется подстройка перехода для улучшения его характеристик в пределах частотного диапазона конкретного узла.

## 4.5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛОСКОВЫХ ПЛАТ

### КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ДЕФЕКТОВ

Электрические характеристики реальных полосковых устройств (особенно в больших партиях) отличаются от расчетных в основном из-за наличия факторов, которые оказывают дестабилизирующее влияние на электрические параметры. К ним прежде всего следует отнести производственный процесс, во время которого из-за нестабильности принятой технологии изготовления появляются отклонения в форме сечения, края, толщины и т. п. полоски от ее идеальной формы, могут изменяться проводимость металла, характеристики подложки под воздействием температуры, химических веществ и т. п. Другой вид отклонений — конструкционные, связанные как с разбросами параметров исходных материалов (например, с разбросом $\varepsilon_r$ поступающих подложек), так и с особенностями конструкции, определяемыми выбором технологии (многослойность проводника, ад-

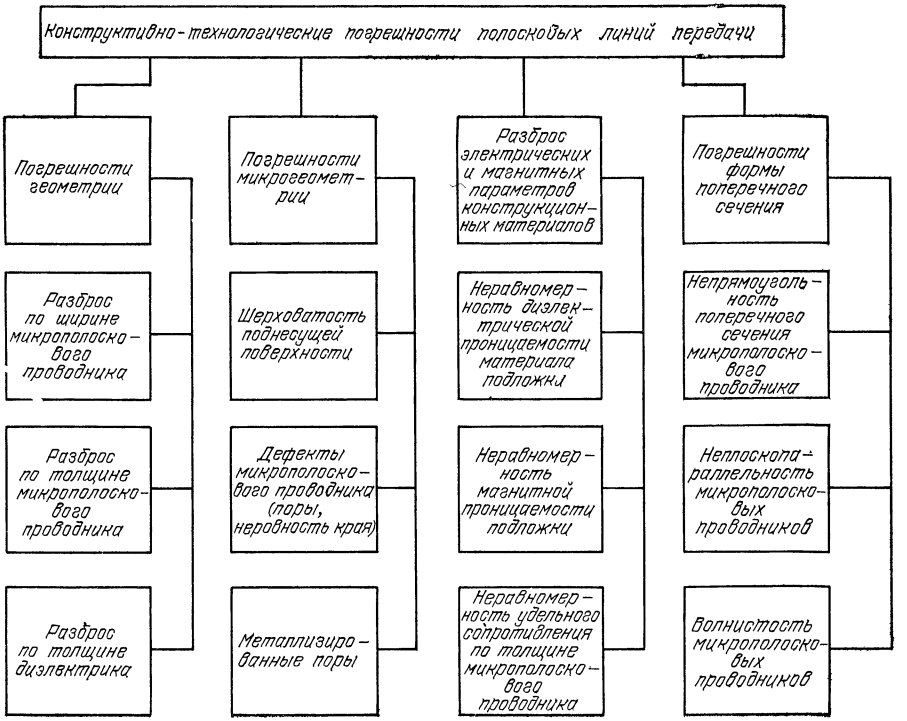



Рис. 4.72

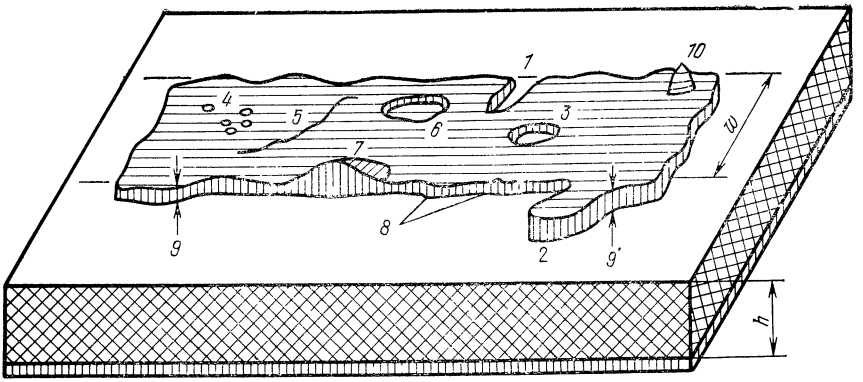



Рис. 4.73

гезионный подслой и т. д.). Конструктивное оформление устройства и условия эксплуатации (воздействие давления, влажности, механические) также вызывают отклонения характеристик реальных устройств от расчетных. На рис. 4.72 приведена классификация основных конструктивно-технологических погрешностей полосковых линий, предложенная И. П. Бушминским [4.12]. В узлах, где используются навесные компоненты или формируются резисторы и емкости методами интегральной технологии, появляются дополнительные источники погрешностей, к которым относятся разброс параметров навесных компонентов, неточности изготовления интегральных резисторов и конденсаторов и т. п.

Учет влияния отдельных видов погрешностей и их совокупности необходим для решения ряда общих и частных проблем, связанных с серийным выпуском полосковых узлов: выбор и оптимизация технологии, обеспечивающей наилучшую воспроизводимость электрических параметров узла; оптимизация конструкции узла, выбор наиболее экономичного технологического процесса; оценка процента выхода годных узлов. Большинство из этих проблем можно решить на этапе разработки путем моделирования на ЭВМ процесса изготовления схем, учитывая исходные данные по погрешностям, полученные при изучении технологических процессов, статистических данных входного контроля элементов и т. д. Данные по оценке дефектов и оптимизации технологии могут быть практически использованы при разработке технологической документации и технических условий на полосковые платы. Проверка готовых плат на соответствие чертежу проводится отделом технического контроля на основе документов, устанавливающих степень возможных отклонений рисунка платы, номиналов резисторов и конденсаторов, расположения навесных компонентов на контактных площадках и т. д., которые не выводят электрические параметры узлов за пределы допустимых.

Составление технических условий на полосковые платы производится по принципу разделения дефектов на недопустимые (разрывы полосок, отслоение металлизации, трещины плат и т. п.) и допустимые в определенных пределах (изрезанность края полосковых линий, протравы в элементах, непропаи швов, смещение навесных компонентов, отдельные загрязнения на плате и т. д.).

Таблица 4.16

**Выход годных толстопленочных узлов**

| Тип узла | Выход годных плат, % (до сборки) | Выход годных узлов, % (после сборки и настройки) |
|---|---|---|
| Делители мощности | 68 | 90 |
| Плавные аттенюаторы | 44 | 90 |
| Коммутационные схемы | 45...60 | 70...85 |
| Транзисторные усилители | 35...50 | 69...86 |

Каждый частный вид дефекта оценивается по степени его влияния на разброс электрических параметров. Следует отметить, что одновременное присутствие дефектов всех видов в одном узле, как правило, выводит его электрические параметры за допустимые пределы. Однако на практике подобная ситуация маловероятна и может быть численно оценена с помощью, например, метода Монте-Карло [4.48]. На практике в результате нежелательных суммарных разбросов дефектов платы и последующей сборки появляются бракованные узлы, которые не поддаются электрической настройке после окончательной сборки. В узлах с навесными компонентами дополнительный источник брака — разброс параметров этих элементов. Данные в табл. 4.16 иллюстрируют влияние дефектов платы и последующей сборки с настройкой при серийном выпуске толстопленочных узлов.

На рис. 4.73 изображены основные технологические дефекты полоски: *1* — впадина, *2* — выступ, *3* — протрав до подложки, *4* — группа протравов, *5* — царапина, *6* — металлизированная раковина, *7* — наплыв (утолщение) металлизации, *8* — неровность края, *9*, *9'* — разнотолщинность полоски, *10* — осадок (дендрит).

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ И УЗЛОВ

**Методика рассмотрения влияния погрешностей.** При анализе погрешностей можно решить две задачи. Первая: учитывая пределы допусков на электрические характеристики элемента, определяют допустимые пределы отдельных видов конструктивно- технологических отклонений, полагая, что либо существует только один вид разброса, либо одновременно присутствуют разные погрешности. Эти данные позволяют выработать требования к качеству технологии и материалов. Используемые при этом алгоритмы рассмотрены в гл. 5. Вторая задача: зная реальные пределы и законы распределения технологических и других разбросов, определяют возможные пределы и законы распределения погрешностей электрических характеристик и процент выхода годных элементов. Вторая задача имеет большее практическое значение при проектировании узлов, которые предстоит внедрять в условиях стабилизированного производства [4.12].

При анализе различают два вида погрешностей: регулярные и нерегулярные. К регулярным погрешностям (см. гл. 2) относятся отклонения, имеющие постоянное значение в пределах одного элемента (отклонение ширины и высоты полоски от номинального значения, отклонение диэлектрической проницаемости подложки от заданной и т. п.). В пределах партии элементов абсолютные значения отклонений распределяются по соответствующему закону (нормальное, усеченное, равномерное распределение и т. п.). Погрешности относят к нерегулярным, когда их значение непостоянно в пределах элемента (вариации ширины и высоты линии передачи по ее длине, имеющие плавный или ступенчатый характер, наличие в пределах подложки участков с различной проницаемостью и т. п.). Эти отклонения распределяются случайным образом как в пределах одного элемента, так и в составе партии. Вероятностный характер распределения погрешностей определяет методику анализа их влияния на характеристики полосковых линий и узлов. Для полосковой линии основными характеристиками, которые надо оценить, являются: волновое сопротивление $Z_в$ (или отклонение его от номинала — $\Delta Z_в$), $K_{стV}$ или коэффициент отражения Г, процент выхода годных линий при заданной норме $K_{стV}$. В качестве исходных формул выбирают аналитические выражения характеристик линии передачи (например, $Z_в$). Задавая распределение исходных величин (например, $w$ — ширины линии, $h$ — высоты, $\varepsilon_r$ — диэлектрической проницаемости), вычисляют параметры распределения (плотность вероятности) требуемой характеристики. Зная $Z_в$, математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и т. п., можно оценить вероятность получения требуемого $K_{стV}$ линии и процент выхода годных линий, имеющих $K_{стV}$ ниже заданного. Данный анализ можно проводить как для одного типа погрешности, так и для совокупности различных погрешностей. Формулы для расчета

плотности вероятности полосковых линий приведены в [4.12]. На рис. 4.74 представлены вероятностные параметры партии МПЛ на подложке из поликора (*1*), ГМ (*2*), 22ХС (*3*) и феррита 40СЧ2 (*4*) при совокупном воздействии регулярных и нерегулярных погрешностей, $N$ — число нерегулярных погрешностей: на рис. 4.74, *а* — отклонение $Z_в$ от номинала; 4.74 *б* и *в* — процент выхода (ПВ) годных МПЛ при допуске на $Z_в$ 10 и 5% соответственно.

Анализ различных видов погрешностей показывает, что наличие нерегулярных погрешностей существенно ухудшает параметры партии МПЛ по сравнению с наличием только регулярных погрешностей: увеличивается разброс значений $Z_в$, уменьшается процент выхода годных линий и пр. Расчет вероятностных

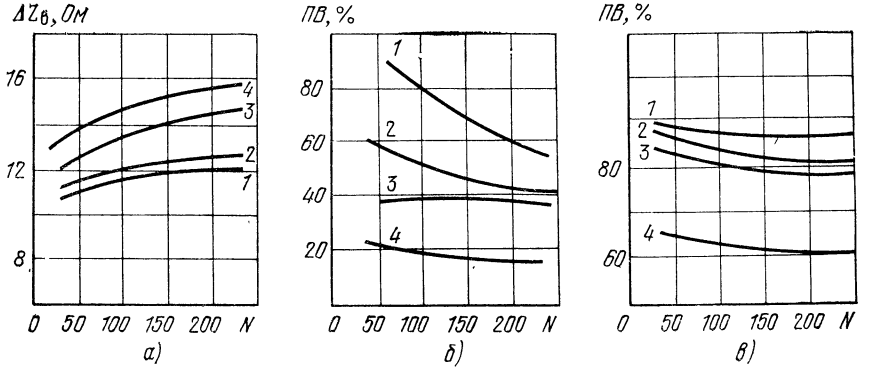



Рис. 4.74

характеристик полосковых линий предполагает применение машинных методов. Одним из способов, позволяющих оценить реальную ситуацию при выпуске полосковых элементов, является использование метода Монте-Карло [4.13; 4.48]. С помощью статистических испытаний удается с большой достоверностью оценить процент выхода годных узлов в случае предположения регулярных отклонений исходных параметров и нерегулярных отклонений отдельных элементов в пределах схемы [4.50].

**Уменьшение влияния погрешностей.** Анализ параметров распределения характеристик полосковых элементов и узлов позволил выработать рекомендации по уменьшению их влияния. Корректируя, например, ширину полоски, можно выбрать такое значение поправки к геометрическому размеру ($w + \Delta w$), при котором произойдут сдвиг и деформация кривой распределения плотности вероятности $Z_в$. При этом площадь, ограниченная кривой в пределах поля допуска на $Z_в$, будет максимальной [4.12]. Корректировка размера вводится при изготовлении фотошаблона полоскового узла. При выпуске крупных партий сложных и прецизионных узлов, особенно содержащих в своем составе навесные компоненты (например, диоды и транзисторы), целесообразно вводить подстроечные элементы для «исправления» дефектов. Процесс настройки (число дискрет подстройки и алгоритм ее) также может быть проанализирован и оптимизирован на основе метода статистических испытаний [4.13; 4.50]. Операция подстройки позволяет поднять процент выхода, например, направленных ответвителей дециметрового диапазона, изготовляемых по толстопленочной технологии, с 5 ...10 до 60 ...70% и довести процент выхода годных транзисторных усилителей до 40 ... 50%.

Глава 5

# ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

## 5.1. МАТРИЧНОЕ ОПИСАНИЕ СВЧ ЦЕПЕЙ

Электромагнитные процессы в линейных СВЧ цепях имеют волновой характер и строго описываются уравнениями Максвелла. Теоретически для сколь угодно сложной цепи, решив эти уравнения при соответствующих граничных условиях, можно определить напряженности электромагнитных полей в любом сечении цепи, а следовательно, и ее электрические параметры. Однако подобный путь даже при использовании современных ЭВМ встречает серьезные трудности, связанные главным образом с огромным объемом вычислений. Обозримые решения удается получить лишь для ограниченного числа достаточно простых полосковых элементов, большинство из которых рассмотрено в гл. 2 и 3. Поэтому перед разработчиком и конструктором полоскового узла неизбежно встает проблема расчленения (декомпозиции) сложной цепи на более простые элементы, электрические характеристики которых либо известны из электродинамического анализа, либо определены экспериментально. Структура СВЧ цепей, как правило, благоприятствует подобному расчленению, поскольку они обычно состоят из отдельных относительно простых элементов, соединяемых друг с другом отрезками линий. Далее с помощью специальных алгоритмов, описанных в § 5.3, по известным параметрам отдельных элементов восстанавливаются характеристики цепи в целом.

Описание параметров СВЧ элементов, наиболее адекватное протекающим в них волновым процессам, дает волновая матрица рассеяния [S]. Для полосковых устройств такое описание обычно используют от сколь угодно низких частот до критической частоты первой волны высшего типа в подключенных к устройству отрезках линии, т. е. во всей полосе одномодового режима. Нарушение одномодового режима, строго говоря, не препятствует [5.8] введению S-матрицы, однако существенно усложняет описание. Одномодовое приближение применимо, когда взаимодействие между сочленяемыми элементами по волнам высшего типа пренебрежимо мало. Это условие хорошо выполняется на частотах, достаточно далеких от критической первой волны высшего типа.

### $S$-МАТРИЦА

Назовем плечами устройства отрезки линий передачи, через которые осуществляются ввод и вывод электромагнитной волны; $S$-матрица устанавливает связь между отраженными и падающими волнами, распространяющимися в плечах устройства. В произвольном $N$-плечьем устройстве (рис. 5.1) комплексные амплитуды падающих ($a_1, a_2, \ldots, a_N$) и отраженных ($b_1, b_2, \ldots, b_N$) волн связаны $N$ линейными соотношениями вида

$$b_q = S_{q1}a_1 + S_{q2}a_2 + \ldots + S_{qN}a_N, \quad (q = 1, 2, \ldots, N). \tag{5.1}$$

Амплитуды падающих и отраженных волн находятся из следующего условия: произведение $a_p a_p^*/2$, $p=1, 2, \ldots, N$, равно мощности, поступающей на вход плеча с номером $p$, а произведение $b_p b_p^*/2$ — мощности отраженной волны в том же плече. Линейным соотношениям (5.1) соответствует матричная запись

$$[\mathrm{b}] = [\mathrm{S}]\,[\mathrm{a}], \tag{5.2}$$

где $[\mathbf{b}] = [b_1, b_2, \ldots, b_N]^{\mathrm{T}}$ — вектор-столбец отраженных волн; $[\mathbf{a}] = [a_1, a_2, \ldots, a_N]^{\mathrm{T}}$ — вектор-столбец падающих волн и

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \ldots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} \ldots & S_{2N} \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot & \cdot \\ S_{N1} & S_{N2} \ldots & S_{NN} \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

— нормированная волновая матрица рассеяния.

В (5.1) и (5.3) $S_{pp}$ ($p = 1, 2, \ldots, N$) — коэффициент отражения в плече с номером $p$, когда все плечи, кроме $p$-го, в которое поступает падающая волна $a_p$, нагружены на неотражающие нагрузки. При этом во всех плечах с номером $k \neq p$ $a_k = 0$ и поэтому $S_{pp} = b_p/a_p$. Если $p \neq q$, то $S_{pq}$ — коэффициент передачи из плеча с номером $q$ в плечо с номером $p$, когда все плечи, кроме $q$-го , в которое поступает падающая волна $a_q$, нагружены на согласованные нагрузки. При этом во всех плечах с номером $k \neq q$ $a_k = 0$ и поэтому $S_{pq} = b_p/a_q$. Численные значения элементов $S$-матрицы либо находятся из решения соответствующей электродинамической задачи, либо определяются экспериментально [5.1].

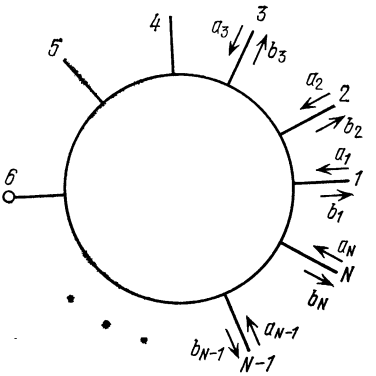


Рис. 5.1

Перечислим основные свойства $S$-матрицы:

— во взаимных устройствах $[\mathbf{S}] = [\mathbf{S}]^{\mathrm{T}}$, т. е. $S_{ij} = S_{ji}$;

— если устройство состоит из чисто реактивных элементов (тепловые потери равны нулю), то $[\mathbf{S}^*]^{\mathrm{T}}[\mathbf{S}] = [1]$, т. е.

$$\sum_{i=1}^{N} |S_{ik}|^2 = 1, \quad \sum_{i=1}^{N} S_{ip}^* S_{iq} = 0,$$

$$k, p, q = 1, 2, \ldots, N; \quad p \neq q.$$

Оба равенства — следствие закона сохранения энергии. Первое из них — баланс активных мощностей. Символом [1] обозначена квадратная матрица, диагональные элементы которой равны 1, все остальные — нулю. Во взаимных устройствах $[\mathbf{S}^*]^{\mathrm{T}} = [\mathbf{S}^*]$ и $[\mathbf{S}^*][\mathbf{S}] = [1]$;

— если в устройстве отсутствуют реактивные элементы, то $[\mathbf{S}] = [\mathbf{S}^*]$, т. е. $S_{ij} = S_{ij}^*$;

— за начало отсчета фазы падающих и отраженных волн в каждом плече выбирается граничная (отсчетная или референсная) плоскость, перпендикулярная направлению распространения энергии. При сдвиге граничных плоскостей в плечах на расстояние $l_p$, $p = 1, 2, \ldots, N$, элементы $S_{pq}^{\Sigma}$ новой $S$-матрицы пересчитываются по формулам

$$S_{pq}^{\Sigma} = S_{pq}\, e^{-j(\varphi_p + \varphi_q)},$$

где $\varphi_p = \beta_p l_p$; $\varphi_q = \beta_q l_q$; $l_p$ и $l_q$ — перемещения граничных плоскостей в плечах с номерами $p$ и $q$, $\beta = 2\pi/\Lambda$. Положительным полагается сдвиг, когда плоскость удаляется от устройства. Разумный выбор положения граничных плоскостей позволяет упростить $S$-матрицу. Например, $S_{pp}$ — действительная величина, когда граничная плоскость $p$-го плеча расположена в узле ($S_{pp} \leqslant 0$) или пучности ($S_{pp} \geqslant 0$) напряженности электрического поля;

— если $i$-е и $j$-е плечи устройства соединены отрезком линии, то элементы $S$-матрицы полученного таким способом нового устройства рассчитываются по формуле

$$S_{pq}^{\Sigma} = S_{pq} - [S_{ii} S_{pj} S_{jq} + (1 - S_{ij}) S_{pi} S_{jq} + (1 - S_{ji}) S_{pj} S_{iq} + S_{jj} S_{pi} S_{iq}] / [S_{ii} S_{jj} - (1 - S_{ij})(1 - S_{ji})], \quad p, q \neq i, j. \tag{5.4}$$

Соединительная линия рассматривается как продолжение регулярной линии, образующей $i$-е либо $j$-е плечо, т. е. граничная плоскость в одном из плеч смещается на длину соединительной линии.

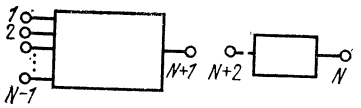



Рис. 5.2

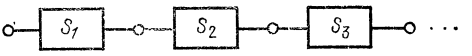



Рис. 5.3

Рассмотрим наиболее интересные частные случаи (5.4).

1. К $i$-му плечу подключена нагрузка с коэффициентом отражения $\Gamma_i$, фаза которого определена в граничной плоскости $i$-го плеча, $p$, $q \neq i$:

$$S^{\Sigma}_{pq} = S_{pq} + \Gamma_i S_{pi} S_{iq}/(1 - \Gamma_i S_{ii}).$$

2. К $(N+1)$-му плечу подключено двухплечее устройство ($p \leqslant N-1$ при нумерации плеч, указанной на рис. 5.2):

$$S^{\Sigma}_{pq} = S_{pq} + S_{N+2,\,N+2}\, S_{p,\,N+1}\, S_{N+1,\,q}/\Delta; \quad S^{\Sigma}_{Nq} = S_{N,\,N+2}\, S_{N+1,\,q}/\Delta;$$

$$S^{\Sigma}_{pN} = S_{p,\,N+1}\, S_{N+2,\,N}/\Delta;$$

$$S^{\Sigma}_{NN} = S_{NN} + S_{N+1,\,N+1}\, S_{N,\,N+2}\, S_{N+2,N}/\Delta;$$

$$-\Delta = S_{N+1,\,N+1}\, S_{N+2,\,N+2} - 1. \qquad (5.5)$$

Последовательное использование равенств в (5.5) позволяет найти матрицу рассеяния произвольного числа каскадно включаемых четырехполюсников (рис. 5.3). Дополнительные сведения к $S$-матрице можно найти в [5.2, 5.6].

## $Z$, $Y$ И $T$-МАТРИЦЫ

Нормированные матрицы сопротивления $[\mathbf{Z}]$, проводимости $[\mathbf{Y}]$, и $S$-матрица связаны соотношениями:

$$[\mathbf{Z}] = 2([1] - [\mathbf{S}])^{-1} - [1], \qquad (5.6)$$

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Z}]^{-1} = 2([1] + ]\mathbf{S}])^{-1} - [1], \qquad (5.7)$$

$$[\mathbf{S}] = [1] - 2^{-1}([1] + [\mathbf{Z}])^{-1} = 2^{-1}([1] + [\mathbf{Y}])^{-1} - [1].$$

Переход к классическим ненормированным матрицам $[\mathbf{Z}]_{\text{кл}}$ и $[\mathbf{Y}]_{\text{кл}}$ осуществляется по формулам

$$[\mathbf{Z}]_{\text{кл}} = [\sqrt{\mathbf{Z}_{\text{в}}}]\,[\mathbf{Z}]\,[\sqrt{\mathbf{Z}_{\text{в}}}], \quad [\mathbf{Y}]_{\text{кл}} = [\sqrt{\mathbf{Y}_{\text{в}}}]\,[\mathbf{Y}]\,[\sqrt{\mathbf{Y}_{\text{в}}}],$$

$$\text{где} \quad [\sqrt{\mathbf{Z}_{\text{в}}}] = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{\text{в}1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{\text{в}2}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & & \sqrt{Z_{\text{в}N}} \end{bmatrix} = [\sqrt{\mathbf{Y}_{\text{в}}}]^{-1}.$$

Перечислим кратко основные свойства $Y$-матрицы:

— во взаимных устройствах $[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Y}]^{\text{т}}$, т. е. $Y_{ij} = Y_{ji}$,

— в устройствах из реактивных элементов $[\mathbf{Y}] = -[\mathbf{Y}^*]^{\text{т}}$ или $Y_{ij} = -Y^*_{ji}$;

— в устройствах без реактивных элементов $[\mathbf{Y}] = [\mathbf{Y}^*]$ или $Y_{ij} = Y^*_{ji}$;

— при смещении граничных плоскостей элементы матрицы $[\mathbf{Y}]$, как и всех матриц, кроме $[\mathbf{S}]$, пересчитываются по весьма сложным формулам, что является их недостатком;

если $i$-е и $j$-е плечи соединены отрезком линии, то

$$Y_{pq}^{\Sigma}=Y_{pq}-(Y_{pi}+Y_{pj})(Y_{iq}+Y_{jq})/(Y_{ii}+Y_{ij}+Y_{ji}+Y_{jj}),\quad p,q\neq i,j. \tag{5.8}$$

Сравнение (5.4) и (5.8) показывает, что при пересчете элементов $Y$-матрицы требуется существенно меньшее число арифметических операций. Поэтому при высоких порядках матриц можно достичь иногда значительной экономии машинного времени, используя вместо [S] матрицу [Y] и алгоритмы обработки разреженных матриц, описанные в § 5.3;

матрица проводимости $[\mathbf{Y}_{\Sigma}]$ устройства, состоящего из $N$ параллельно соединенных элементов с равным числом плеч, равна сумме матриц $[\mathbf{Y}_n]$ отдельных элементов:

$$[\mathbf{Y}_{\Sigma}]=\sum_{n=1}^{N}[\mathbf{Y}_n]. \tag{5.9}$$

Свойства $Z$-матрицы в основном аналогичны. Формула (5.8) для [Z] имеет вид

$$Z_{pq}^{\Sigma}=Z_{pq}-(Z_{pi}-Z_{pj})(Z_{iq}-Z_{jq})/(Z_{ii}-Z_{ij}-Z_{ji}+Z_{jj}),\quad p,q\neq i,j. \tag{5.10}$$

Выражение (5.9) справедливо для матрицы $[\mathbf{Z}_{\Sigma}]$, если рассматривать $N$ последовательно соединенных элементов [5.2].

Волновая нормированная $T$-матрица описывает зависимость между волнами во входных плечах, число которых $m$, и в выходных плечах устройства, число которых $n$, причем $n \geqslant m$. Присвоим входным плечам номера с 1 до $m$, а выходным — с $m+1$ до $m+n$ и введем обозначения: $[\mathbf{a}_m]=[a_1 \ldots a_m]^{\mathrm{T}}$; $[\mathbf{a}_n]=[a_{m+1} \ldots a_{m+n}]^{\mathrm{T}}$; $[\mathbf{b}_m]=[b_1 \ldots b_m]^{\mathrm{T}}$; $[\mathbf{b}_m]=[\mathbf{b}_{m+1} \ldots b_{m+n}]^{\mathrm{T}}$; $[0_q]$ — вектор-столбец из $q$ нулей. Матрица [S] разбивается на клеточные в соответствии с равенством

$$\begin{bmatrix}[\mathbf{b}_m]\\ [\mathbf{b}_n]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} {}^{m}_{m}[\mathbf{S}_{11}] & {}^{n}_{m}[\mathbf{S}_{12}]\\ {}^{m}_{n}[\mathbf{S}_{21}] & {}^{n}_{n}[\mathbf{S}_{22}]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}[\mathbf{a}_m]\\ [\mathbf{a}_n]\end{bmatrix}. \tag{5.11}$$

Запись ${}_p^q[\mathbf{D}]$ означает, что матрица [D] состоит из $p$ строк и $q$ столбцов. Так как $n \geqslant m$, то возможно разбиение

$${}^{m}_{n}[\mathbf{S}_{21}]=\begin{bmatrix} {}^{m}_{m}[\mathbf{S}'_{21}]\\ {}^{m}_{n-m}[\mathbf{S}''_{21}]\end{bmatrix};\quad {}^{n}_{n}[\mathbf{S}_{22}]=\begin{bmatrix} {}^{n}_{m}[\mathbf{S}'_{22}]\\ {}^{n}_{n-m}[\mathbf{S}''_{22}]\end{bmatrix};\quad {}^{n}_{n}[1]=\begin{bmatrix} {}^{n}_{m}[\mathbf{K}_1]\\ {}^{n}_{n-m}[\mathbf{K}_2]\end{bmatrix}.$$

Тогда матрица

$$[\mathbf{T}]=\begin{bmatrix} [\mathbf{S}_A] & -[\mathbf{S}_{\mathrm{B}}]\\ [\mathbf{S}_{11}][\mathbf{S}_A] & [\mathbf{S}_{12}]-[\mathbf{S}_{11}][\mathbf{S}_{\mathrm{B}}]\\ [\mathbf{S}''_{21}][\mathbf{S}_A]-[\mathbf{K}_2] & [\mathbf{S}''_{22}]-[\mathbf{S}''_{21}][\mathbf{S}_{\mathrm{B}}]\end{bmatrix}, \tag{5.12}$$

где $[\mathbf{S}_A]=[\mathbf{S}'_{21}]^{-1}[\mathbf{K}_1]$ и $[\mathbf{S}_{\mathrm{B}}]=[\mathbf{S}'_{21}]^{-1}[\mathbf{S}'_{22}]$,

является искомой, поскольку

$$[[\mathbf{a}_m]\,[\mathbf{b}_m]\,[0_{n-m}]]^{\mathrm{T}}=[\mathbf{T}]\,[[\mathbf{b}_n]\,[\mathbf{a}_n]]^{\mathrm{T}}. \tag{5.13}$$

Если $n=m$, то $[\mathbf{K}_1]=1$, $[\mathbf{K}_2]=[\mathbf{S}''_{21}]=[\mathbf{S}''_{22}]=0$ и последняя строка в (5.12) опускается. Аналогично осуществляется и обратный переход. Матрица **T** в (5.13) разбивается на клетки согласно (5.12):

$$[\mathbf{T}]=\begin{bmatrix}[\mathbf{T}_{11}] & [\mathbf{T}_{12}]\\ [\mathbf{T}_{21}] & [\mathbf{T}_{22}]\\ [\mathbf{T}_{31}] & [\mathbf{T}_{32}]\end{bmatrix}.$$

Тогда

$$[\mathbf{S}]=\begin{bmatrix} [\mathbf{T}_{21}][\mathbf{T}''_{11}]^{-1} & [\mathbf{T}_{22}]-[\mathbf{T}_{21}][\mathbf{T}'_{11}]^{-1}[\mathbf{T}'_{12}] \\ [\mathbf{T}''_{11}]^{-1} & -[\mathbf{T}'_{11}]^{-1}[\mathbf{T}'_{12}] \end{bmatrix}, \qquad (5.14)$$

где ${}_m[\overset{n}{\mathrm{T}}'_{12}]=\begin{bmatrix}[\mathrm{T}_{12}]\\ [\mathrm{T}_{32}]\end{bmatrix}$, матрица ${}_n[\overset{m}{\mathrm{T}}''_{11}]^{-1}$ получена вычеркиванием в квадратной матрице ${}_n[\overset{n}{\mathrm{T}}_{11}]^{-1}=\begin{bmatrix}[\mathrm{T}_{11}]\\ [\mathrm{T}_{31}]\end{bmatrix}^{-1}$ последних $(n-m)$ столбцов. Переход от $[\mathbf{T}]$ к $[\mathbf{Z}]$ или $[\mathbf{Y}]$ осуществляется подстановкой (5.14) в (5.6) или (5.7).

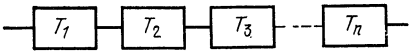



Рис. 5.4

**Пример 5.1.** Делитель с одним входом ($m=1$), соответствующим плечу *1*, и двумя выходами ($n=2$), соответствующими плечам *2* и *3*, описывается матрицей

$$[\mathbf{S}]=\left[\begin{array}{c|cc} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ \hline S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{array}\right]. \qquad (5.15)$$

Пунктиром в (5.15) отмечено разбиение на клеточные матрицы в соответствии с (5.11). Согласно (5.12) при $S_{21}\neq 0$

$$[\mathbf{T}]=\frac{1}{S_{21}}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_{22} & -S_{23} \\ S_{11} & 0 & S_{12}S_{21}-S_{11}S_{22} & S_{13}S_{21}-S_{11}S_{23} \\ S_{31} & -S_{21} & S_{32}S_{21}-S_{31}S_{22} & S_{33}S_{21}-S_{31}S_{23} \end{bmatrix}. \qquad (5.16)$$

Широкое использование $T$-матриц обусловлено тем, что матрица $[\mathbf{T}_\Sigma]$ $N$-каскадного соединения (рис. 5.4) равна простому произведению $T$-матриц отдельных устройств[1], т. е. $[\mathbf{T}_\Sigma]=\prod\limits_{n=1}^{N}[\mathbf{T}_n]$, тогда как для других матриц подобный алгоритм существенно сложнее (см., например, (5.4), (5.5), (5.8) и (5.10)).

## 5.2. МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В результате декомпозиции сложная цепь расчленяется на ряд достаточно простых базовых элементов (БЭ) с известными матрицами рассеяния, проводимости и т. д. При создании системы автоматизированного проектирования одним из первых этапов является формирование настолько полной библиотеки БЭ (ББЭ), чтобы были возможны расчет, оптимизация и анализ чувствительности практически произвольных СВЧ цепей. В ББЭ вводятся соответствующие матрицы активных (транзисторов, диодов и др.) и невзаимных (вентилей, циркуляторов и др.) элементов, определяемые чаще всего экспериментально. Ниже приведены $S$-матрицы ряда наиболее распространенных БЭ. Переход к матрицам $[\mathbf{Z}]$, $[\mathbf{Y}]$ и $[\mathbf{T}]$, если необходимо, осуществляется с помощью выражений (5.6), (5.7) и (5.12). Используя эти данные, а также материал гл. 3, можно составить весьма полную ББЭ. Пунктирными линиями на эквивалентных схемах отмечено положение граничных плоскостей.

1. Отрезок регулярной линии с волновым сопротивлением $Z_в$ (рис. 5.5) и $\gamma=\alpha+j\beta$:

$$S_{11}=S_{22}=0,\quad S_{12}=S_{21}=e^{-\gamma l}.$$

---

[1]При $n>m$ матрицы умножаются по определенным правилам [5.50].

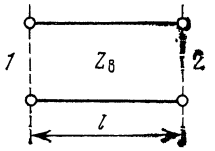



Рис. 5.5

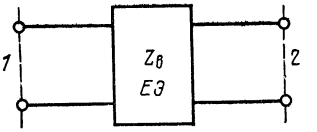



Рис. 5.6

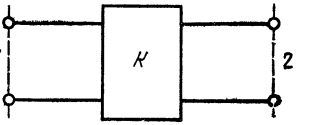



Рис. 5.7

2. Единичный элемент (ЕЭ) фильтра [5.7] с волновым сопротивлением $Z_в$ (рис. 5.6)

$$S_{11}=S_{22}=j\,(\Omega Z_в-\Omega/Z_в)/[2+j\,(\Omega Z_в+\Omega/Z_в)];\quad S_{12}=S_{21}=2\sqrt{1+\Omega^2},$$

где $\Omega$ — частотная переменная.

3. Инвертор (рис. 5.7) с коэффициентом инверсии $K$

$$S_{11}=-S_{22}=(K^2-1)/\,(K^2+1),\quad S_{21}=S_{12}=-j2K/\,(K^2+1).$$

Если к зажимам *2—2* инвертора подключено нормированное сопротивление $Z'$, то его входная проводимость на зажимах *1—1* $Y_{11}=Z'/K^2$. Если зажимы *2—2* нагружены на нормированную проводимость $Y'$, то входное нормированное сопротивление инвертора $Z_{11}=K^2Y'$. Свойствами почти идеального инвертора в узкой полосе частот обладают четвертьволновый отрезок линии, сосредоточенные *T*- и *П*-четырехполюсники [5.7].

4. Идеальный трансформатор (рис. 5.8) с коэффициентом трансформации $N=w_1/w_2$:

$$S_{11}=-S_{22}=(N^2-1)/\,(N^2+1),$$

$$S_{12}=S_{21}=2N/\,(N^2+1).$$

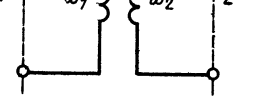



Рис. 5.8

Граничная плоскость *1—1* расположена в узле, когда $S_{11}\leqslant 0$, или пучности, когда $S_{11}\geqslant 0$, стоячей волны. При определении положения этой плоскости зажимы *2—2* нагружаются на согласованную нагрузку. Аналогично определяется положение граничной плоскости *2—2*.

5. Непосредственное сочленение двух регулярных линий (рис. 5.9) с неравными волновыми сопротивлениями ($R=Z_{в2}/Z_{в1}$), шунтированное проводимостью $Y'=YZ_{в1}$;

$$S_{11}=-1+2R/\Delta,\ S_{22}=-1+2/\Delta,$$

$$S_{12}=S_{21}=2\sqrt{R}/\Delta,\ \Delta=1+R\,(1+Y').$$

При $R=1$ данные выражения соответствуют *S*-матрице отрезка линии, шунтированного проводимостью $Y=-2S_{11}/\,(Z_{в1}\,S_{12})$.

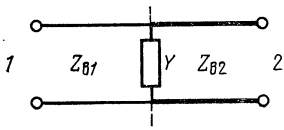



Рис. 5.9

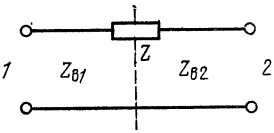



Рис. 5.10

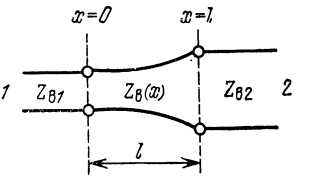



Рис. 5.11

6. Сопротивление $Z$, включенное в разрыв между линиями (рис. 5.10) с неравными волновыми сопротивлениями ($R=Z_{в2}/Z_{в1}$, $Z'=Z/Z_{в1}$),

$$S_{11}=(Z'+R-1)/\Delta,\ S_{22}=(Z'-R+1)/\Delta,$$

$$S_{12}=S_{21}=2\sqrt{R}/\Delta,\ \Delta=Z'+R+1.$$

7. Экспоненциальный плавный переход, в котором $Z_в(x) = Z_{в1}\exp(\nu x/l)$ (рис. 5.11),

$$S_{11} = -S_{22} = A^{-1} R_1 \operatorname{sh}\eta,\ S_{12} = S_{21} = A^{-1},$$

где $\nu = \ln(Z_{в2}/Z_{в1})$; $\eta^2 = \nu^2/4 - \beta^2 l^2$; $R_1 = \nu/(2\eta)$; $A = \operatorname{ch}\eta + R_2 \operatorname{sh}\eta$; $R_2 = \beta/\eta$; $\beta = 2\pi/\Lambda$ — фазовая постоянная, не зависящая от координаты $x$. Формулы точны в рамках теории длинных линий.

8. Плавный переход с произвольным законом изменения $Z_в(x)$ $[N(x) = \frac{d}{dx}\ln Z_в(x)]$

$$S_{11} = -S_{22} = 0{,}5\int_0^l N(x)\exp[-j2\beta(l-x)]dx,\quad S_{12} = S_{21} = \exp(-j\beta l).$$

Данные выражения — первое приближение к строгому решению в рамках теории длинных линий [5.2] и применимы с небольшой погрешностью при $\beta l \geqslant 1{,}5\ln(Z_{в2}/Z_{в1})$. Характеристику, близкую к чебышевской, и соответственно малую длину имеет компенсированный экспоненциальный переход, в котором [5.2] $Z_в(x) = Z_{в1}\exp(\nu(x/l - a\sin(2\pi x/l)))$:

$$S_{11} = -S_{22} = \frac{\nu}{2}\left[\frac{\sin\beta l}{\beta l} - 2\pi a\frac{\beta l\sin\beta l}{(\beta l)^2 - \pi^2}\right];$$

$$S_{12} = S_{21} = \exp(-j\beta l).$$

Зависимость $2|S_{11}|_{макс}$ от $2\pi a$ ($|S_{11}|_{макс}$ — максимальный коэффициент отражения в полосе согласования) представлена на рис. 5.12.

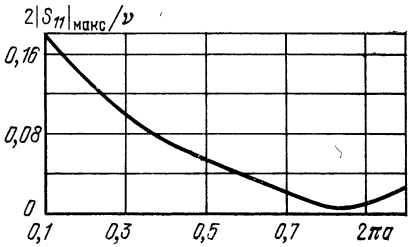



Рис. 5.12

9. Т-четырехполюсник из элементов с сосредоточенными параметрами ($l \to 0$) (рис. 5.13):

$$S_{11} = [Z_3'(Z_1'-1) + (Z_2'+R)(Z_1'+Z_3'-1)]/\Delta;$$

$$S_{22} = [Z_3'(Z_1'+1) + (Z_2'-R)(Z_1'+Z_3'+1)]/\Delta;$$

$$S_{12} = S_{21} = 2\sqrt{R}Z_3'/\Delta;$$

$$\Delta = Z_3'(Z_1'+1) + (Z_2'+R)(Z_1'+Z_3'+1),$$

где $R = Z_{в2}/Z_{в1}$; $Z_n' = Z_n/Z_{в1}$ ($n = 1, 2, 3$). Геометрические размеры всех сопротивлений и соединительных проводников полагаются пренебрежимо малыми по сравнению с $\Lambda$. При синтезе параметры $S_{11}$, $S_{22}$ и $S_{12}$ задаются. Тогда

$$Z_3' = 2\sqrt{R}S_{12}/((1-S_{11})(1-S_{22}) - S_{12}^2);\quad Z_2' = Z_3'((1-S_{11})\sqrt{R}/S_{12} - 1) - R;$$

$$Z_1' = Z_3'[(1-S_{22})/(S_{12}\sqrt{R}) - 1] - 1.$$

В согласованных аттенюаторах ($S_{11} = S_{22} = 0$)

$$R_3' = 2n\sqrt{R}/(1-n^2);\quad R_2' = R_3'(\sqrt{R}n^{-1} - 1) - R;\quad R_1' = R_3'((n\sqrt{R})^{-1} - 1) - 1,$$

где $n^2 = P_{вых}/P_{вх}$ — отношение мощностей на входе и выходе аттенюатора.

Т-четырехполюсник из чисто реактивных элементов при $Z_1' = Z_2'$ на той частоте, где $Z_1' + Z_3' = 0$, является идеальным трансформатором сопротивлений ($S_{11} = 0$), если $Z_{в1} Z_{в2} = |Z_3|^2$.

10. П-четырехполюсник из элементов с сосредоточенными параметрами ($l \to 0$) (рис. 5.14). Элементы $S$-матрицы описываются выражениями п. 9, если осуществить в них замену: $R \to 1/R$, $Z_n' \to Y_n' = Z_{в1} Y_n$, $n = 1, 2, 3$, и умножить на $-1$ полученные для $S_{11}$ и $S_{22}$ соотношения.

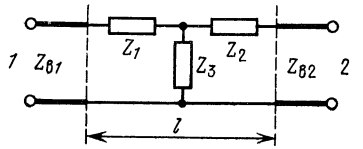



Рис. 5.13

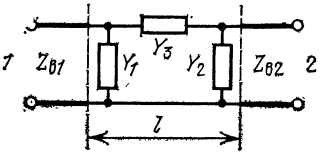



Рис. 5.14

11. Параллельное Т-сочленение: обобщенная эквивалентная схема параллельного соединения трех отрезков линий передачи изображена на рис. 5.15. Элементы $S$-матрицы находятся по формулам п. 9, так как подключение к любому из плеч согласованной нагрузки сводит Т-сочленение к Т-четырехполюснику.

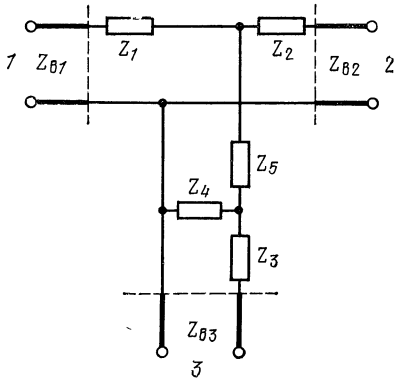



Рис. 5.15

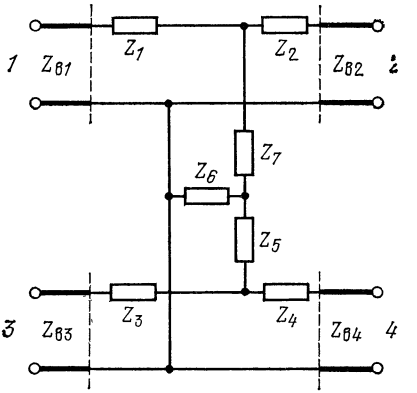



Рис. 5.16

Например, к плечу *3* подключено сопротивление $Z_{в3}$. Тогда $S_{11}$, $S_{22}$, $S_{12} = S_{21}$ описываются формулами п.10, если роль $Z_3$ выполняет сопротивление

$$Z_{33} = Z_5 + Z_4 (Z_3 + Z_{в3}) / (Z_3 + Z_4 + Z_{в3}).$$

Подключение согласованной нагрузки к плечу *2* позволяет определить $S_{33}$ и $S_{13} = S_{31}$, если роль $Z_1$ выполняет сопротивление $Z_{11} = Z_1 + Z_5 (Z_2 + Z_{в2}) / (Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_{в2})$, роль $Z_2$ — сопротивления $Z_{22} = Z_3 + Z_5 Z_4 / (Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_{в2})$, роль $Z_3$ — сопротивления $Z_{33} = Z_4 (Z_2 + Z_{в2}) / (Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_{в2})$, и т.д.

12. Параллельное Х—сочленение: обобщенная эквивалентная схема параллельного соединения четырех отрезков линий передачи изображена на рис. 5.16. При подключении к плечам *3* и *4* сопротивлений, соответственно равных $Z_{в3}$ и $Z_{в4}$, Х-сочленение сводится к Т-четырехполюснику, в котором роль $Z_3$ выполняет сопротивление

$$Z_{33} = Z_7 + Z_6 [ (Z_3 + Z_{в3}) (Z_4 + Z_{в4}) + Z_5 (Z_3 + Z_4 + Z_{в3} + Z_{в4}) ] / [ (Z_5 + Z_6) (Z_3 + Z_4 + Z_{в3} + Z_{в4}) + (Z_3 + Z_{в3}) (Z_4 + Z_{в4}) ]$$

и т. д.

13. Линии, соединенные шлейфом длиной $2l$ (рис. 5.17, граничная плоскость проходит через точки $a$, $a'$, $б$, $б'$):

$$S_{11} = S_{22} = -1 + A_1 + A_2,$$
$$S_{23} = S_{32} = S_{14} = S_{41} = \sqrt{R_1}\,(A_1 - A_2),$$
$$S_{33} = S_{44} = -1 + R_1\,(A_1 + A_2),$$
$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = \sqrt{R_1}\,(A_1 + A_2),$$
$$S_{34} = S_{43} = R_1\,(A_1 - A_2),\quad S_{12} = S_{21} = A_1 - A_2,$$

где $A_1 = (1 + R_1 + R_2 \operatorname{th} \gamma_2 l)^{-1}$;
$A_2 = (1 + R_1 - R_2 \operatorname{cth} \gamma_2 l)^{-1}$; $R_1 = Z_{B0}/Z_{B1}$, $R_2 = Z_{B0}/Z_{B2}$; $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ — коэффициент распространения в линии с волновым сопротивлением $Z_{B2}$.

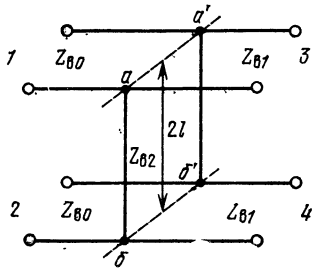



Рис. 5.17

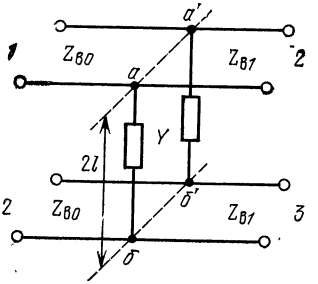



Рис. 5.18

14. Линии, соединенные через комплексную проводимость (рис. 5.18), граничная плоскость проходит через точки $a$, $a'$, $б$, $б'$:

$$S_{11} = S_{22} = -S_{12} = -S_{21} = -0{,}5 + A,$$
$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0{,}5 + A\sqrt{R_1},$$
$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = 0{,}5 - A\sqrt{R_1},$$
$$S_{33} = S_{44} = -S_{34} = -S_{43} = -0{,}5 + AR_1,$$

где $A = (1 + R_1 + Y')^{-1}$; $R_1 = Z_{B0}/Z_{B1}$; $Y' = Z_{B0}Y$. Формулы точны, если сопротивление точечное ($2l = 0$), и применимы, когда $2l/\Lambda \ll 1$.

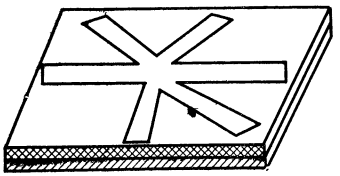


Рис. 5.19

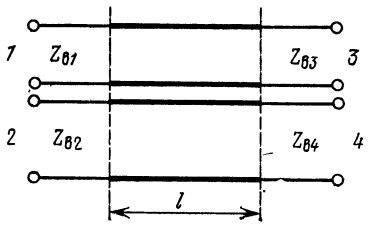



Рис. 5.20

15. Непосредственное сочленение $N$ линий с произвольными $Z_B$ (рис. 5.19)

$$S_{jj} = -1 + 2/Y'_j;\quad S_{ji} = 2\sqrt{R_{ji}}/Y'_j,$$

где $R_{ji} = Z_{B\,j}/Z_{B\,i}$; $Y'_j = Z_{B\,j}\sum_{n=1}^{N} Z_{B\,n}^{-1}$, $i, j = 1, 2, \ldots, N$. Все граничные плоскости проходят через центр сочленения, причем $\sum_{j=1}^{N} w_j \ll \lambda$, где $w_j$ — ширина $j$-й полоски.

16. Однозвенный направленный ответвитель (НО) из однородных линий (рис. 5.20):

$$S_{ii}=(d_i \sin^2\theta+r_i\cos^2\theta+\mathrm{j}g_i\sin 2\theta)/\Delta,\quad i=1,2,3,4;$$

$$S_{12}=S_{21}=\sqrt{R_{21}}\,(h_1\sin^2\theta+\mathrm{j}t_1\sin 2\theta)/\Delta;$$

$$S_{34}=S_{43}=\sqrt{R_{34}}\,(h_2\sin^2\theta+\mathrm{j}t_2\sin 2\theta)/\Delta;$$

$$S_{13}=S_{31}=-2\sqrt{R_{31}}\,(a_{24}^{+}\cos\theta+\mathrm{j}b_{24}^{+}\sin\theta)/\Delta;$$

$$S_{24}=S_{42}=-2\sqrt{R_{24}}\,(a_{13}^{+}\cos\theta+\mathrm{j}b_{13}^{+}\sin\theta)/\Delta;$$

$$S_{14}=S_{41}=-\mathrm{j}2\sqrt{R_{14}}\,c_{23}^{-}\sin\theta/\Delta;$$

$$S_{23}=S_{32}=-\mathrm{j}2\sqrt{R_{23}}\,c_{14}^{-}\sin\theta/\Delta;$$

$$\Delta=(b_{13}^{+}b_{24}^{+}-c_{23}^{-}c_{14}^{-})\sin^2\theta-a_{13}^{+}a_{24}^{+}\cos^2\theta-\mathrm{j}2^{-1}(a_{13}^{+}b_{24}^{+}+a_{24}^{+}b_{13}^{+})\sin 2\theta,$$

где $\theta=2\pi l/\Lambda$ ($l$ — длина области связи);

$$d_1=c_{23}^{-}c_{14}^{+}-b_{24}^{+}b_{13}^{-};\quad r_1=-a_{24}^{+}a_{13}^{-};\quad g_1=(a_{24}^{+}b_{13}^{-}-a_{13}^{-}b_{24}^{+})/2;$$

$$d_2=c_{23}^{+}c_{14}^{-}-b_{24}^{-}b_{13}^{+};\quad r_2=-a_{14}^{-}a_{13}^{+};\quad g_2=(a_{13}^{+}b_{24}^{-}-a_{24}^{-}b_{13}^{+})/2;\quad d_3=c_{23}^{+}c_{14}^{-}-$$

$$-b_{24}^{+}b_{13}^{-};\quad r_3=a_{24}^{+}a_{13}^{-};\quad g_3=(a_{24}^{+}b_{13}^{-}+a_{13}^{-}q_{24}^{+})/2;\quad d_4=c_{23}^{-}c_{14}^{+}-b_{24}^{-}b_{13}^{+};$$

$$r_4=a_{24}^{-}a_{13}^{+};\quad g_4=(a_{13}^{+}b_{24}^{-}+a_{24}^{-}b_{13}^{+})/2;\quad h_1=c_{14}^{+}b_{13}^{+}-c_{14}^{-}b_{13}^{-};\quad t_1=-(a_{13}^{-}c_{14}^{+}+$$

$$+a_{13}^{+}c_{14}^{+})/2;\quad h_2=c_{23}^{+}b_{13}^{+}-c_{23}^{-}b_{13}^{-};\quad t_2=(a_{13}^{-}c_{23}^{-}-a_{13}^{+}c_{23}^{+})/2;\quad a_{mn}^{\pm}=1\pm R_{mn};$$

$$R_{mn}=Z_{\text{в}m}/Z_{\text{в}n};\quad 2b_{mn}^{\pm}=(R^{+}+R^{-})\,[Z_{\text{в}m}(R^{+}R^{-})^{1}\pm Z_{\text{в}n}^{-1}];\quad 2c_{mn}^{\pm}=$$

$$=(R^{+}-R^{-})\,[Z_{\text{в}m}(R^{+}R^{-})^{-1}\pm Z_{\text{в}n}^{-1}].$$

Величины $R^{+}$ и $R^{-}$, имеющие размерность сопротивления, характеризуют величину связи между линиями и могут быть определены по известным из теоретического либо экспериментального исследования значениям любой пары параметров НО: $S_{11}$ и $S_{12}$, $S_{12}$ и $S_{13}$ и т. д. Они равны волновому сопротивлению связанных соответственно при синфазном ($Z_{\text{в}\,e}$) и противофазном ($Z_{\text{в}\,o}$) возбуждении, если оба эти понятия имеют смысл.

Коэффициент связи НО определяется при $\theta=\pi/2$ и равен $k_{\text{св}}=|S_{12}|^{-1}=R_{21}^{-1/2}(b_{13}^{+}b_{24}^{+}-c_{23}^{-}c_{14}^{-})/h_1$. НО идеально согласован и направлен на всех частотах, когда $a_{mn}^{-}=b_{mn}^{-}=c_{mn}^{-}=0$, т. е. когда $Z_{\text{в}1}=Z_{\text{в}2}=Z_{\text{в}3}=Z_{\text{в}4}=Z_{\text{в}}$ и $R^{+}R^{-}=Z_{\text{в}}^{2}$. При этом $k_{\text{св}}=(R^{+}+R^{-})/(R^{+}-R^{-})$.

Обширный материал по НО содержится в [5.5].

## 5.3. АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

### ФОРМИРОВАНИЕ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

Общепринятую в настоящее время процедуру анализа линейного СВЧ устройства можно разделить на несколько стадий. На первой устройство разбивается на отдельные многоплечие элементы. Критерием разбиения служит возможность определения с достаточной для преследуемых целей точностью электрических характеристик элементов. Под электрическими характеристиками элементов подразумеваются их матрицы рассеяния ($S$-матрицы). Некоторые часто встречающиеся элементы и их $S$-матрицы рассмотрены в § 5.1, 5.2. На второй стадии, зная $S$-матрицы элементов и учитывая краевые условия в местах их соединения, можно вычислить электрические характеристики устройства в целом. Последняя задача сводится к решению (преобразованию) системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) или эквивалентным матричным операциям и является по своей сути задачей линейной алгебры. Рассматриваемые в настоя-

щем разделе алгоритмы справедливы при следующих предположениях относительно многоплечих элементов:

линейность — каждый элемент можно описать с помощью совокупности линейных соотношений между амплитудами волн на его плечах (входах);

пассивность — амплитуды волн, отраженных от входов элемента, равны нулю, если равны нулю амплитуды всех падающих волн;

равенство волновых сопротивлений соединяемых плеч.

Требования линейности и пассивности не исключают возможности анализа устройств, в состав которых входят линейные усилители. Третье требование, не ограничивая класса решаемых задач, упрощает запись алгоритмов. При неравных $Z_В$ между соединяемыми плечами следует включить двуплечий элемент, эквивалентный по своим свойствам соединению двух передающих линий с неравными $Z_В$ (см. § 5.2). Этот элемент может быть введен в состав любого из соединяемых элементов или рассмотрен в качестве независимого. Будем называть входы, соединяемые друг с другом, внутренними или связанными, а несоединяемые — внешними или свободными.

СЛАУ, служащая исходной для определения $S$-матрицы сложного устройства, формируется в следующей последовательности:

1. Пронумеровываются все плечи элементов устройства, причем свободным плечам присваиваются первые номера.

2. В предположении, что соединения элементов не произведены, записывается совокупность линейных соотношений (5.1), выражающих амплитуды отраженных волн во всех плечах через амплитуды падающих волн:

$$\left[\begin{array}{c|c} [S_{cc}] & [S_{cb}] \\ \hline [S_{bc}] & [S_{bb}] \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} [a_c] \\ \hline [a_b] \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} [b_c] \\ \hline [b_b] \end{array}\right], \tag{5.17}$$

где $[a_c]$, $[a_b]$, $[b_c]$, $[b_b]$ — подвекторы амплитуд падающих и отраженных волн. Индексы $c$ и $b$ соответствуют свободным и связанным плечам.

3. Записываются соотношения, выражающие непрерывность волн в местах соединения

$$[b_b] = [E_1]\,[a_b], \tag{5.18}$$

где $[E_1]$ — матрица, единственными ненулевыми элементами которой являются единицы, стоящие вне главной диагонали на пересечении строк и столбцов, соответствующих парам связанных плеч.

4. Соотношения (5.18) подставляются в правые части соответствующих уравнений (5.17), затем из каждого из этих уравнений вычитаются их правые части. Полученная СЛАУ является исходной для преобразования

$$\left[\begin{array}{c|c} [S_{cc}] & [S_{cb}] \\ \hline -[S_{bc}] & [E_1]-[S_{bb}] \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} [a_c] \\ \hline [a_b] \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} [b_c] \\ \hline [0] \end{array}\right], \tag{5.19}$$

где $[0]$ — нулевой подвектор-столбец.

Из (5.19) следует:

$$[b_c] = [S^\Sigma]\,[a_c];\quad [S^\Sigma] = [S_{cc}] + [S_{cb}]\,([E_1]-[S_{bb}])^{-1}\,[S_{bc}]; \tag{5.20}$$

$$[a_b] = ([E_1]-[S_{bb}])^{-1}\,[S_{bc}]\,[a_c]. \tag{5.21}$$

**Пример 5.2.** Формирование СЛАУ для соединения двух элементов (рис. 5.21). При обозначенной нумерации плеч соотношения (5.17) имеют вид

$$\left[\begin{array}{cc|cccc} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & 0 \\ \hline S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & S_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{65} & S_{66} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{array}\right]$$

[пунктирными линиями показано разбиение на клеточные подматрицы согласно (5.17)]. Матрица $[E_1]$ записывается как

$$[E_1]=\begin{bmatrix}0&0&1&0\\0&0&0&1\\1&0&0&0\\0&1&0&0\end{bmatrix},$$

а исходная СЛАУ (5.19) для определения $[S^{\Sigma}]$

$$\left[\begin{array}{cc|cccc}S_{11}&S_{12}&S_{13}&S_{14}&0&0\\S_{21}&S_{22}&S_{23}&S_{24}&0&0\\\hline -S_{31}&-S_{32}&-S_{33}&-S_{34}&1&0\\-S_{41}&-S_{42}&-S_{43}&-S_{44}&0&1\\0&0&1&0&-S_{55}&-S_{56}\\0&0&0&1&-S_{65}&-S_{66}\end{array}\right]\begin{bmatrix}a_1\\a_2\\a_3\\a_4\\a_5\\a_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}b_1\\b_2\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix}. \qquad (5.22)$$

При наличии рассогласованных генераторов, подключенных к некоторым (или всем) внешним плечам устройства, формирование СЛАУ усложняется. Его можно разделить на следующие этапы:

1. В состав устройства включаются возбуждающие генераторы (рис. 5.21). Генератор рассматривается как одноплечий и в общем случае рассогласованный элемент, описываемый соотношением $b_i = \Gamma_i a_i + c_i$, где $c_i$ — амплитуда воз-

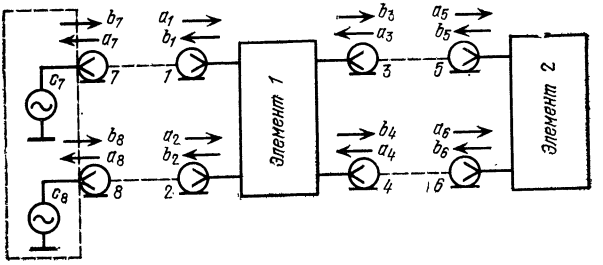



Рис. 5.21

буждающей волны в $i$-м плече; $\Gamma_i$ — коэффициент отражения генератора; $b_i$, $a_i$ — амплитуды отраженной и падающей волн. Если $c_i = 0$, то $i$-й генератор представляет собой одноплечую нагрузку. Генераторы подключаются ко всем свободным плечам устройства, плечам их присваиваются последние номера.

2. Совокупность линейных соотношений вида (5.17) дополняется аналогичными соотношениями для генераторов:

$$\left[\begin{array}{c|c|c}[S_{cc}]&[S_{cb}]&[0]\\\hline [S_{bc}]&[S_{bb}]&[0]\\\hline [0]&[0]&[\Gamma]\end{array}\right]\left[\begin{array}{c}[a_c]\\\hline [a_b]\\\hline [a_\Gamma]\end{array}\right]+\left[\begin{array}{c}[0]\\\hline [0]\\\hline [c_\Gamma]\end{array}\right]=\left[\begin{array}{c}[b_c]\\\hline [b_b]\\\hline [b_\Gamma]\end{array}\right], \qquad (5.23)$$

где $[a_\Gamma]$, $[b_\Gamma]$, $[c_\Gamma]$ — подвекторы амплитуд падающих, отраженных и возбуждающих волн в плечах генераторов; $[\Gamma]$ — диагональная матрица, элементы которой — коэффициенты отражения генераторов.

3. Соотношения непрерывности (5.18) дополняются равенствами для внешних плеч и плеч генераторов

$$[b_c] = [E_2]\,[a_\Gamma],\ [b_\Gamma] = [E_2]\,[a_c], \qquad (5.24)$$

где $[E_2]$ — матрица, единственными ненулевыми элементами которой являются единицы, стоящие вне главной диагонали на пересечении строк и столбцов, соответствующих парам связанных плеч устройства и генератора.

4. Согласно (5.23), (5.24)

$$\left[\begin{array}{c|c|c} -[S_{cc}] & -[S_{cb}] & [E_2] \\ \hline -[S_{bc}] & [E_1]-[S_{bb}] & [0] \\ \hline [E_2] & [0] & -[\Gamma] \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} [a_c] \\ \hline [a_b] \\ \hline [a_\Gamma] \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} [0] \\ \hline [0] \\ \hline [c_\Gamma] \end{array}\right]. \qquad (5.25)$$

После того как определены $[a_c]$, $[a_b]$, $[a_\Gamma]$, из (5.18), (5.23) вычисляются $[b_c]$, $[b_b]$, $[b_\Gamma]$, а из (5.25) — матрица $[\widetilde{S}]$, связывающая $[b_c]$ и $[c_\Gamma]$:

$$[\widetilde{S}] = [S^\Sigma]\,([E_2]-[\Gamma]\,[E_2]^{-1}\,[S^\Sigma])^{-1}; \quad [b_c] = [\widetilde{S}]\,[c_\Gamma]; \qquad (5.26)$$

$[\widetilde{S}]$ можно интерпретировать, как $S$-матрицу устройства с учетом рассогласований подключаемых трактов.

**Пример 5.3.** Формирование системы уравнений для соединения двух элементов и двух генераторов (см. рис. 5.21). При обозначенной нумерации плеч подматрицы $[\Gamma]$ и $[E_2]$ имеют вид

$$[\Gamma] = \begin{bmatrix} \Gamma_7 & 0 \\ 0 & \Gamma_8 \end{bmatrix}, \quad [E_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а исходная система уравнений типа (5.25) выглядит следующим образом:

$$\left[\begin{array}{cc|cccc|cc} -S_{11} & -S_{12} & -S_{13} & -S_{14} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_{21} & -S_{22} & -S_{23} & -S_{24} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline -S_{31} & -S_{32} & -S_{33} & -S_{34} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -S_{41} & -S_{42} & -S_{43} & -S_{44} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -S_{55} & -S_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -S_{65} & -S_{66} & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Gamma_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\Gamma_8 \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ \hline a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ \hline a_7 \\ a_8 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hline c_7 \\ c_8 \end{array}\right], \qquad (5.27)$$

где $\Gamma_7$, $\Gamma_8$ — коэффициенты отражения генераторов.

Решение системы вида (5.25) или преобразование систем вида (5.19) «вручную» возможно только для устройств, содержащих незначительное число элементов, с малым общим числом плеч [5.4, 5.9]. Высокие порядки систем уравнений, описывающих сложные устройства, непрерывное усложнение как самих устройств, так и их моделей диктуют необходимость перехода к автоматизированным методам расчета.

Непосредственное использование традиционных методов линейной алгебры [5.10, 5.26] для решения СЛАУ высокого порядка затруднительно или даже невозможно, так как память ЭВМ часто не вмещает полную матрицу коэффициентов системы. Разрешить указанное противоречие помогает то обстоятельство, что в реальном устройстве каждый элемент соединен с ограниченным числом других элементов, обычно не более чем с тремя-четырьмя, т. е. значительная часть коэффициентов равна нулю. Такие матрицы принято называть разреженными [5.11]. Разработанные к настоящему времени методы решения задач с разреженной матрицей имеют общую основу: метод исключения переменных Гаусса и его модификации. Порядок решаемых систем при заданных ресурсах ЭВМ повышается, так как в память ЭВМ не заносятся нулевые элементы матрицы и с ними не проводятся операции.

Можно выделить два направления развития методов решения задач с разреженной матрицей: модификация прямых методов решения систем с заполненной матрицей коэффициентов, когда система рассматривается и преобразуется как единое целое, и декомпозиция исходной задачи, когда система уравнений

разбивается на подсистемы меньшего порядка, описывающие соединения отдельных групп элементов устройства. Решения подсистем служат исходным материалом для решения системы в целом. По аналогии с методами линейного программирования [5.27] будем называть алгоритмы первого направления универсальными, а алгоритмы второго направления декомпозиционными.

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Для этой группы алгоритмов характерно наличие системы указателей (индексов) ненулевых элементов (НЭЛ), позволяющей хранить только НЭЛ и определять местоположение любого из них в матрице; использование для преобразований СЛАУ одного из алгоритмов последовательного исключения переменных, причем операции проводятся только с НЭЛ; упорядочение строк и столбцов исходной матрицы для уменьшения затрат памяти ЭВМ и машинного времени. Форму хранения матрицы, когда в памяти ЭВМ размещаются только НЭЛ, называют упакованной. Кратко опишем некоторые схемы индексации НЭЛ [5.11, 5.12], полагая порядок матрицы равным $n$, а число НЭЛ — $\nu$.

**Схема 1.** Каждому НЭЛ ставится в соответствие запись, представляющая собой упорядоченную тройку чисел: $i$, $p$, $S_{ij}$. Записи хранятся по столбцам. В каждой записи $i$ — номер строки НЭЛ; $p$ — адрес следующего по порядку НЭЛ в данном столбце; $S_{ij}$ — значение НЭЛ. Если запись соответствует последнему НЭЛ данного столбца, то $p = 0$. Введем три массива: $D$ $(n)$, $IP$ $(2,\nu)$, $S$ $(\nu)$. В массиве $D$ содержатся адреса записей в массивах $IP$ и $S$, соответствующих первым НЭЛ всех столбцов матрицы по порядку. В первой строке $IP$ располагаются номера строк НЭЛ, во второй — адреса (порядковые номера) следующих НЭЛ данного столбца в массивах $IP$ и $S$. Массив $S$ содержит значения НЭЛ, располагающиеся в том же порядке, что и указатели в $IP$. Схема носит название связных списков. Для хранения комплексной матрицы в этой форме требуется $4\nu + n$ ячеек памяти.

**Пример 5.4.** Выпишем массивы $D$, $IP$, $S$ для системы (5.22):

| Номер $j$ элемента массива $D$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D(j)$ | 1 | 5 | 9 | 14 | 19 | 22 |

| Номер $k$ элемента массивов $IP$, $S$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $IP\ (1,\ k) = i$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| $IP\ (2,\ k) = p$ | 2 | 3 | 4 | 0 | 6 | 7 | 8 | 0 | 10 | 11 | 12 |
| $S\ (k) = S_{ij}$ | $S_{11}$ | $S_{21}$ | $-S_{31}$ | $-S_{41}$ | $S_{12}$ | $S_{22}$ | $-S_{32}$ | $-S_{42}$ | $S_{13}$ | $S_{23}$ | $-S_{33}$ |

| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ↓ | ↓ | ↓ | | | | | | | | |
| 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 3 | 5 | 6 | 4 | 5 | 6 |
| | | ↓ | ↓ | | | | | | | | | |
| 13 | 0 | 15 | 16 | 17 | 18 | 0 | 20 | 21 | 0 | 23 | 24 | 0 |
| | | | | ↓ | | | | | | | | |
| $-S_{43}$ | 1 | $S_{14}$ | $S_{24}$ | $-S_{34}$ | $-S_{44}$ | 1 | 1 | $-S_{55}$ | $-S_{65}$ | 1 | $-S_{56}$ | $-S_{66}$ |

В (5.22) необходимо найти значение НЭЛ, расположенного на пересечении 3-й строки и 4-го столбца. По номеру столбца $j = 4$ находим $D$ (4) = 14, т. е. $k = 14$ есть номер столбца с первым НЭЛ в массивах $IP$ и $S$. Просматриваем по-

следовательно номера строк, в которых размещены НЭЛ 4-го столбца, начиная с $IP$ (1,14), причем номер $p = 15$ и 16 каждой последующей записи берется из 2-й строки $IP$. Определяем в результате просмотра, что строка с $i = IP(1, 16) = 3$ есть в списке и ей соответствует $k = 16$. По номеру элемента $k$ определяем значение НЭЛ: $S(16) = -S_{34}$. Последовательность просмотра показана стрелками в записи массивов $IP$ и $S$. Если среди номеров строк данного столбца нет требуемого, соответствующий элемент матрицы равен нулю.

Допустим, на пересечении 4-й строки и 5-го столбца в (5.22) возник новый НЭЛ, имеющий значение, равное $-S_{45}$. Связные списки позволяют разместить соответствующую ему запись после всех записей, не сдвигая предыдущих. Если запись размещается в 25-м столбце $IP$, то достаточно положить $IP(1,25) = 4$, $IP(2,25) = 20$ и $S(25) = -S_{45}$ и сделать единственное изменение в исходных записях, заменив значение $IP(2, 19)$ с 20 на 25. Если возникающий НЭЛ — первый в столбце, то в исходных записях $IP$ изменений не происходит, но следует заменить адрес первого НЭЛ данного столбца в массиве $D$. Например, если в (5.22) НЭЛ возникает на пересечении 2-й строки и 5-го столбца и соответствующая запись размещается в 25-м столбце $IP$, то $D(5)$ принимает значение, равное 25.

**Схема 2.** Каждому НЭЛ ставится в соответствие число $d_{ij} = i + (j - 1)n$, где $i, j$ — номера строки и столбца, в которых размещен НЭЛ. Матрица содержится в двух массивах: $IJ(\nu)$ и $S(\nu)$. Значения $d_{ij}$ располагаются в $IJ$ по столбцам, а соответствующие им НЭЛ — в массиве $S$. Номера $i$ и $j$ восстанавливаются из $d_{ij}$ по следующему правилу: $j$ равно наименьшему целому числу, большему или равному $d_{ij}/n$; вслед за этим $i$ определяется из соотношения $i = d_{ij} - (j - 1)n$. Хранение комплексной матрицы в этой форме требует $3\nu$ ячеек памяти.

**Пример 5.5.** Для системы (5.22) массив $IJ$ имеет вид

| Номер элемента $k$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $IJ(k)=d_{ij}$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24 | 27 | 29 | 30 | 34 | 35 | 36 |

а массив $S$ совпадает с аналогичным массивом схемы 1.

**Схема 3.** Система указателей вводится для нижней треугольной части матрицы, которая хранится в следующих массивах: $IUR\left(\frac{\nu - n}{2}\right)$ — номера строк для НЭЛ нижней треугольной части матрицы; $IUC(n - 1)$ — номера первых НЭЛ всех столбцов по порядку в массиве $IUR$, $S1(n)$ — диагональные элементы S-матрицы по порядку; $S2\left(\frac{\nu - n}{2}\right)$ — внедиагональные НЭЛ $S$-матрицы ниже диагонали (по столбцам); $S3\left(\frac{\nu - n}{2}\right)$ — внедиагональные НЭЛ $S$-матрицы выше диагонали (по строкам). Для хранения комплексной матрицы в такой форме требуется $2{,}5\nu + 0{,}5n$ ячеек памяти.

**Пример 5.6.** Для матрицы системы (5.22) $IUR$: {2, 3, 4, 3, 4, 4, 5, 6, 6}, $IUC$ : {1, 4, 6, 8, 9}, $S1$ : $\{S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}, S_{55}, S_{66}\}$, $S2$ : $\{S_{21}, -S_{31}, -S_{41}, -S_{32}, -S_{42}, -S_{43}, 1, 1, -S_{65}\}$, $S3$ : $\{S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{23}, S_{24}, -S_{34}, 1, 1, -S_{56}\}$.

Из представленных схем индексации связные списки (см. схему 1) требуют наибольших затрат памяти, однако она допускает произвольное расположение записей в массивах, при этом легко добавляются новые записи. Схемы 2 и 3 требуют меньшего объема памяти, но введение записей для новых НЭЛ влечет за собой сдвиг большого числа записей в массивах. Схема 3 используется для матриц с симметричным расположением НЭЛ относительно главной диагонали [5.12]. Из других форм хранения следует упомянуть «битовую карту» [5.46], в которой каждой строке разреженной матрицы соответствует строка битов, причем каждый НЭЛ кодируется единичным битом, а нулевой элемент — нулевым.

Хранение матрицы в этой форме требует малого объема памяти (один бит на элемент). Недостаток — трудность реализации на языках высокого уровня. Подробное описание различных форм хранения можно найти в [5.13, 5.46].

Для решения систем вида (5.25) или преобразования систем вида (5.19) используются различные методы последовательного исключения переменных. Ниже описаны наиболее употребительные. Особую роль в процессе исключения играют ведущие или главные элементы, т. е. элементы матрицы, расположенные на ее главной диагонали. Ведущие элементы должны быть достаточно большими во избежание потери численной устойчивости алгоритма или аварийной остановки ЭВМ вследствие деления на нуль. Перед началом вычислений рекомендуется убедиться в том, что все ведущие элементы больше некоторого числа $\varepsilon$. Значение $\varepsilon = 10^{-3}$ является удовлетворительным, если в памяти хранится 9 или 10 десятичных разрядов [5.11]. Если часть ведущих элементов не удовлетворяет этому требованию, следует провести выбор ведущего элемента, т. е. переставить строки и столбцы так, чтобы на главной диагонали размещались элементы требуемого порядка.

**Метод Гаусса** [5.10, 5.11, 5.26]. Процесс исключения переменных состоит из $2n$ шагов ($n$ — порядок решаемой системы).

*Шаг 1.* Выбираем ведущий элемент и, переставляя строки и столбцы матрицы, устанавливаем его на пересечении 1-й строки и 1-го столбца матрицы. Параллельно производится соответствующая перестановка компонент вектора правых частей (при перестановке строк) и вектора неизвестных (при перестановке столбцов). Все НЭЛ 1-й строки и 1-я компонента правой части делятся на значение ведущего элемента $S_{11}^{(1)}$ (для элемента матрицы, стоящего перед началом $k$-го шага исключения на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца, далее будет использоваться обозначение $S_{ij}^{(k)}$). Преобразованная 1-я строка умножается на $S_{21}^{(1)}$ и вычитается из 2-й строки, затем преобразованная 1-я строка умножается на $S_{31}^{(1)}$ и вычитается из 3-й строки и т. д. Если для $r$-й строки $S_{r1}^{(1)} = 0$, то $r$-я строка не преобразуется. Параллельно точно так же преобразуются компоненты вектора правых частей. После завершения шага 1 на пересечении 1-й строки и 1-го столбца будет стоять единица, а остальные элементы 1-го столбца будут равны нулю.

*Шаг 2.* Выбираем ведущий элемент среди всех НЭЛ, кроме НЭЛ 1-й строки и 1-го столбца, устанавливаем его на пересечении 2-й строки и 2-го столбца. Делим все НЭЛ 2-й строки и соответствующую компоненту правой части, полученные в конце первого шага, на значение ведущего элемента $S_{22}^{(2)}$. Умножаем 2-ю строку матрицы на $S_{32}^{(2)}$ и вычитаем из 3-й строки, умножаем 2-ю строку на $S_{42}^{(2)}$ и вычитаем из 4-й строки, повторяем эту операцию для всех последующих строк. Если для $r$-й строки $S_{r2}^{(2)} = 0$, то $r$-я строка не преобразуется. Параллельно также преобразуются компоненты вектора правых частей, кроме первой. После завершения 2-го шага все элементы 1-го столбца, кроме 1-го элемента, 2-го столбца, кроме двух первых элементов, равны нулю, а на пересечении 2-й строки и 2-го столбца будет стоять единица.

*Шаги 3, 4, ... n.* Проводятся аналогично первым двум, причем исходной всякий раз служит матрица, полученная на предыдущем шаге. Первые $n$ шагов часто называют прямым ходом Гаусса. Эта часть алгоритма может быть записана в виде рекуррентных соотношений:

$$S_{kj}^{(k+1)} = S_{kj}^{(k)}/S_{kk}^{(k)},\ j=k+1,\ k+2,\ \ldots,\ n;\quad S_{ij}^{(k+1)} = S_{ij}^{(k)} - S_{ik}^{(k)} S_{kj}^{(k+1)},$$
$$i,\ j=k+1,\ k+2,\ \ldots,\ n; \tag{5.28}$$

$$c_k^{(k+1)} = c_k^{(k)}/S_{kk}^{(k)};\quad c_i^{(k+1)} = c_i^{(k)} - S_{ik}^{(k)}\, c_k^{(k+1)},\ i=k+1,\ k+2,\ \ldots,\ n. \tag{5.29}$$

Действия по первой формуле в (5.28) выполняются только для $S_{kj}^{(k)} \neq 0$, а по второй формуле — только для $S_{ik}^{(k)} \neq 0$ и $S_{kj}^{(k)} \neq 0$. В (5.29) действия по первой формуле выполняются только для $c_k^{(k)} \neq 0$, а по второй — только для $S_{ik}^{(k)} \neq 0$

и $c_k^{(k)} \neq 0$. После завершения $n$-го шага матрица системы (5.25) становится верхней треугольной с единичными элементами на главной диагонали.

*Шаги* $n+1, n+2, \ldots, 2n$. После $n$-го шага исключения неизвестные определяются последовательно из рекуррентного соотношения

$$a_n = c_n^{(n+1)}, \quad a_k = c_k^{(n+1)} - \sum_{i=1}^{n-k} S_{k,\,n+1-i}^{(n+1)} a_{n+1-i}, \tag{5.30}$$

где $k$ принимает последовательно значения $n-1, n-2, \ldots, 1$. Вычисления по формулам (5.30) часто называют обратной подстановкой метода Гаусса.

Метод Гаусса легко приспосабливается для определения $S$-матрицы устройства из системы (5.19). Для этого следует: переставить перед началом вычислений все строки и столбцы матрицы, номера которых совпадают с номерами соединяемых плеч, в левый верхний угол матрицы; провести последовательно первые $m$ шагов исключения, пользуясь формулами (5.28), где $m$ — число соединяемых плеч. По окончании $m$-го шага совокупность коэффициентов $S_{ij}^{(m+1)}$, $i, j = m+1, m+2, \ldots, n$, образует искомую матрицу.

**Метод Гаусса—Жордана** [5.10, 5.11, 5.26]. Процесс решения делится на $n$ шагов ($n$ — порядок системы), аналогичных первым $n$ шагам метода Гаусса. Отличие заключается в том, что вычисления по рекуррентным формулам (5.28) и (5.29) производятся не только для $i = k+1, k+2, \ldots, n$, но и для $i = 1, 2, \ldots, k-1$, т. е. для всех строк, кроме $k$-й. Тем самым исключаются НЭЛ не только под главной диагональю, как в методе Гаусса, но и над ней. По окончании $n$-го шага матрица приводится к диагональному виду: вектор неизвестных равен преобразованному вектору правых частей

$$a_i = c_i^{(n+1)}, \quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{5.31}$$

Вычисление $S$-матрицы устройства методом Гаусса—Жордана аналогично определению ее методом Гаусса: перед началом вычислений строки и столбцы матрицы системы (5.19) с номерами, совпадающими с номерами соединяемых плеч, переставляются в левый верхний угол матрицы, а затем проводятся первые $m$ шагов исключения по формулам (5.28) для $i = 1, 2, \ldots, k-1, k+1, k+2, \ldots, n$. Совокупность коэффициентов $S_{ij}^{(m+1)}$, $i, j = m+1, m+2, \ldots, n$, образует $S$-матрицу. Если необходимо, после окончания $m$-го шага исключения с помощью соотношений

$$a_i = -\sum_{j=m+1}^{n} S_{ij}^{(m+1)} a_j, \quad i = 1, 2, \ldots, m, \tag{5.32}$$

определяются амплитуды волн во внутренних плечах.

**LU-факторизация** [5.11, 5.47]. Суть ее состоит в разложении исходной матрицы на сомножители: нижнюю треугольную матрицу [L] и верхнюю треугольную матрицу с единичной диагональю [U] :[S] = [L][U]. Разложение (факторизация) осуществляется методами Краута или Блэка — Дулитла. Метод Краута состоит из $3n$ шагов, причем на первых $n$ шагах выбирается ведущий элемент.

*Шаг 1.* 1-й столбец [L] совпадает с 1-м столбцом исходной матрицы (5.25): $l_{i1} = S_{i1}^{(1)}$, $i = 1, 2, \ldots, n$; вычисляется 1-я строка [U] : $u_{1j} = S_{1j}^{(1)}/l_{11}$, $j = 2, 3, \ldots, n$.

*Шаг 2.* Вычисляется 2-й столбец [L] : $l_{i2} = S_{i2}^{(1)} - l_{i1}u_{12}$, $i = 2, 3, \ldots, n$, и вторая строка [U]: $u_{2j} = (S_{2j}^{(1)} - l_{21}u_{1j})/l_{22}$, $j = 3, 4, \ldots, n$.

*Шаг 3.* Вычисляется 3-й столбец [L]: $l_{i3} = S_{i3}^{(1)} - l_{i1}u_{13} - l_{i2}u_{23}$, $i = 3, 4, \ldots, n$, и 3-я строка [U]: $u_{3j} = (S_{3j}^{(1)} - l_{31}u_{1j} - l_{32}u_{2j})/l_{33}$, $j = 4, 5, \ldots, n$.

*Шаги 4, 5, ..., n.* Вычисляются последовательно 4-й столбец [L], 4-я строка [U], 5-й столбец [L] и т. д. Часть алгоритма со 2-го шага и далее может быть записана в виде следующих рекуррентных выражений:

$$l_{ik}=S_{ik}^{(1)}-\sum_{p=1}^{k-1} l_{ip}\, u_{pk},\ i=k,\ k+1,\ \ldots,\ n,\ k=2,\ 3,\ \ldots,\ n;$$

$$u_{kj}=\left(S_{kj}^{(1)}-\sum_{p=1}^{k-1} l_{kp}\, u_{pj}\right)/l_{kk},$$

$$j=k+1,\ k+2,\ \ldots,\ n. \qquad (5.33)$$

*Шаги n + 1, n + 2, .., 2n.* Вычисляется вспомогательный вектор переменных [y]:

$$y_1=c_1^{(1)}/l_{11};\ y_k=\left(c_k^{(1)}-\sum_{p=1}^{k-1} l_{kp}\, y_p\right)\Big/ l_{kk},\ k=2,\ 3,\ \ldots,\ n. \qquad (5.34)$$

*Шаги 2 n + 1, 2n + 2, ..., 3n.* Последовательно вычисляются неизвестные

$$a_n=y_n;\ a_k=y_k-\sum_{p=k+1}^{n} u_{kp}\, a_p,\ k=n-1,\ n-2,\ \ldots,\ 1. \qquad (5.35)$$

Метод Блэка — Дулитла отличается от метода Краута порядком вычислений элементов [L] и [U]: вычисляется 1-я строка [L], 1-я строка [U], 2-я строка [L], 2-я строка [U] и т. д. Элементы $k$-й строки [L] определяются из выражений

$$l_{kj}=S_{kj}^{(1)}-\sum_{p=1}^{j-1} l_{kp}\, u_{pj},\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ k, \qquad (5.36)$$

а элементы $k$-й строки [U] — из второго соотношения (5.33).

При преобразовании разреженной матрицы по формулам (5.28), (5.29), (5.33), (5.36) возможно возникновение НЭЛ на тех местах, где их ранее не было (новые ненулевые элементы — ННЭ). Например, если для некоторых $i=r$ и $j=s$ в (5.28) $S_{rs}^{(k)}=0$, но $S_{rk}^{(k)}\neq 0$ и $S_{ks}^{(k)}\neq 0$, то $S_{rs}^{(k+1)}\neq 0$. Количество ННЭ, возникающих на $k$-м шаге, принято называть локальным заполнением $k$-го шага исключения. Оно зависит от порядка, в котором обрабатываются строки и столбцы матрицы. Проводя упорядочение, можно изменять число возникающих ННЭ. Основные усилия разработчиков универсальных алгоритмов направлены на создание алгоритмов упорядочения, минимизирующих число либо арифметических операций, либо ННЭ. В первом случае сокращаются затраты машинного времени, во втором — затраты памяти ЭВМ. Минимизация заполнения вообще говоря, не приводит к минимизации числа операций. Обе задачи минимизации, возникающие за весь процесс преобразований, весьма трудоемки и требуют перебора огромного числа возможных вариантов перестановок. Поэтому обычно рассматривается локальная задача: выбрать на каждом шаге исключения ведущий элемент, которому соответствует минимум затрат памяти (минимум локального заполнения) или времени. Возможен и компромиссный выбор ведущего элемента [5.11, 5.16]. Минимизация затрат памяти не влечет за собой минимизации общего числа ННЭ, хотя и приводит к заметному его уменьшению. То же можно сказать и о числе арифметических операций. Рассмотрим некоторые из многочисленных алгоритмов упорядочения [5.11, 5.12, 5.15 5.16, 5.46].

**Алгоритм 1 (А-1).** Строки матрицы перед началом преобразований перенумеровываются в порядке возрастания числа внедиагональных НЭЛ; строки, имеющие одно и то же число внедиагональных НЭЛ, располагаются в своей группе в произвольном порядке. Вслед за этим перестановкой столбцов матрицы какой-либо из НЭЛ (желательно максимальный) устанавливается на главную диагональ в качестве ведущего.

**Алгоритм 2 (А-2).** На каждом шаге исключения следующей для обработки выбирается строка, содержащая наименьшее число внедиагональных НЭЛ с

учетом ННЭ, возникающих на предыдущих шагах. Выбор среди строк с равным числом внедиагональных НЭЛ произволен. Ведущий элемент устанавливается так же, как в А-1.

**Алгоритм 3 (А-3).** Если $r_i$ — число внедиагональных НЭЛ $i$-й строки, а $s_j$ — число внедиагональных НЭЛ $j$-го столбца необработанной части матрицы, то из всех необработанных столбцов и строк матрицы выбирается в качестве ведущего НЭЛ, стоящий на пересечении строки и столбца с наименьшим значением произведения $r_i s_j$. Вслед за этим выбранный НЭЛ устанавливается на главную диагональ.

**Алгоритм 4 (А-4).** На каждом шаге исключения из всех НЭЛ необработанной части матрицы выбирается ведущий элемент, которому соответствует наименьшее локальное заполнение. Выбранный НЭЛ устанавливается на главную диагональ.

**Алгоритм 5 (А-5).** Пары строк, соответствующие парам соединяемых плеч, упорядочиваются так, что каждая пара имеет число НЭЛ, не большее, чем последующая; в паре строка с наименьшим числом НЭЛ предшествует другой. Вслед за этим столбцы переставляются так, чтобы установить максимальный по значению НЭЛ на главную диагональ. Если НЭЛ расположены симметрично относительно главной диагонали, то выбор ведущего элемента часто проводят только среди диагональных НЭЛ.

Таблица 5.1

**Сравнение алгоритмов упорядочения**

| Алгоритм | Общее число ННЭ | Число умножений и делений | Порядок обработки строк |
|---|---|---|---|
| Без упорядочения | 22 | 89 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| А-1 | 12 | 80 | 7, 8, 5, 6, 1, 2, 3, 4 |
| А-2 | 12 | 80 | 7, 8, 5, 6, 3, 4, 1, 2 |
| А-3 | 2 | 56 | 7, 8, 5, 6, 3, 4, 1, 2 |
| А-4 | 2 | 63 | 7, 1, 8, 2, 5, 6, 4, 3 |
| А-5 | 7 | 66 | 7, 1, 8, 2, 5, 3, 6, 4 |

Сравнительную эффективность алгоритмов А-1 ... А-5 проиллюстрируем на примере системы (5.27). Данные в табл. 5.1 получены в предположении, что система (5.27) преобразуется методом Гаусса по формулам (5.28). Дополнительное сравнение, проведенное методом статистического моделирования заполнения матриц высоких порядков [5.17, 5.18] в сочетании с данными табл. 5.1, позволяет сделать следующие выводы:

алгоритмы А-2, А-3, А-4 требуют предварительного моделирования процесса исключения, из них наиболее трудоемок А-4;

алгоритм А-3 минимизирует локальное количество умножений и делений при исключении переменных с помощью (5.28) и значительно уменьшает локальное заполнение, причем упорядочение сохраняет симметрию матрицы;

алгоритм А-2 для соединений более сложных, нежели соединение на рис. 5.21, приближается по эффективности к алгоритмам А-3 и А-4;

алгоритм А-5 ориентирован на системы вида (5.25); если с его помощью устанавливать на главную диагональ единицы, то можно уменьшить число делений в (5.28).

Наиболее часто рекомендуемым является А-3. Алгоритм А-4 по некоторым оценкам наиболее эффективен среди описанных [5.11], однако используется редко из-за сложности реализации.

В заключение отметим общие свойства универсальных алгоритмов:

1. Существует принципиальная возможность выбора любого НЭЛ в качестве ведущего, что позволяет наилучшим образом удовлетворить требованиям обеспечения минимального заполнения матрицы системы ННЭ или минимального числа арифметических операций.

2. В памяти ЭВМ перед началом преобразований должны храниться все НЭЛ матрицы системы или их указатели, т. е. объем памяти ограничивает порядок решаемых систем.

3. Применение упакованных форм хранения и алгоритмов упорядочения значительно усложняет реализацию алгоритмов и оправдано лишь в тех случаях, когда необходимо вычислять характеристики многих устройств, которым соответствуют матрицы с одинаковым расположением НЭЛ. Тогда упорядочение проводится один раз, и его результаты используются во всех последующих расчетах.

К универсальным алгоритмам примыкают методы, основанные на приведении исходной матрицы к специальному виду (ленточному, блочно-диагональному, блочно-треугольному и т. д.) [5.11, 5.25]. Приведение осуществляется перестановкой строк и столбцов матрицы. Цель перестановки — сгруппировать НЭЛ матрицы в отдельных ее частях (квадратных, прямоугольных, треугольных, ленточных) так, чтобы в процессе преобразования операции проводить только с элементами этих частей. Наиболее распространено приведение к ленточному виду, когда все НЭЛ сгруппированы в «ленте» минимально возможной ширины, располагающейся вдоль главной диагонали матрицы. Тогда в памяти ЭВМ достаточно хранить только элементы «ленты», так как при исключении переменных методом Гаусса ННЭ могут образовываться только внутри «ленты». Приведение к специальному виду менее эффективно использует разреженность матрицы, так как в памяти ЭВМ необходимо хранить образующиеся части матрицы, содержащие как ненулевые, так и нулевые элементы.

## ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ

Порядок решаемых систем можно увеличить, не выходя за пределы заданного объема оперативной памяти ЭВМ, если расчленить систему на ряд подсистем. На этапе анализа каждой подсистемы в памяти ЭВМ хранятся только ее НЭЛ, а по окончании преобразований остается только окончательный результат (например, $S$-матрица соединения группы элементов). Простейшей является под-

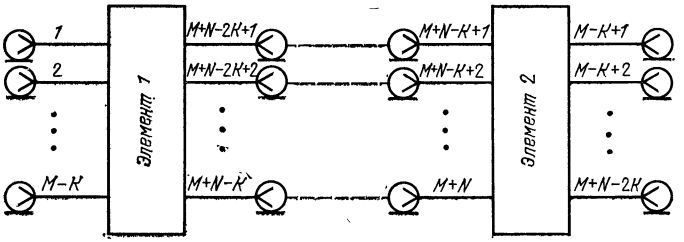



Рис. 5.22

система, описывающая два соединяемых многоплечих элемента. Ее матрица формируется так, чтобы использовать разреженность матрицы подсистемы. С этой целью вводится ряд ограничений на порядок нумерации плеч:

1. Плечи элементов разбиваются на четыре группы (рис. 5.22: $M$ — число плеч элемента *1*; $N$ — число плеч элемента *2*; $K$ — число пар соединяемых плеч), им присваиваются следующие номера: свободным плечам элемента *1* — от 1 до $M-K$, свободным плечам элемента *2* — от $M-K+1$ до $M+N-2K$, связанным плечам элемента *1* — от $M+N-2K+1$ до $M+N-K$, связанным плечам элемента *2* — от $M+N-K+1$ до $M+N$.

2. Нумерация свободных плеч в пределах групп произвольна, нумерация связанных плеч должна обязательно соответствовать рис. 5.22. При данной

нумерации подсистема уравнений в клеточной записи имеет вид

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c} [S_L]_{11} & [0] & [S_L]_{12} & [0] \\ \hline [0] & [S_R]_{11} & [0] & [S_R]_{12} \\ \hline -[S_L]_{21} & [0] & -[S_L]_{22} & [1] \\ \hline [0] & -[S_R]_{21} & [1] & -[S_R]_{22} \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} [a^L]_1 \\ [a^R]_1 \\ [a^L]_2 \\ [a^R]_2 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} [b^L]_1 \\ [b^R]_1 \\ [0] \\ [0] \end{array}\right], \quad (5.37)$$

где $[S_L]_{ij}$, $i, j = 1, 2$, — подматрицы $S$-матрицы элемента 1; $[S_R]_{ij}$, $i, j = 1, 2$, — подматрицы $S$-матрицы элемента *2*; $[1]$ — единичная подматрица; $[a^L]_{1,2}$, $[a^R]_{1,2}$ — подвекторы амплитуд падающих волн; $[b^L]_1$, $[b^R]_1$ — подвекторы амплитуд отраженных волн. Подвекторы имеют вид:

$$[a^L]_1 = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{M-K} \end{bmatrix}, \quad [a^R]_1 = \begin{bmatrix} a_{M-K+1} \\ a_{M-K+2} \\ \vdots \\ a_{n-2K} \end{bmatrix},$$

$$[a^L]_2 = \begin{bmatrix} a_{n-2K+1} \\ a_{n-2K+2} \\ \vdots \\ a_{n-K} \end{bmatrix}, \quad [a^R]_2 = \begin{bmatrix} a_{n-K+1} \\ a_{n-K+2} \\ \vdots \\ a_{n-K} \end{bmatrix},$$

$$[b^L]_1 = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{M-K} \end{bmatrix}, \quad [b^R]_1 = \begin{bmatrix} b_{M-K+1} \\ b_{M-K+2} \\ \vdots \\ b_{n-2K} \end{bmatrix},$$

где $n = M + N$ — порядок системы (5.37). Необходимо, исключив из (5.37) компоненты $[a^L]_2$, $[a^R]_2$, выразить $[b^L]_1$, $[b^R]_1$ через $[a^L]_1$, $[a^R]_1$, т. е. определить результирующую матрицу $[S^\Sigma]$ соединения. Эта задача решается различными способами.

**Метод 1** [5.19]. Из двух последних клеточных уравнений $[a^L]_2$, $[a^R]_2$ выражается через $[a^L]_1$, $[a^R]_1$:

$$[a^L]_2 = [S^R]_{22}[S_1][S_L]_{21}[a^L]_1 + ([1] + [S_R]_{21}[S_1][S_L]_{22})[S_R]_{21}[a^R]_1;$$

$$[a^R]_2 = [S_1]([S_L]_{21}[a^L]_1 + [S_L]_{22}[S_R]_{21}[a^R]_1), \quad (5.38)$$

где $[S_1] = ([1] - [S_L]_{22}[S_R]_{22})^{-1}$.

Эти выражения подставляются в первые два клеточные уравнения (5.37) и находится матрица $[S^\Sigma]$:

$$[S^\Sigma] = \left[\begin{array}{c|c} [S^\Sigma]_{11} & [S^\Sigma]_{12} \\ \hline [S^\Sigma]_{21} & [S^\Sigma]_{22} \end{array}\right], \quad (5.39)$$

где $[S^\Sigma]_{11} = [S_L]_{11} + [S_L]_{12}[S_R]_{22}[S_1][S_L]_{21}$; $[S^\Sigma]_{12} = [S_L]_{12}([1] + [S_R]_{22}[S_1][S_L]_{22})[S_R]_{21}$; $[S^\Sigma]_{21} = [S_R]_{12}[S_1][S_L]_{21}$; $[S^\Sigma]_{22} = [S_R]_{11} + [S_R]_{12}[S_1][S_L]_{22}[S_R]_{21}$.

Для реализации метода необходимо привлечь процедуру обращения матрицы порядка $K$.

**Метод 2** [5.20]. Процесс преобразования делится на $K$ шагов.

*Шаг 1.* Назовем совокупность несоединенных элементов 1-й промежуточной подцепью. Вычисляется $S$-матрица соединения 1-й промежуточной подцепи и отрезка линии нулевой длины, включаемого между какой-либо парой соединяемых плеч элементов, например $M+N-2K+1$ и $M+N-K+1$. Для вычисления можно использовать (5.39).

*Шаг 2.* Назовем полученное соединение 2-й промежуточной подцепью. Вычисляется $S$-матрица соединения 2-й промежуточной подцепи и отрезка линии нулевой длины, включаемого между следующей парой соединяемых плеч, например $M+N-2K+2$ и $M+N-K+2$.

*Шаги 3, 4, ..., $K$.* Аналогичны первым двум шагам. По окончании $K$-го шага совокупность коэффициентов $S_{ij}^{(k+1)}$, $i, j=1, 2, \ldots, M+N-2K$, образует $S$-матрицу. Вместо (5.39) алгоритмом может служить следующее рекуррентное выражение [5.9, 5.20]:

$$S_{ij}^{(p+1)}=S_{ij}^{(p)}+\{S_{mj}^{(p)}\left[\left(1-S_{lm}^{(p)}\right)S_{il}^{(p)}+S_{im}^{(p)}S_{ll}^{(p)}\right]+S_{lj}^{(p)}\left[\left(1-S_{ml}^{(p)}\right)S_{im}^{(p)}+ \\ +S_{il}^{(p)}S_{mm}^{(p)}\right]\}/\left[\left(1-S_{ml}^{(p)}\right)\left(1-S_{lm}^{(p)}\right)-S_{mm}^{(p)}S_{ll}^{(p)}\right],\quad p=1, 2, 3, \ldots, K, \qquad (5.40)$$

где $i, j=1, 2, \ldots, M+N$, кроме номеров плеч, соединенных на предыдущих шагах; $m, l$ — номера плеч, соединяемых на $p$-м шаге; $S_{ij}^{(p)}$, $S_{ij}^{(p+1)}$ — элемент матрицы (5.37) в начале и конце $p$-го шага.

**Метод 3** [5.21]. Основан на применении рекуррентных соотношений метода оптимального исключения [5.26] и состоит из $K+2$ шагов.

*Шаг 1.* В (5.37) переставляются местами два последних клеточных столбца:

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c} [S_L]_{11} & [0] & [0] & [S_L]_{12} \\ \hline [0] & [S_R]_{11} & [S_R]_{12} & [0] \\ \hline -[S_L]_{21} & [0] & [1] & -[S_L]_{22} \\ \hline [0] & -[S_R]_{21} & -[S_R]_{22} & [1] \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} [a^L]_1 \\ [a^R]_1 \\ [a^R]_2 \\ [a^L]_2 \end{array}\right]=\left[\begin{array}{c} [b^L]_1 \\ [b^R]_1 \\ [0] \\ [0] \end{array}\right]. \qquad (5.41)$$

*Шаги 2, 3, ..., $K+1$.* Проводятся с помощью рекуррентных выражений

$$S_{n-p+1,j}^{(p+1)}=\left(S_{n-p+1,j}^{(p)}-\sum_{l=1}^{K}S_{n+1-l,j}^{(p)}S_{n-p+1,n+1-l}^{(K+1)}\right)\Big/\left(1-\right. \\ \left.-\sum_{l=1}^{K}S_{n+1-l,n-p+1}^{(p)}S_{n-p+1,n+1-l}^{(p)}\right);$$

$$S_{ij}^{(p+1)}=S_{ij}^{(p)}-S_{i,n-p+1}^{(p)}S_{n-p+1,j}^{(p+1)},\ i=n-p+2, n-p+3, \ldots, n,\ j= \\ =1, 2, \ldots, n-p, \qquad (5.42)$$

где $S_{ij}^{(K+1)}$ — элемент матрицы в (5.41).

Вычисления по (5.42) выполняются последовательно для $p=K+1$, $K+2, \ldots, 2K$. По окончании вычислений последние два клеточные уравнения (5.41) преобразуются к виду

$$\left[\begin{array}{c|c|c|c} [A_1] & [A_2] & [1] & [0] \\ \hline [A_3] & [A_4] & [0] & [1] \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} [a^L]_1 \\ [a^R]_1 \\ [a^R]_2 \\ [a^L]_2 \end{array}\right]=\left[\begin{array}{c} [0] \\ [0] \end{array}\right]. \qquad (5.43)$$

В (5.43) преобразованная часть матрицы представлена в клеточном виде в соответствии с ее исходным разбиением.

*Шаг* $K+2$. Из (5.41), (5.43) определяются клеточные подматрицы в (5.39):

$$[\mathbf{S}^{\Sigma}]_{11}=[\mathbf{S}_L]_{11}-[\mathbf{S}_L]_{12}[\mathbf{A}_3];\ [\mathbf{S}^{\Sigma}]_{12}=-[\mathbf{S}_L]_{12}[\mathbf{A}_4];$$
$$[\mathbf{S}^{\Sigma}]_{21}=-[\mathbf{S}_R]_{12}[\mathbf{A}_1];\ [\mathbf{S}^{\Sigma}]_{22}=[\mathbf{S}_R]_{11}-[\mathbf{S}_R]_{12}[\mathbf{A}_2]. \qquad (5.44)$$

Амплитуды волн на внутренних входах соединения определяются через амплитуды волн на внешних входах из следующих выражений:

$$[\mathbf{a}^L]_2=[\mathbf{A}_3][\mathbf{a}^L]_1+[\mathbf{A}_4][\mathbf{a}^R]_1;$$
$$[\mathbf{a}^R]_2=[\mathbf{A}_1][\mathbf{a}^L]_1+[\mathbf{A}_2][\mathbf{a}^R]_1. \qquad (5.45)$$

**Метод 4.** Основан на использовании рекуррентных соотношений Гаусса и состоит из $K+1$ шага.

*Шаг 1.* Выражение для $[\mathbf{a}^L]_2$ из последнего клеточного уравнения (5.41) подставляется в остальные клеточные уравнения (5.41), в результате получается следующая система уравнений:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} [\mathbf{S}_L]_{11} & [\mathbf{S}_L]_{12}[\mathbf{S}_R]_{21} & [\mathbf{S}_L]_{12}[\mathbf{S}_R]_{22} \\ \hline [0] & [\mathbf{S}_R]_{11} & [\mathbf{S}_R]_{12} \\ \hline -[\mathbf{S}_L]_{21} & -[\mathbf{S}_L]_{22}[\mathbf{S}_R]_{21} & [1]-[\mathbf{S}_L]_{22}[\mathbf{S}_R]_{22} \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} [\mathbf{a}^L]_1 \\ [\mathbf{a}^R]_1 \\ [\mathbf{a}^R]_2 \end{array}\right]=\left[\begin{array}{c} [\mathbf{b}^L]_1 \\ [\mathbf{b}^R]_1 \\ [0] \end{array}\right]. \qquad (5.46)$$

*Шаги 2, 3, ..., $K+1$.* Проводится преобразование системы (5.46) с помощью рекуррентных соотношений Гаусса:

$$S^{(p+1-K)}_{n-p+1,\,j}=S^{(p-K)}_{n-p+1,\,j}/S^{(p-K)}_{n-p+1,\,n-p+1};\ S^{(p+1-K)}_{ij}=$$
$$=S^{(p-K)}_{ij}-S^{(p-K)}_{i,\,n-p+1}\,S^{(p+1-K)}_{n-p+1,\,j},\ i,\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ n-p, \qquad (5.47)$$

где $S^{(1)}_{ij}$ — элемент матрицы системы (5.46).

Вычисления по формулам (5.47) проводятся последовательно для $p=K+1,\ K+2,\ \ldots,\ 2K$. После окончания $K+1$-го шага первые $n-2K$ строк и столбцов матрицы образуют $S$-матрицу соединения.

Предложенные выше правила нумерации плеч не являются единственно возможными. Алгоритмы, аналогичные описанным, могут быть образованы, если, например, поменять местами группы соединяемых плеч. Эффективность метода вычисления $S$-матрицы соединения двух элементов определяется числом необходимых арифметических операций. Дополнительным критерием эффективности может служить также простота реализации, в частности возможность применения стандартных подпрограмм (процедур) из библиотеки используемой ЭВМ. Число операций $Y$ зависит от числа свободных ($P=n-2K$) и связанных ($Q=2K$) плеч и указано в табл. 5.2 [5.21].

Наглядное представление о соотношении числа операций дает коэффициент выигрыша, значения которого приведены у графиков на рис. 5.23 и под которым понимается отношение числа операций, необходимых для вычисления $S$-матрицы соединения двумя различными методами. Геометрические места точек, соответствующих одинаковым значениям коэффициента выигрыша, изображены в виде линии[1]. На рис. 5.23, *а* указан коэффициент выигрыша при сравнении методов 3 и 1, на рис. 5.23, *б* — методов 3 и 2, на рис. 5.23, *в* — методов 3 и 4. Из рис. 5.23 *а* видно, что при $P/n$, близком к 1, методы 1 и 3 приблизительно равнозначны. Наоборот, при $Q/n$, близком к 1, выигрыш метода 3 по сравнению с методом 1 достигает 3. В методе 2 на первых шагах вычисляются матрицы высоких

[1] Смысл имеют только точки, соответствующие четным целым $Q$ и целым $P$.

Таблица 5.2

**Число операций умножения и деления $Y$**

| Метод | Y | Y для системы (5.22) |
|---|---|---|
| 1 | $0{,}5\,(Q^3+PQ^2+P^2Q)$ | 56 |
| 2 | $\frac{1}{3}Q^3+(P+0{,}5)\,Q^2+\left(P^2+P-\frac{5}{6}\right)Q$ | 82 |
| 3 | $\frac{7}{48}Q^3+\frac{5}{8}PQ^2+0{,}5\left(P^2+0{,}5P+\frac{5}{6}\right)Q$ | 41 |
| 4 | $\frac{1}{24}Q^3+\frac{1}{4}PQ^2+\frac{1}{2}\left(P^2+\frac{2}{3}\right)Q+\frac{MN}{2}Q$ | 36 |

порядков, близких к $n$, и он заметно уступает другим методам при больших $P/n$. Достоинством методов 1 и 2 является простота их реализации. Метод 1 может быть организован как последовательность обращений к стандартным подпрограммам умножения и обращения комплексных матриц, имеющимся в библиотеках многих ЭВМ.

Перейдем к описанию наиболее распространенного декомпозиционного алгоритма вычисления $S$-матрицы соединения нескольких многоплечих элементов, который можно назвать циклическим. Суть его заключается в постепенном нара-

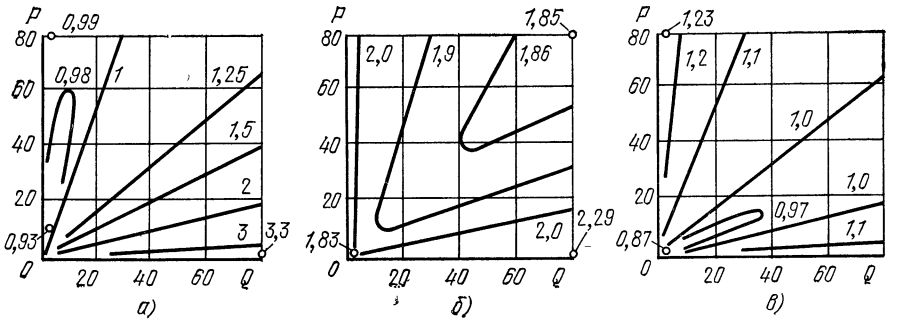



Рис. 5.23

щивании соединения, когда устройство как бы «собирается» подключением элементов по одному [5.22, 5.28]; $S$-матрицы элементов вычисляются перед началом «сборки» устройства. Число арифметических операций, требуемое для вычисления $S$-матрицы устройства, зависит от выбора 1-го элемента и порядка, в котором подключаются остальные. Для уменьшения числа операций рекомендуется руководствоваться следующим правилом [5.17]: на каждом шаге для подключения выбирается элемент, соединение которого с образованной на предыдущих шагах промежуточной подцепью имеет наименьшее число свободных плеч.

**Циклический алгоритм.** Если устройство состоит из $m$ элементов, то алгоритм строится как последовательность из $m$ — 1 шагов.

*Шаг 1.* Выбираются два элемента и вычисляется $S$-матрица их соединения (1-я промежуточная подцепь).

*Шаг 2.* Выбирается 3-й элемент и вычисляется $S$-матрица его соединения с 1-й промежуточной подцепью (2-я промежуточная подцепь) и т. д.

*Шаги 3, 4, ..., m — 1.* Аналогичны второму шагу. На каждом шаге перед вычислением $S$-матрицы соединения подсистема описывающих ее уравнений должна быть приведена к виду (5.37) перестановками строк и столбцов матрицы. При необходимости на каждом шаге вычисляется и накапливается в специально выделенных массивах матрица коэффициентов, выражающая амплитуды волн во внутренних плечах через амплитуды волн во внешних плечах. По окончании

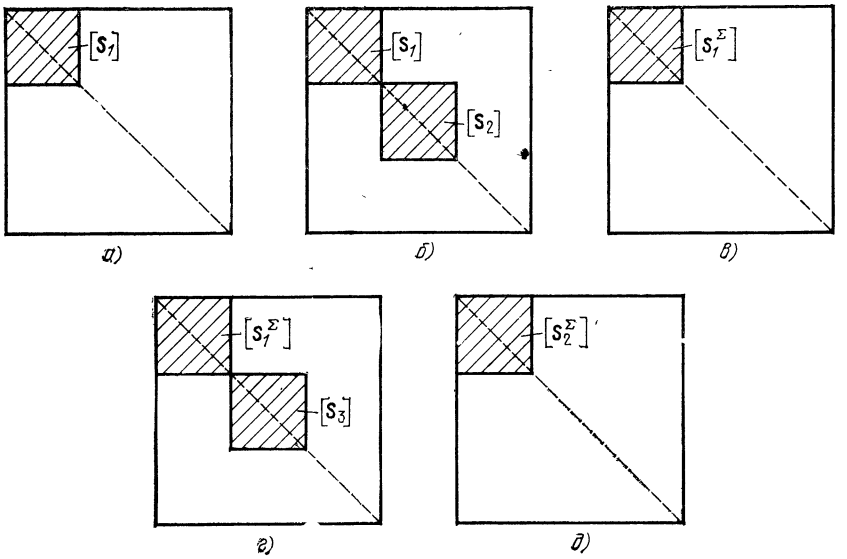



Рис. 5.24

($m$ — 1)-го шага вычисляются амплитуды волн во внутренних плечах, начиная с последней ($m$ — 1)-й промежуточной подцепи, далее амплитуды волн во внутренних плечах предпоследней промежуточной подцепи и т. д.

Предварительного вычисления $S$-матриц всех элементов можно избежать, если модифицировать циклический алгоритм следующим образом [5.24].

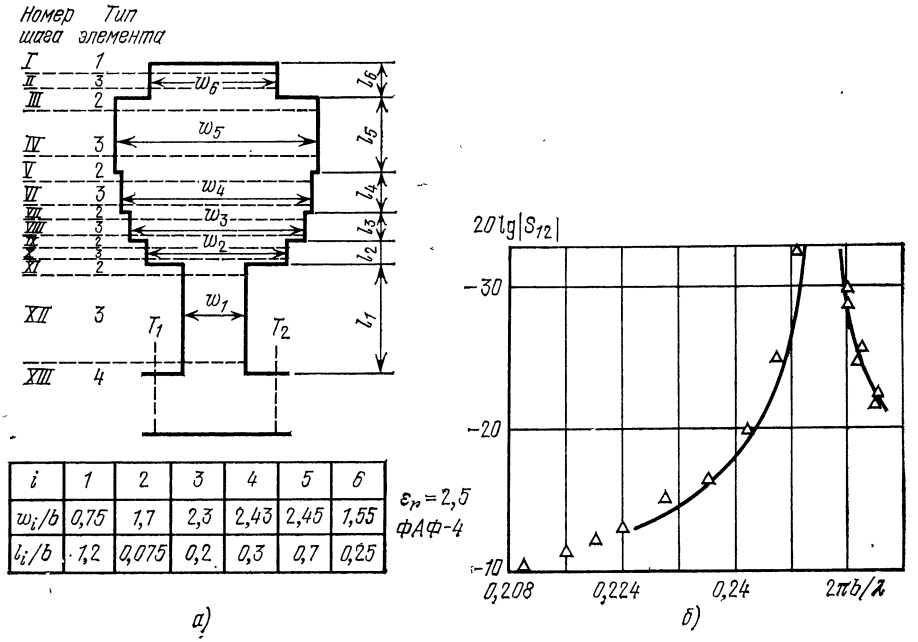
*Шаг 1.* Вычисляется $S$-матрица 1-го элемента и размещается в левом верхнем углу двумерного массива, выделенного для преобразований (рабочего поля) ($[S_1]$ на рис. 5.24, *а*).

*Шаг 2.* Вычисляется $S$-матрица 2-го элемента ($[S_2]$ на рис. 5.24, *б*) и размещается в диагональной подматрице рабочего поля, непосредственно примыкающей к матрице 1-го элемента. Вычисляется $S$-матрица 1-й промежуточной подцепи и размещается в левом верхнем углу рабочего поля, $S$-матрицы 1-го и 2-го элементов при этом не сохраняются ($[S_1^{\Sigma}]$ на рис. 5.24, *в*).

*Шаг 3.* Вычисляется $S$-матрица 3-го элемента ($[S_3]$ на рис. 5.24, *г*) и размещается в диагональной подматрице рабочего поля, непосредственно примыкающей к матрице 1-й промежуточной подцепи. Вычисляется $S$-матрица соединения 3-го элемента с 1-й промежуточной подцепью (2-й промежуточной подцепи) и размещается в левом верхнем углу рабочего поля ($[S_2^{\Sigma}]$ на рис. 5.24, *д*); $S$-матрицы 3-го элемента и 1-й промежуточной подцепи при этом не сохраняются.

*Шаги 4, 5, ..., m.* Аналогичны предыдущим. Затраты памяти ЭВМ определяются в основном максимальным порядком матрицы промежуточной подцепи.

В рассмотренном варианте циклического алгоритма подключаемые элементы и промежуточные подцепи в общем случае имеют свободные входы. Возможен и иной подход, когда промежуточная подцепь не имеет свободных входов, т. е. рассматривается как многополюсная нагрузка для очередного подключаемого элемента [5.23]. Рекуррентными выражениями алгоритма в этом случае может служить первая из формул (5.39) в методе 1, поскольку $[S_R] = [S_R]_{22}$. Алгоритмом накладывается следующее ограничение: один из соединяемых элементов (под-




| $i$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $w_i/b$ | 0,75 | 1,7 | 2,3 | 2,43 | 2,45 | 1,55 |
| $l_i/b$ | 1,2 | 0,075 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 0,25 |

Рис. 5.25

цепей) на каждом шаге не должен иметь свободных плеч, что нередко заставляет вводить в устройство в качестве дополнительных элементов отрезки линий нулевой длины.

Декомпозиция приводит к тому, что при вычислениях НЭЛ обрабатываются группами, соответствующими элементам устройства. Возникает возможность заменить индексирование каждого НЭЛ присвоением определенного индекса (кода) группе НЭЛ, соответствующей каждому элементу. Использование кода группы вместо кода элемента сокращает размеры кодовых последовательностей и упрощает подготовку исходных данных.

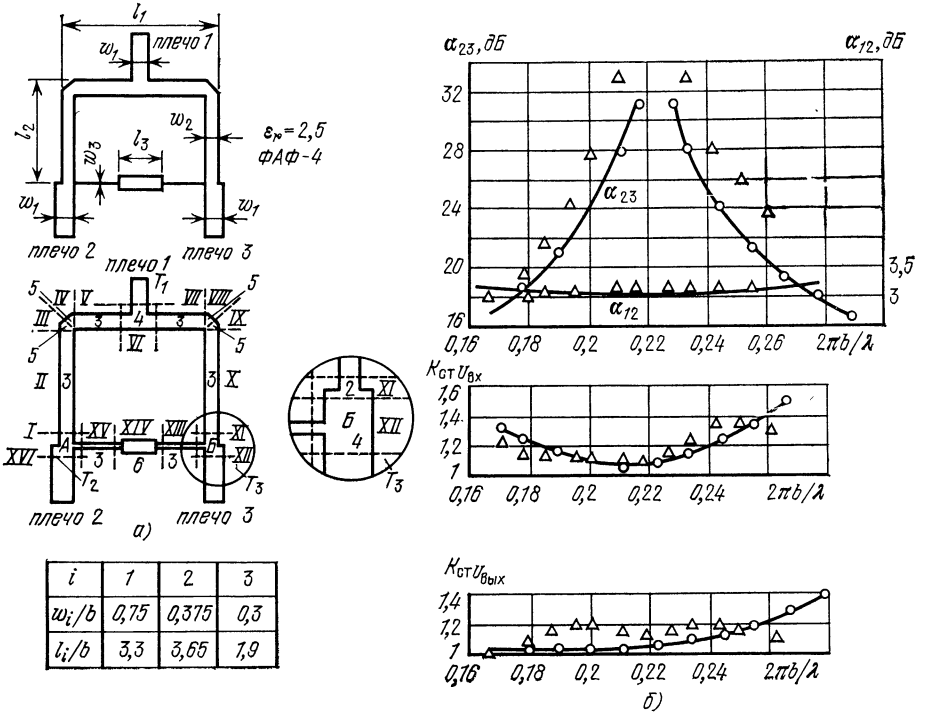
Рассмотрим примеры применения циклического алгоритма. Во всех примерах тип элемента обозначается арабскими цифрами, номер шага и номер элемента в последовательности подключаемых элементов — римскими цифрами, экспериментальные точки на графиках — треугольниками.

**Широкополосный короткозамыкатель на СПЛ.** Форма и геометрические размеры полоски приведены в таблице на рис. 5.25, *а*. Используя метод декомпозиции, разобьем устройство на 13 элементов четырех типов: тип 1 — открытый конец линии, тип 2 — стык проводников различной ширины, тип 3 — отрезок регулярной линии, тип 4 — Т-сочленение. На рис. 5.25, *а* штриховой линией показаны плоскости разбиения, совпадающие с плоскостями отсчета, относительно которых определяются $S$-матрицы элементов. Определение положений плоскостей отсчета и способы вычисления $S$-матрицы элементов описаны в § 3.2.

Вычисление $S$-матрицы короткозамыкателя строится как последовательность 13 шагов:

*Шаг I*. Вычисляется $S$ матрица открытого конца линии (в данном случае его коэффициент отражения) — элемент *I* на рис. 5.25, *а*.

*Шаг II*. Вычисляется $S$-матрица отрезка линии — элемента *II* на рис. 5.25, *а*. Подсистема уравнений, описывающая соединение элементов *I* и *II*, перестановками строк и столбцов матрицы приводится к виду (5.37). Из формул (5.39), или



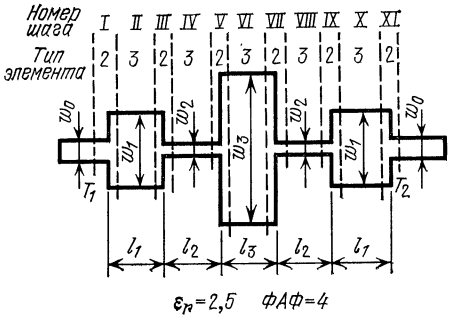

| $i$ | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| $w_i/b$ | 0,75 | 0,375 | 0,3 |
| $l_i/b$ | 3,3 | 3,65 | 1,9 |

Рис. 5.26

(5.40), или (5.41) — (5.44), или (5.41), (5.46), (5.47) (в зависимости от используемого метода) вычисляется $S$-матрица соединения элементов *I* и *II*, т. е. 1-й промежуточной подцепи.

*Шаг III*. Вычисляется $S$-матрица стыка проводников различной ширины — элемента *III* на рис. 5.25, *а*. Подсистема уравнений, описывающая соединение 1-й промежуточной подцепи и элемента *III*, перестановками строк и столбцов матрицы приводится к виду (5.37). Вычисляется $S$-матрица соединения 1-й промежуточной подцепи и элемента *III* — 2-й промежуточной подцепи и так до шага XII. Наконец, на шаге XIII вычисляется $S$-матрица Т-сочленения и после необходимых перестановок строк и столбцов — $S$-матрица короткозамыкателя, отнесенная к плоскостям отсчета Т-сочленения $T_1$ и $T_2$. На рис. 5.25, *б* приведена зависимость затухания, вносимого короткозамыкателем, от параметра $2\pi b/\lambda$.

**Кольцевой делитель мощности на СПЛ.** Форма и геометрические размеры делителя приведены на рис. 5.26, *а*. Делитель обеспечивает на центральной частоте равное деление мощности, поступающей в плечо *1*, между плечами *2* или *3* и развязку между ними. Разбиваем устройство на 16 элементов пяти типов: типы 2, 3, 4 — те же, что и для короткозамыкателя, тип 5 — излом проводника, тип 6 — последовательное точечное сопротивление. Определение положения плоскостей отсчета излома проводников и способы вычисления $S$-матриц излома и точечного резистора описаны в § 3.2 и 5.2. Т-сочленение плеч различной ширины




| $i$ | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| $w_i/h$ | 2,8 | 6,0 | 0,9 | 9,3 |
| $l_i/h$ | | 6,35 | 6,75 | 6,25 |

а)

(*А* и *Б* на рис. 5.26, *а*) заменяется приближенно соединением обычного Т-сочленения и стыка проводников различной ширины. Вычисление *S*-матрицы делителя строится как последовательность 16 шагов. Порядок вычисления *S*-матриц элементов и их «сборки» соответствует нумерации на рис. 5.26, *а* (I — XVI) . Результирующая *S*-матрица делителя определяется по отношению к плоскостям отсчета $T_1$, $T_2$, $T_3$. На рис. 5.26, *б* приведены зависимости развязки $\alpha_{23}$ между плечами *2* и *3*, $K_{стU}$ плеч *1* и *2* и переходного ослабления $\alpha_{12}$ делителя от параметра $2\pi b/\lambda$.

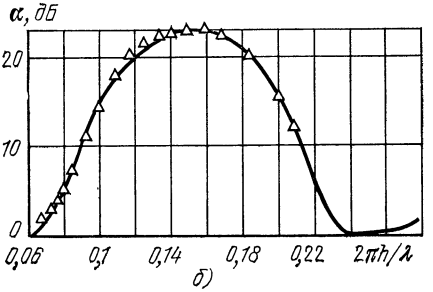



Рис. 5.27

**Фильтр нижних частот на НПЛ.** Форма и геометрические размеры фильтра приведены на рис. 5.27, *а*. Устройство разбивается на 11 элементов двух типов: 2 и 3 (те же, что и для короткозамыкателя). Вычисление *S*-матрицы строится

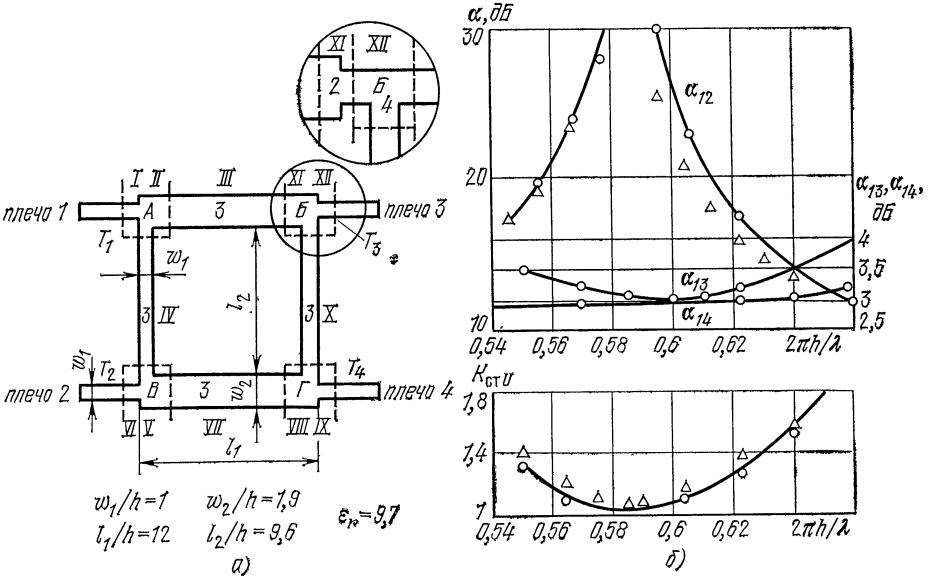



Рис. 5.28

как последовательность одиннадцати шагов. Результирующая $S$-матрица фильтра определяется по отношению к плоскостям отсчета $T_1$ и $T_2$. На рис. 5.27, *б* приведена зависимость переходного ослабления фильтра от параметра $2\pi h/\lambda$.

**Двухшлейфный мост.** Форма и геометрические размеры моста приведены на рис. 5.28, *а*. Разобъем устройство на 12 элементов трех типов: 2, 3, 4(те же, что и для короткозамыкателя). Т-сочленения с плечами разной ширины (*А*, *Б*, *В*, *Г* на рис. 5.28, *а*) так же, как и для делителя, представляем приближенно в виде соединения обычного Т-сочленения и стыка проводников различной ширины. Вычисление $S$-матрицы строится как последовательность двенадцати шагов. Результирующая $S$-матрица моста определена по отношению к плоскостям отсчета $T_1$, $T_2$, $T_3$, $T_4$. На рис. 5.28, *б* приведены зависимости развязки между плечами *1* и *2*, прямого и переходного ослабления между плечами *1* и *3*, *1* и *4* $K_{стU}$ от параметра $2\pi h/\lambda$.

Рассчитанные характеристики СВЧ компонентов, как видно из рис. 5.25—5.28, близки к экспериментальным, что свидетельствует о хорошем соответствии моделей реальным СВЧ элементам.

## ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ С ГРУППИРОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Циклическая «сборка» устройства для сложных многоэлементных устройств приводит к неоправданному возрастанию затрат машинного времени, так как многочисленным подключениям элементов с малым числом входов к промежуточным подцепям с большим числом входов соответствуют преобразования матриц высоких порядков. Чтобы сократить число таких преобразований, используются декомпозиционные алгоритмы с группированием элементов:

элементы устройства разбиваются на группы;

каким-либо способом, например с помощью циклического алгоритма, исключаются переменные, относящиеся к соединяемым плечам каждой группы элементов и вычисляются $S$-матрицы соединений, а также при необходимости матрицы, связывающие амплитуды волн во внутренних плечах групп с амплитудами волн во внешних плечах;

через $S$-матрицы соединений групп элементов определяется $S$-матрица устройства; амплитуды волн во внутренних плечах устройства определяются так же, как и в циклическом алгоритме — в обратной последовательности. Разбиение на группы для устройств высокой степени сложности может быть многоступенчатым. Выделение групп элементов неоднозначно и, в частности, может следовать следующим правилам [5.14, 5.22]: на каждом шаге для соединения выбираются два элемента (подцепи), число свободных плеч соединения которых минимально; если таких пар несколько, то из них выбирается та, число соединяемых плеч для которой максимально. Программная реализация этих правил выбора обычно приводит к группированию элементов и постепенному укрупнению групп за счет подключения новых элементов. На последних шагах группы «собираются» в устройство, т. е. нередко одновременно «собирается» большое число групп. Это заставляет резервировать в памяти ЭВМ место для большого числа матриц промежуточных подцепей.

Другой способ группирования элементов сложного устройства — выделение групп по функционально-блочному признаку. Пользователь перед началом расчета сам разбивает элементы на группы, соединение которых является функционально законченным блоком. Такому группированию благоприятствует структура реальных больших СВЧ устройств. Вычисление $S$-матрицы устройства можно разделить на укрупненные этапы [5.24].

*Этап 1.* С помощью циклического алгоритма в левой верхней диагональной подматрице выделенного для преобразований двумерного массива (рабочего поля) преобразуется подсистема уравнений, описывающая элементы 1-го блока, и вычисляется его $S$-матрица; $S$-матрицы всех элементов и промежуточных подцепей не сохраняются; $S$-матрица блока размещается в левом верхнем углу рабочего поля.

*Этап 2.* С помощью циклического алгоритма в диагональной подматрице рабочего поля, примыкающей к вычисленной $S$-матрице 1-го блока, преобразует-

ся подсистема уравнений, описывающая элементы 2-го блока, и вычисляется его $S$-матрица; $S$-матрицы элементов 2-го блока и промежуточных подцепей не сохраняются; $S$-матрица 2-го блока размещается в диагональной подматрице рабочего поля, примыкающей к $S$-матрице 1-го блока. Вычисляется $S$-матрица соединения 1-го и 2-го блоков и размещается в левом верхнем углу рабочего поля; $S$-матрицы блоков при этом не сохраняются.

*Этапы 3, 4...* Аналогичны второму.

Подключение блоков продолжается до тех пор, пока их число не будет исчерпано.

Описанный алгоритм особенно удобен, если СВЧ устройство состоит из большого числа однотипных блоков. Поскольку каждому типу блока соответствует одна последовательность подключения элементов при его «сборке», возникает возможность обозначить эту последовательность одним индексом (кодом) и использовать коды последовательностей как коды блоков. Последнее существенно упрощает подготовку исходных данных при анализе сложных СВЧ устройств.

Кратко суммируем достоинства и недостатки декомпозиционных алгоритмов.

1. Расчленение исходной системы уравнений на ряд последовательно анализируемых подсистем позволяет добиться значительной экономии памяти ЭВМ по сравнению с универсальными алгоритмами.

2. В процессе реализации кодирование НЭЛ можно заменить более простым кодированием элементов или блоков. Это упрощает подготовку исходной информации и облегчает использование программ для неподготовленного пользователя.

3. Разбиение НЭЛ на группы, соответствующие элементам или блокам, делает невозможными произвольные перестановки строк и столбцов матрицы системы. Их можно переставлять либо внутри группы, либо группами, соответствующими подсистемам, поэтому декомпозиционные алгоритмы потенциально уступают универсальным по затратам машинного времени.

В заключение отметим, что помимо рассмотренных разработано большое число методик определения $S$-матрицы соединения многоплечих элементов, в которых не используется разреженность матрицы. Эти методики с успехом используются при анализе несложных устройств. Для некоторых из них характерна интерпретация устройства как соединения двух подустройств, одним из которых служит совокупность несвязанных элементов устройства, а другим — отрезки линий нулевой или ненулевой длины, соединяющие пары внутренних плеч [5.4, 5.20].

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

В процессе анализа важно определить не только характеристики устройства, но и степень влияния на них изменений параметров входящих в устройство элементов. Характеристиками служат модули и фазы коэффициентов $S$-матрицы устройства и функции от них, например $K_{\text{ст}U}$, рабочее затухание и т. д., а параметрами — волновые сопротивления и длины отрезков линий, геометрические размеры элементов и др. Мерой степени влияния параметра $x$ на характеристику $f(x)$ является относительная чувствительность (в дальнейшем называемая чувствительностью), определяемая выражением

$$N_{fx}|_{x=x_0} = \frac{x_0}{f(x_0)} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=x_0}. \tag{5.48}$$

Например:

$$1)\ f = |S_{ij}|,\ N_{fx} = x_0 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{S_{ij}} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x}\right);$$

$$2)\ f = \arg S_{ij} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} S_{ij}}{\operatorname{Re} S_{ij}},\ N_{fx} = \frac{x_0}{f} \operatorname{Im}\left(\frac{1}{S_{ij}} \frac{\partial S_{ij}}{\partial x}\right); \tag{5.49}$$

$$3)\ f = K_{\text{ст}\,U},\quad N_{fx} = \frac{f^2-1}{2f}\, x_0 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{S_{ii}}\,\frac{\partial S_{ii}}{\partial x}\right);$$

$$4)\ f = -20 \lg |S_{ij}|,\ i \neq j,$$

$$N_{fx} = -\frac{8{,}686\cdot 10^{-f/20}}{f}\, x_0 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{S_{ij}}\,\frac{\partial S_{ij}}{\partial x}\right).$$

Для вычисления чувствительности обычно используют метод приращений и метод присоединенной цепи [5.29, 5.30, 5.37].

**Метод приращений** [5.29]. Состоит из трех шагов.

*Шаг 1.* Вычисляется по универсальному или декомпозиционному алгоритму $S$-матрица устройства при $x = x_0$. Вычисляются и запоминаются значения интересующих нас функций: $f_0 = f|_{x=x_0}$.

*Шаг 2.* Вычисляется $S$-матрица устройства при $x = x_0 + \Delta x$ и вслед за этим значения функций $f_x = f|_{x=x_0+\Delta x}$.

*Шаг 3.* Чувствительности определяются по приближенной формуле

$$N_{fx} = \frac{2x_0}{\Delta x}\,\frac{f_x - f_0}{f_x + f_0}. \tag{5.50}$$

Точность определения чувствительности тем выше, чем меньше приращение параметра $\Delta x$.

Методом приращений можно определить чувствительности всех характеристик устройства к изменениям одного выбранного параметра, 2 раза решив или преобразовав исходную систему уравнений. Часто изменение выбранного параметра влияет только на характеристики нескольких (или одного) элементов устройства. Если система преобразуется с помощью одного из универсальных алгоритмов, рекомендуется строки и столбцы матрицы, в которых НЭЛ матрицы зависят от выбранного параметра, обрабатывать в последнюю очередь. Тогда исключение переменных, относящихся к неизменяющейся части устройства, проводится один раз для $x = x_0$ и результат запоминается. Исключение остальных переменных проводится для обоих значений выбранного параметра. Аналогично, если $S$-матрица устройства вычисляется с помощью декомпозиционного алгоритма, элементы, характеристики которых зависят от выбранного параметра $x$, следует подключать в последнюю очередь; $S$-матрица промежуточного соединения, состоящего из элементов, не зависящих от $x$, в этом случае вычисляется один раз для $x = x_0$ и запоминается. Остальные элементы подключаются дважды: для $x = x_0$ и $x = x_0 + \Delta x$.

**Метод присоединенной цепи.** Состоит из пяти шагов.

*Шаг. 1.* С помощью, например, циклического алгоритма вычисляется $S$-матрица устройства, причем по ходу вычислений запоминаются все $S$-матрицы элементов и их промежуточных соединений. Задаются амплитуды падающих волн во внешних плечах устройства, число которых равно $n_{\text{в}}$:

$$a_j = 1,\ a_q = 0,\ q = 1, 2, \ldots, n_{\text{в}},\ q \neq j. \tag{5.51}$$

Способом, описанным в предыдущем разделе, с помощью (5.38) или (5.45) вычисляются волны во всех плечах всех элементов устройства при условиях возбуждения (5.51).

*Шаг 2.* Транспонируются $S$-матрицы устройства, всех элементов и промежуточных соединений элементов, что приводит к устройству, топологически эквивалентному исходному и получившему название присоединенной цепи. Во взаимных устройствах $S_{ij} = S_{ji}$, т. е. присоединенная цепь совпадает с исходной, и транспонирование не требуется. Задаются амплитуды падающих волн во внешних плечах присоединенной цепи

$$\alpha_i = 1,\ \alpha_q = 0,\ q = 1, 2, \ldots, n_{\text{в}},\ q \neq i. \tag{5.52}$$

С помощью выражений (5.38) или (5.45) вычисляются амплитуды волн во всех плечах всех элементов присоединенной цепи при условиях возбуждения (5.52).

*Шаг 3.* С помощью математических выражений, описывающих модели элементов устройства, вычисляются производные $\partial\,[\mathbf{S}^{(p)}]/\partial x$, где $p$ — номер элемента.

*Шаг 4.* Вычисляется производная $\partial S_{ij}/\partial x$ [5.32]:

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial x}=\sum_{p=1}^{Q}[\alpha^{(p)}]^{\mathrm{T}}\frac{\partial[\mathbf{S}^{(p)}]}{\partial x}[\mathbf{a}^{(p)}], \tag{5.53}$$

где $[\mathbf{a}^{(p)}]$ — определенный на шаге 1 вектор-столбец амплитуд падающих волн в плечах $p$-го элемента устройства: $[\alpha^{(p)}]$ — определенный на шаге 2 вектор-столбец амплитуд падающих волн в плечах $p$-го элемента присоединенной цепи; $Q$ — число элементов в устройстве. Суммирование в (5.53) проводится по тем элементам, характеристики которых зависят от $x$.

*Шаг 5.* По (5.49) вычисляются чувствительности.

Если необходимо оценить влияние коэффициента $S_{rs}^{(p)}$ $p$-го элемента на коэффициент $S_{ij}$ всего устройства, то мерой этого влияния может служить производная $\partial S_{ij}/\partial S_{rs}^{(p)}$, выражение для которой следует из (5.53) [5.31]:

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial S_{rs}^{(p)}}=\alpha_r^{(p)}a_s^{(p)}, \tag{5.54}$$

где $a_s^{(p)}$ — $s$-я компонента $[\mathbf{a}^{(p)}]$, $\alpha_r^{(p)}$ — $r$-я компонента $[\alpha^{(p)}]$.

Метод присоединенной цепи и равенство (5.53) основаны на теореме Теллегена [5.29. 5.30], из которой вытекает соотношение между амплитудами волн в плечах двух топологически эквивалентных соединений многоплечих СВЧ элементов [5.31]:

$$\sum_{p=1}^{n}(\beta_p a_p-\alpha_p b_p)=0, \tag{5.55}$$

где $a_p$, $b_p$ — амплитуды соответственно падающей и отраженных волн на $p$-м входе первого соединения. Величины $\alpha_p$, $\beta_p$ имеют тот же смысл для $p$-го входа второго соединения. Суммирование в (5.55) проводится по всем плечам всех элементов соединения, включая нагрузки и генераторы, подключаемые ко всем внешним плечам. Метод присоединенной цепи выгоден в тех случаях, когда требуется рассчитать чувствительности одной функции к изменениям большого числа параметров, поскольку трудоемкие операции определения векторов $[\mathbf{a}^{(p)}]$ и $[\alpha^{(p)}]$ проводятся только один раз.

**Пример 5.7.** Рассмотрим расчет чувствительностей для соединения двух элементов (см. рис. 5.21): элемент *1* — идеально согласованные одинаковые связанные отрезки линий, электрическая длина которых $\pi/2$; элемент *2* — отрезок линии, электрическая длина которого $\varphi$. Выпишем отличные от нуля коэффициенты $S$-матрицы системы (5.22):

$$S_{12}=S_{21}=S_{34}=S_{43}=k_{\text{св}};\quad S_{13}=S_{31}=S_{24}=S_{42}=-\mathrm{j}\sqrt{1-k_{\text{св}}^2};$$
$$S_{56}=S_{65}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}. \tag{5.56}$$

*Шаг 1.* Отличные от нуля элементы матрицы $[\mathbf{S}^{\Sigma}]$ согласно (5.39) равны

$$S_{12}^{\Sigma}=S_{21}^{\Sigma}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}(\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}-k_{\text{св}})/(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-k_{\text{св}}), \tag{5.57}$$

а матриц $[\mathbf{S}^{(p)}]$

$$S_{12}^{(1)}=S_{21}^{(1)}=S_{34}^{(1)}=S_{43}^{(1)}=k_{\text{св}};\quad S_{13}^{(1)}=S_{31}^{(1)}=S_{24}^{(1)}=S_{42}^{(1)}=-\mathrm{j}\sqrt{1-k_{\text{св}}^2};$$
$$S_{12}^{(2)}=S_{21}^{(2)}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}.$$

Условия возбуждения устройства: $a_1=1$, $a_2=0$. Из (5.38) определяем

$$[\mathbf{a}^{(1)}]^{\mathrm{T}}=[1:0:0:-\mathrm{j}c\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}];\quad [\mathbf{a}^{(2)}]^{\mathrm{T}}=[-\mathrm{j}c:0], \tag{5.58}$$

где $c=\sqrt{1-k_{\text{св}}^2}\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}/(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-k_{\text{св}})$.

*Шаг 2.* Поскольку элементы устройства взаимны, транспонировать их $S$-матрицы не нужно. Условия возбуждения присоединенной цепи $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$. Из (5.38) определяем

$$[\alpha^{(1)}]^{\mathrm{T}} = [0 \vdots 1 \vdots -\mathrm{j}c\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi} \vdots 0]; \quad [\alpha^{(2)}]^{\mathrm{T}} = [0 \vdots -\mathrm{j}c]. \tag{5.59}$$

*Шаг 3.* С помощью (5.56) находим производные

$$(S_{12})'_{k_{\text{св}}} = 1; \quad (S_{12})'_{\varphi} = 0; \quad (S_{13})'_{k_{\text{св}}} = \mathrm{j}k_{\text{св}}/\sqrt{1-k_{\text{св}}^2}; \quad (S_{13})'_{\varphi} = 0; \quad (S_{56})'_{k_{\text{св}}} = 0;$$

$$(S_{56})'_{\varphi} = -\mathrm{j}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}. \tag{5.60}$$

*Шаг 4.* Подставляя (5.58) — (5.60) в (5.53), получаем

$$\frac{\partial S_{21}^{\Sigma}}{\partial k_{\text{св}}} = \frac{\mathrm{e}^{2\mathrm{j}\varphi}-1}{(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-k_{\text{св}})^2}; \quad \frac{\partial S_{21}^{\Sigma}}{\partial \varphi} = \mathrm{j}\,\frac{(1-k_{\text{св}}^2)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}}{(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-k_{\text{св}})^2}. \tag{5.61}$$

Из (5.49) с учетом (5.57), (5.61) определяем чувствительности модуля $M$ и фазы $\Phi$ коэффициента $S_{21}^{\Sigma}$:

$$N_{Mk_{\text{св}}} = 0; \quad N_{M\varphi} = 0;$$

$$N_{\Phi k_{\text{св}}} = 2k_{\text{св}} \sin\varphi / \langle (1+k_{\text{св}}^2 - 2k_{\text{св}}\cos\varphi)\,\{\pi + \operatorname{arctg}[(1-k_{\text{св}}^2)\sin\varphi]/[(1+k_{\text{св}}^2)\times$$
$$\times \cos\varphi - 2k_{\text{св}}]\}\rangle;$$

$$N_{\Phi\varphi} = (1-k_{\text{св}}^2)\,\varphi / \langle (1+k_{\text{св}}^2 - 2k_{\text{св}}\cos\varphi)\,\{\pi +$$
$$+ \operatorname{arctg}[(1-k_{\text{св}}^2)\sin\varphi]/[(1+k_{\text{св}}^2)\cos\varphi - 2k_{\text{св}}]\}\rangle.$$

## 5.4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СВЧ УСТРОЙСТВ

### ЭТАПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассмотрим изображенную на рис. 5.29 примерную структурную схему процесса автоматизированного проектирования [5.33]. На рисунке: *А* — результат сравнения удовлетворителен? *В* — можно ли в данной структуре получить лучшие результаты? *С* — есть ли еще виды возможных структур? Операции, формализация которых до машинного уровня пока полностью невозможна и поэтому выполняемые человеком, обозначены буквой Ч, операции, выполняемые ЭВМ, — буквой М, операции, выполнение которых в зависимости от конкретных обстоятельств следует поручить либо человеку, либо ЭВМ—ЧМ.

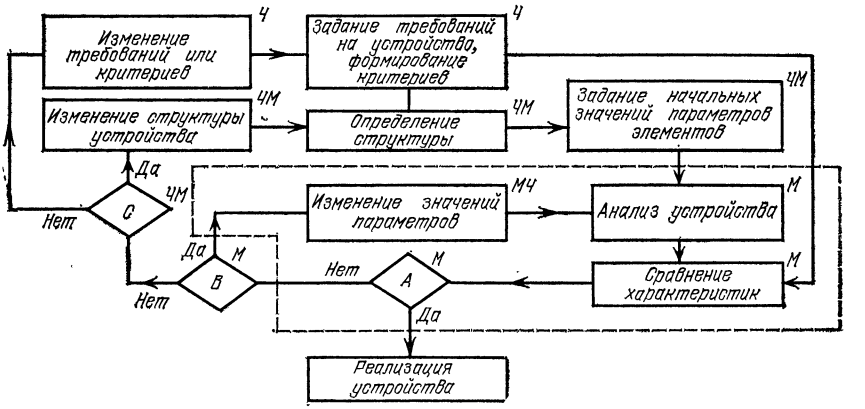



Рис. 5.29

Задание требований на устройство — операция, являющаяся внешней по отношению к процессу проектирования, выполняется, как правило, человеком до начала разработки. Формирование критериев является одним из важнейших этапов при автоматизированном проектировании. Критерий следует понимать как некоторую величину, характеризующую близость получаемых при проектировании характеристик к требуемым. Выбор того или иного критерия определяется целевой функцией, способы формулирования которой описаны ниже. Заданные требования могут оказаться невыполнимыми в конкретных обстоятельствах, поэтому возможна соответствующая их корректировка.

Определение структуры устройства — этап, в котором решающую роль играют эрудиция и опыт разработчика, так как одно и то же по назначению устройство может иметь различные структуры, а алгоритмы выбора оптимальной структуры существуют для ограниченного класса устройств. Кроме того, следует учитывать, что для выбранной структуры должен существовать метод анализа, способный с необходимой точностью определить характеристики.

Задание начального значения параметров элементов в значительной степени определяет результаты всего проектирования и осуществляется как на ЭВМ, так и человеком [5.41]. Используются три основных способа выбора начальных значений:

а) выбираются случайным образом из всей области допустимых значений;

б) выбирается наиболее близкое по структуре устройство, для которого существует классический способ синтеза. Результаты синтеза берутся в качестве начальных. Способ применим в основном при параметрическом синтезе устройств типа каскадного соединения четырехполюсников;

в) используются сечения многомерной поверхности, определяемой целевой функцией, и находится область, содержащая глобальный экстремум.

Анализ устройства — операция, целью которой является однократное определение всех необходимых характеристик устройства в условиях, когда полностью определены структура и значения параметров элементов. Формулы для соответствующего анализа приведены в гл. 2, 3 и § 5.1.

Сравнение характеристик — этап, на котором определяется соответствие характеристик, полученных в результате анализа, требуемым; он чаще всего заключается в вычислении значения целевой функции (5.67). На рис. 5.26 штриховой линией выделена область параметрического синтеза (используются также термины итеративный, структурный), куда кроме анализа и сравнения входят условный оператор $A$ и операция изменения значений параметров элементов. Последнее осуществляется с помощью специальных программ минимизации [5.42—5.45] до тех пор, пока характеристики не будут удовлетворять предъявляемым требованиям.

Изменение структуры устройства — операция, выполняемая в основном человеком. К исключениям следует отнести изменение структуры устройства типа фильтров, линий задержки и т. д., для которых возможно автоматическое добавление звеньев.

Изменение требований или критериев может оказаться необходимым, когда исчерпаны все возможности выбранных структур, а характеристики остаются неудовлетворительными.

Ценность полученных результатов машинного расчета характеристик устройства зависит от совпадения их с характеристиками реального устройства, изготовленного по расчетным данным. Поэтому, рассматривая весь круг вопросов, связанных с применением автоматизированных методов в разработках СВЧ устройств, необходимо отметить важность введения перед этапом реализации этапа определения чувствительностей характеристик устройства (см. § 5.3) или, что предпочтительнее, но и представляет большие трудности, этапа расчета и анализа допусков.

## ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Анализ устройства позволяет установить зависимость одной или $m$ его реальных характеристик $f_i$, $i = 1, 2, \ldots, m$, таких, как, например, модуль или фаза коэффициента передачи, $K_{\text{ст}\,U}$ от параметров $x_k$, $k = 1, 2, \ldots, n$, где $n$ — число

варьируемых параметров (волновые сопротивления, электрические длины отрезков линий, емкости, индуктивности и т. д.). Область $X$ изменения параметров, как правило, ограничена неравенствами вида

$$x_{k\text{н}} \leqslant x_k \leqslant x_{k\text{в}}, \tag{5.62}$$

вытекающими из условий реализуемости. Кроме того, на выбор параметров могут быть наложены функциональные ограничения вида

$$v_p\,(x_1,\ldots,\,x_n) = 0,\ p = 1,\ 2,\ \ldots,\ s;$$
$$t_u\,(x_1,\ldots,\,x_n) \geqslant 0,\ u = 1,\ 2,\ \ldots,\ q, \tag{5.63}$$

вытекающие, в частности, из условий устойчивости. Функции $f_i$ зависят также от переменных $r_j$, $j = 1, 2, \ldots, l$, которые могут иметь смысл температуры, частоты, времени и т. п. Область $R$ изменения переменных обычно ограничена неравенствами

$$r_{j\text{н}} \leqslant r_j \leqslant r_{j\text{в}}. \tag{5.64}$$

Целью разработки конкретного устройства является получение некоторых желаемых характеристик $g_i$, т. е. функции $f_i$ и $g_i$ должны быть «близки» друг другу согласно некоторому критерию. Выбор того или иного критерия является самостоятельной задачей и проводится в соответствии с назначением устройства и его типом. Если характеристики должны удовлетворять определенным требованиям в полосе частот, обычно используют критерий наименьших квадратов и минимаксный критерий, а также их многочисленные модификации.

Критерий наименьших квадратов связан с вычислением ряда чисел

$$\rho_i\,(X) = \int\limits_{r_{1\text{н}}}^{r_{1\text{в}}} \cdots \int\limits_{r_{l\text{н}}}^{r_{l\text{в}}} (f_i - g_i)^2\, dr_1 \ldots\, dr_l \tag{5.65}$$

и при параметрическом синтезе фильтрующих и согласующих устройств приводит к амплитудно-частотным характеристикам типа Баттерворта. В конкретных случаях операция интегрирования заменяется многомерным суммированием по ряду точек из области $R$. Как показал опыт, в заданной полосе частот число частотных точек $N$, в которых определяются амплитудные и фазовые характеристики, должно быть примерно вдвое больше числа резонансных звеньев. При меньшем числе точек существует реальная возможность потери одного из максимумов.

Минимаксный критерий связан с определением ряда чисел

$$\rho_i\,(X) = \max_R |\, f_i - g_i \,|, \tag{5.66}$$

т. е. на каждой характеристике находится ее максимальное отклонение в области изменения независимых переменных $R$. Операция определения максимума выполняется итеративными методами и сводится к многократному анализу устройства, что в зависимости от сложности устройства и точности определения максимума может потребовать значительных затрат машинного времени. Кроме того, при построении целевой функции по минимаксному критерию на многомерной поверхности целевой функции, как правило, образуется ребро. В результате процесс поиска осциллирует вокруг ребра и прекращается, не дойдя до точки минимума. Поэтому при прочих равных условиях предпочтение отдают критерию наименьших квадратов или его модификации.

*Целевой* называется функция

$$F = \sum_{i=1}^{m} A_i\, \rho_i\,(X), \tag{5.67}$$

где $A_i$ — весовые коэффициенты, характеризующие значимость той или иной характеристики по отношению к другим. Очевидно, что минимальное значение $F$ соответствует случаю, когда реальные характеристики устройства $f_i$ наиболее близки в соответствии с выбранным критерием к требуемым характеристикам $g_i$, т. е. когда $f_i \to g_i$. Поэтому процесс оптимизации и заключается в поиске ми-

нимума функции (5.67) в многомерном пространстве $X$. Ограничения (5.62) и (5.63) выделяют в пространстве $X$ некоторую область (в частном случае линию). Минимум функции (5.67) может располагаться как внутри области, так и на ее границе [5.35].

В качестве примера выпишем целевую функцию, которую удобно использовать при параметрическом синтезе каскадно соединенных четырехполюсников и которая является одной из реализаций критерия наименьших квадратов

$$F=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{m}\frac{A_i}{2}\left[\left(\frac{f_{ik}}{g_{ik}}-1\right)^2+\left(\frac{g_{ik}}{f_{ik}}-1\right)^2\right], \qquad (5.68)$$

где $f_{ik}$ — значение $i$-й характеристики, получаемое в результате анализа на частоте $\omega_k$; $g_{ik}$—требуемое значение той же характеристики на той же частоте. Суммирование в (5.68) проводится по $m$ слагаемым, каждое из которых относится к определенному типу характеристики, и по $N$ точкам частотного диапазона. Функция (5.68) обеспечивает [5.48] равную чувствительность к отклонению реальных характеристик от требуемых в большую и меньшую стороны.

При параметрическом синтезе устройств, для которых допуски на характеристики заранее известны, можно воспользоваться следующей целевой функцией:

$$F=\sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{m}\left\{\frac{|\,|f_{ik}-g_{ik}|-\Delta g_{ik}|-(|f_{ik}-g_{ik}|-\Delta g_{ik})}{2\,|f_{ik}-g_{ik}|}\right\}^2, \qquad (5.69)$$

где $\Delta g_{ik}$ — допуск на $i$-ю характеристику на $k$-й частоте. Функция (5.69) изменяется от нуля, когда все характеристики находятся в пределах допусков, до 1, когда отличие характеристик от допустимых стремится к бесконечности. Применение функции (5.69) оправдано при небольшом числе (от одной до трех) характеристик. При большем их числе в результате оптимизации достигается не наилучший результат, а лишь допустимый; при заданных допусках возможно отсутствие удовлетворительного решения; процесс параметрического синтеза может остановиться после того, как часть характеристик окажется в пределах допусков, а другая часть останется за их пределами.

Целевая функция, основанная на статистическом критерии, определяется выражением (5.76).

Рассмотренные критерии и целевые функции позволяют ставить и решать задачи параметрического синтеза СВЧ устройств, требуемые характеристики которых должны достигаться в заранее определенной области изменения независимых переменных (в частности, значений параметров элементов) и при заранее определенной области рабочих частот. Если эти условия не выполняются, возникает необходимость в формировании специальных критериев. Рассмотрим, например, задачу параметрического синтеза устройства, согласующего два комплексных сопротивления в максимальной полосе частот [5.34]: найти параметры элементов $x_k$ (электрические длины и $Z_в$ отрезков линий), при которых значения частот $\omega_1$ и $\omega_2$, являясь корнями уравнения

$$|\Gamma(\omega)|=|\Gamma(x_k,\ Z_1(j\omega),\ Z_2(j\omega),\ \omega)|=|\Gamma|_{доп},$$

обеспечивают максимум величины

$$\Delta\omega=\min\,[(\omega_0-\omega_1),\ (\omega_2-\omega_0)] \qquad (5.70)$$

при ограничениях

$$|\Gamma(\omega)|\leqslant|\Gamma|_{доп},\quad \omega\in(\omega_1,\ \omega_2); \qquad (5.71)$$

$$x_{kн}\leqslant x_k\leqslant x_{kв}. \qquad (5.72)$$

Здесь $Z_1(j\omega)$, $Z_2(j\omega)$ — согласуемые сопротивления; $|\Gamma|_{доп}$ — допустимое значение коэффициента отражения; $\omega_0$ — центральная частота полосы согласования. При $\omega_1\leqslant\omega_0\leqslant\omega_2$ введем функцию

$$F_1=-p_1\,(A_1f_1+A_2f_2), \qquad (5.73)$$

где $f_1 = \min[(\omega_0 - \omega_1), (\omega_2 - \omega_0)]$; $f_2 = \omega_2 - \omega_1$, которая, как следует из определения, вычисляется только тогда, когда найденные корни $\omega_1$ и $\omega_2$ располагаются с разных сторон от $\omega_0$; $p_1$ — константа. Функция $F_1$ изменяется от нуля, когда на частоте $\omega_0$ коэффициент отражения равен $|\Gamma|_{доп}$ (на остальных частотах $|\Gamma(\omega)| > |\Gamma|_{доп}$), до $-\infty$, когда полоса согласования бесконечна. Если $\omega_0 < \omega_1 < \omega_2$ или $\omega_1 < \omega_2 < \omega_0$, т. е. существует некоторая область согласования, не включающая $\omega_0$, вычисляется функция

$$F_2 = p_2|\omega_0 - \omega_c|, \tag{5.74}$$

где $\omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2$; $p_2$ — константа.

Совокупность (5.73) и (5.74) образует искомую целевую функцию, определенную на всей оси $\omega$. Неравенство (5.71) удовлетворяется автоматически. Весовые коэффициенты $A_1$ и $A_2$ позволяют сбалансировать требования к абсолютной ширине полосы согласования и симметричности ее относительно частоты $\omega_0$. Константы $p_1$ и $p_2$ играют роль масштабных коэффициентов.

Учет ограничений вида (5.62)—(5.64) в общем случае является сложной задачей. Метод минимизации либо должен учитывать ограничения, либо задача на поиск минимума с ограничениями (условная минимизация) должна быть преобразована в задачу без ограничений (безусловная минимизация). Существующие методы условной минимизации в настоящее время не находят широкого применения в задачах параметрического синтеза. Чаще применяется второй способ — преобразование в задачу безусловной минимизации. При наличии функциональных ограничений типа (5.64) применяются методы штрафных функций [5.36], а ограничения вида (5.62) и (5.63) учитываются с помощью подходящей замены переменных. В табл. 5.3 приведены наиболее часто применяемые формулы прямой и обратной замен переменных для ограничений различного вида. Формулы прямой замены используются при каждом вычислении целевой функции, что позволяет в алгоритме минимизации использовать неограниченные значения переменных $y_k$. Формулы обратной замены используются в тех шагах программы, где необходимо от ограниченных переменных $x_k$ перейти к неограниченным $y_k$. Приведенные формулы не исчерпывают всех возможных замен. Ограничения 1, 2 и 5 относятся к незамкнутым областям, и соответствующие формулы замены однозначны, ограничения 3, 4 и 6 — к областям с границей, и формулы замены имеют периодический и неоднозначный характер, что затрудняет их использование. Отметим, что при автоматизированном проектировании ограниченная область определения нередко может быть заменена областью без границы, поскольку физические соображения, положенные в основу выбора конкретных границ, имеют, как правило, качественный характер.

Таблица 5.3

**Формулы замены переменных**

| Номер | Ограничение | Формула прямой замены | Формула обратной замены |
|---|---|---|---|
| 1 | $x_k < a$ | $x_k = a - e^{y_k}$ | $y_k = -\ln(a - x_k)$ |
| 2 | $x_k > b$ | $x_k = b + e^{y_k}$ | $y_k = \ln(x_k - b)$ |
| 3 | $x_k \leqslant a$ | $x_k = a - y_k^2$ | $y_k = \sqrt{a - x_k}$ |
| 4 | $x_k \geqslant b$ | $x_k = b + y_k^2$ | $y_k = \sqrt{x_k - b}$ |
| 5 | $b < x_k < a$ | $x_k = (a+b)/2 + [(a-b)/\pi]\operatorname{arctg} y_k$ | $y_k = \operatorname{tg}[\pi(2x_k - b - a)/2(a-b)]$ |
| 6 | $b \leqslant x_k \leqslant a$ | $x_k = b + (a-b)\sin^2 y_k$ | $y_k = \arcsin \times \sqrt{(x_k - b)/(a-b)}$ |

Сущность метода штрафных функций, используемого при функциональных ограничениях (5.63), заключается во введении модернизированной целевой функции вида

$$P(x, y)=F(x)-y\sum_{i=1}^{q}\ln t_u(x)+\frac{1}{y}\sum_{p=1}^{s}v_p(x)$$

и нахождении последовательности минимумов этой функции при дискретном уменьшении $y$. Вычисления заканчиваются, когда

$$|P(x, y_{n-1})-P(x, y_n)|<\varepsilon,\ \varepsilon>0,$$

где $\varepsilon$ — заданное малое число. Более подробно с методом штафных функций можно ознакомиться, обратившись к [5.36]. Алгоритмы и программы поиска минимума функций многих переменных описаны в [5.42—5.45].

## АНАЛИЗ ДОПУСКОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК

В результате параметрического синтеза могут быть получены значения параметров элементов схемы, при которых характеристики устройства наилучшим образом соответствуют требуемым. Однако до практической реализации устройства необходимо определить чувствительности (§ 5.3) его характеристик к вариациям значений параметров элементов, поскольку значительная чувствительность может существенно исказить ожидаемые характеристики. Кроме того, информация о чувствительности является основой для задания допусков и их оптимизации, а также оценки правомерности требований к устройству и их соответствующей балансировки. Рассмотрим многокритериальную задачу параметрического синтеза, типичную для СВЧ устройств. Целевая функция вида

$$F=\sum_{i=1}^{m}A_i(f_i-g_i)^2 \tag{5.75}$$

в точке экстремума минимальна, т. е.

$$\frac{\partial F}{\partial x_k}=\sum_{i=1}^{m}2A_i(f_i-g_i)\frac{\partial f_i}{\partial x_k}=\sum_{i=1}^{m}2A_i(f_i-g_i)N_{f_i x_k}=0.$$

Это означает, что в рамках заданной структуры и для полученного набора характеристик $f_i$ сумма чувствительностей всех характеристик к вариации каждого параметра схемы с определенным весом $2A_i(f_i-g_i)$ равна нулю. Уменьшение чувствительностей отдельных характеристик выводит функцию $F$ из точки экстремума, и совокупная характеристика не будет наилучшей в смысле принятого критерия. Если чувствительность превышает допустимые пределы, то имеется только один путь ее уменьшения — ослабление одного или нескольких требований $g_i$, Следовательно, минимизацию чувствительности необходимо проводить одновременно с параметрическим синтезом, т. е. использовать целевую функцию, например, в виде [5.38]:

$$F=\sum_{i=1}^{m}A_i(f_i-g_i)^2+\sum_{i=1}^{m}B_i|N_i|,$$

где $B_i$ — весовые коэффициенты при чувствительностях отдельных характеристик.

Когда есть возможность априорного установления допусков на характеристики $\Delta_i|g_i|$, более наглядной является формулировка целевой функции

$$F=\sum_{i=1}^{N}C_i+\sum_{i=1}^{N}B_i|N_i'|,$$

где: а) $C_i = 0$, если $|f_i - g_i| \leqslant \Delta_i|g_i|$; б) $C_i = A_i (f_i - g_i)^2$, если $|f_i - g_i| > \Delta_i |g_i|$. Приведенная формулировка позволяет установить соответствие между допусками $\Delta_i|g_i|$ и чувствительностью. В частности, если соответствующие весовые коэффициенты $A_i$ достаточно велики, то от начальной точки, в которой справедливо условие б), $F$ будет уменьшаться в основном за счет уменьшения $C_i$, а по достижении точки, соответствующей условию а), — за счет уменьшения чувствительностей.

Этапы анализа и учета чувствительностей при проведении параметрического синтеза позволяют в некоторой степени избежать или, по крайней мере, предвидеть существенные отклонения характеристик от расчетных. Однако полной совокупности данных, необходимых для расчета допусков на значения параметров элементов, анализ чувствительностей не предоставляет.

Более точным и полным, но требующим значительно большего счетного времени, является метод статистических испытаний (Монте-Карло). Схема возможного алгоритма анализа допусков этим методом представлена на рис. 5.30. Основой алгоритма является циклическое определение характеристик устройства при случайных выборках значений параметров его элементов из соответствующих полей допусков. По отношению к схеме на рис. 5.26 этапы определения случайных величин параметров элементов и накопления результатов являются новыми. Алгоритмы датчиков случайных чисел подробно описаны в [5.39].

Определение случайных величин из полей допусков не является простой задачей вследствие особенностей технологии изготовления, существенно влияющих на вид результирующего распределения величины в пределах его поля допуска. Тем не менее в большинстве случаев приемлемой аппроксимацией является нормальное или равномерное распределение. К величинам, имеющим нормальное распределение, следует отнести, например, ширину (или, что эквивалентно, волновое сопротивление) МПЛ, зазор между микрополосками в направленных ответвителях и т. п. Параметры навесных компонентов 1-го класса точности, таких, как постоянные резисторы или конденсаторы, имеют распределение, близкое к равномерному. Распределение параметров тех же элементов II-го и последующих классов можно аппроксимировать нормальным с вырезанной центральной областью. На рис. 5.31 приведены гистограммы распределения емкостей конденсаторов типа К10-9 емкостью 20 пФ с допусками ±5% (*а*) и ±10% (*б*) [5.40]. Как видно из рис. 5.31, *а*, распределение близко к равномерному, а на рис. 5.31 в результате отбора 5%-ных конденсаторов распределение соответствует нормальному с изъятой центральной областью. Конкретные пара-

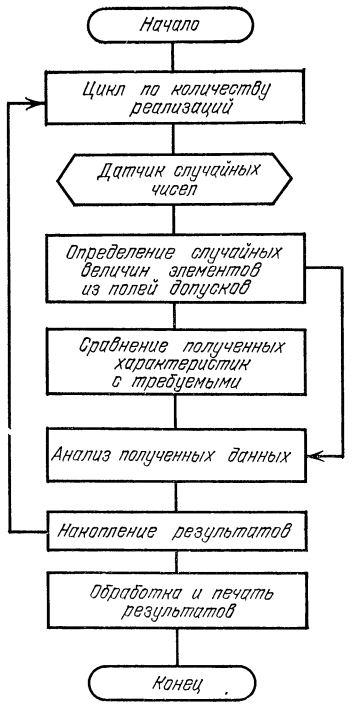



Рис. 5.30

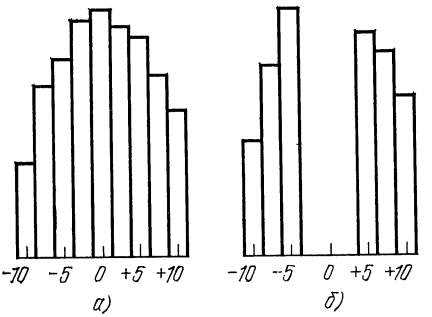



Рис. 5.31

метры закона распределения предсказать затруднительно, вследствие чего для получения необходимых данных следует исследовать партию элементов.

Корреляционные связи между значениями параметров пассивных навесных компонентов в СВЧ устройствах практически отсутствуют. При изготовлении СВЧ устройств на различных вариантах полосковых линий в едином технологическом цикле такие параметры, как волновое сопротивление, электрическая длина, индуктивности печатных катушек, емкости печатных конденсаторов, зависят от ряда общих параметров — толщины и диэлектрической проницаемости $\varepsilon_r$ подложки, характеристик материалов металлических и диэлектрических слоев и т. п. Кроме того, на параметры подобных элементов оказывают совокупное влияние особенности конкретного технологического процесса (см. гл. 4 и 6). Например, удельные потери в МПЛ зависят от способа металлизации (минимальны при вакуумном напылении и максимальны при толстопленочной технологии). Степень ухода геометрических размеров микрополосков от номинальных определяется конкретной технологией фотолитографии и травления. При толстопленочной технологии увеличение ширины микрополосковых линий из-за растекания пасты практически не зависит от плотности рисунка и ширины полоски; при тонкопленочной технологии подтрав, т. е. изменение ширины линии, зависит от плотности рисунка и т. д.

Таким образом, при формировании случайных величин электрических характеристик элементов с распределенными параметрами следует учитывать общую для всего устройства и независимые составляющие отклонений. Независимые составляющие являются следствием клиновидности подложки, неоднородности ее материала, наличия раковин в диэлектрике и металлических слоях и т. п. Полученные В. М. Семеновым с помощью линеаризации зависимости для моделирования случайных разбросов электрических параметров отрезков МПЛ на подложках с высоким $\varepsilon_r$ имеют вид

$$Z_{\text{в}} = Z_{\text{в}0}\left(1 - 0{,}0047\,(\Delta_1 s_1 + \Delta_2 s_2) + 5\cdot 10^{-5}\,(150 - Z_{\text{в}})\,(\Delta_3 s_3 + \Delta_4 s_4) - \right.$$

$$\left. - \frac{0{,}3}{110 - Z_{\text{в}}}\,(\Delta_5 s_5 + \Delta_6 s_6)\right),$$

$$\theta = \theta_0\,(1 + 0{,}0047\,(\Delta_1 s_1 + \Delta_2 s_2)),$$

где $Z_{\text{в}0}$ — номинальное значение волнового сопротивления; $\Delta_1$ — допустимое отклонение величины $\varepsilon_r$ по всей подложке; $\Delta_2$ — допустимое местное отклонение $\varepsilon_r$; $\Delta_3$ — допустимое отклонение толщины подложки; $\Delta_4$ — допустимое местное отклонение толщины подложки; $\Delta_5$ — допустимое общее отклонение ширины полосковой линии; $\Delta_6$ — допустимое местное отклонение полосковой линии; $s_i$ — соответствующие нормально распределенные в интервале $\pm 1$ числа с нулевым средним и дисперсиями $\sigma_i$; $\theta_0$ — номинальная электрическая длина. Допустимые отклонения выражаются в процентах, точность моделирования для подложки из ситалла СТ32-1 — не хуже 1,5% при 20 Ом $\leqslant Z_{\text{в}0} \leqslant$ 90 Ом.

Для моделирования случайных разбросов параметров элементов с сосредоточенными параметрами можно пользоваться формулой

$$y_i = y_{i0}\,(1 + 0{,}01\Delta_{\text{о}}\, s_{\text{о}} + 0{,}01\Delta_{\text{н}}\, s_1),$$

где $y_i$ — моделируемая случайная величина сосредоточенного элемента; $y_{i0}$ — номинальное значение; $\Delta_{\text{о}}$, $\Delta_{\text{н}}$ — допуски, %. Индекс «о» соответствует общей составляющей, индекс «н» — независимой.

В условиях производства важной характеристикой является процент выхода годных устройств. Моделирование случайных разбросов позволяет оценить ее еще на этапе разработки [5.40]. Более общей и важной задачей является увеличение процента выхода годных устройств, которую можно сформулировать следующим образом: для заданных распределений значений параметров $x_k$ и

допусков на характеристики $\Delta g_i$ найти такие значения $x_{k0}$, при которых достигает максимума величина

$$P = C_x \int_X \omega_k (X)\, dx, \tag{5.76}$$

где $C_x$ — константа; $\omega_k (X)$ — совместная функция распределения $x_k$.

Как правило, при производстве радиоаппаратуры, в том числе и СВЧ, вводятся хотя бы в минимальном числе подстроечные элементы. В СВЧ устройствах, выполненных на СПЛ и МПЛ, такими элементами являются отрезки линий, длины которых можно дискретно изменять, сосредоточенные конденсаторы ячеистой структуры, позволяющие также дискретно менять емкость, и печатные катушки, индуктивность которых может меняться при коротком замыкании витков. Эффективность предполагаемых подстроек проверяется при анализе устройства с учетом новых значений параметров элементов. Таким образом общий алгорим анализа чувствительности и допусков должен включать следующие этапы: анализ чувствительностей важнейших характеристик к вариациям параметров элементов; выделение элементов, к вариациям параметров которых характеристики максимально чувствительны; назначение дискретов подстройки на выделенные элементы; анализ допусков методом Монте-Карло с учетом имеющихся подстроек. Если для какого-либо случайного набора величин характеристики не удовлетворяют требованиям, проводится перебор имеющихся подстроек. Устройство считается годным, если в результате перебора обеспечиваются характеристики, удовлетворяющие предъявленным требованиям.

# Глава 6

# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

## 6.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Адгезив* — материал с хорошей адгезией, обеспечивающий прочное сцепление подложки с нанесенным на адгезив материалом. *Адгезия* — сцепление материалов между собой. *Аддитивная технология* — технология, основанная на селективном осаждении материала. *Активирование* — обработка сенсибилизированной поверхности растворами соединений каталитически активных металлов. *Актиничное излучение* — излучение (например, световое), энергии кванта которого достаточно для воздействия на светочувствительный состав, что вызывает фотохимические реакции и изменение физико-химического состояния облученных участков покрытия. *Анодирование плазменное* — процесс окисления образца, находящегося в кислородной плазме под положительным относительно плазмы потенциалом. *Анодирование электролитическое* — процесс окисления металлической пленки в электролите под действием электрического тока.

*Взрывное травление* — травление рельефа методом контактной маски. *Гидрофильная поверхность* — поверхность, смачивающаяся водой; *гидрофильный растворитель* — растворитель, смешивающийся с водой. *Гидрофобная поверхность* — поверхность, не смачивающаяся водой; *гидрофобный растворитель* — растворитель, не смешивающийся с водой. *Диффузия* — процесс движения атомов примеси (диффузанта) в инородном материале вследствие наличия градиента концентраций. *Имплантация* — процесс внедрения ионов с высокими энергиями (5 ...1000 кэВ) в кристаллическую решетку обрабатываемого материала. *Ионное легирование* — имплантация и последующий отжиг материала для устранения радиационных дефектов. *Катализатор* — вещество, ускоряющее химическую реакцию. Металл, обладающий свойствами катализатора, каталитически активный. *Ламинирование* — прикатывание пленочного материала (фоторезиста, адгезива) к материалу подложки.

*Матирование поверхности* — химическая или химико-механическая обработка поверхности для увеличения ее шероховатости и улучшения адгезионных свойств. *Металлизированный фотошаблон* — фотошаблон, на котором изображение элементов схемы выполнено с помощью тонкой металлической пленки. *Метод контактной маски* — формирование с помощью фотолитографии негативного рисунка (контактной маски) из легко травящихся материалов, нанесение поверх маски сплошного слоя заданного материала и затем его удаление (отслаивание) вместе с маской при взрывном травлении последней. *Метод свободной маски* — получение заданного рельефа с помощью прижимной негативной маски (трафарета), экранирующей «пробельные» участки схемы на подложке от потока частиц наносимого вещества.

*Негативное изображение* — негатив схемы, пробельные участки которой соответствуют элементам схемы. *Негативный фоторезист* — фоторезист, у которого при проявлении растворяются участки, не подвергавшиеся воздействию актиничного излучения. *Позитивное изображение* — позитив схемы, рисунок или рельеф которого соответствует элементам схемы. *Позитивный фоторезист* — фоторезист, у которого при проявлении растворяются участки, подвергавшиеся воздействию актиничного излучения. *Резистивная маска* — рельефный рисунок фоторезиста или кислотостойкой эмали, нанесенный на обрабатываемую поверхность и защищающий от воздействия травителя участки поверхности, не подлежащие обработке.

*Селективное осаждение* — избирательное осаждение материала на незащищенные резистивной маской участки подложки или избирательное осаждение

материала на предварительно сформированный подслой. *Селективное травление*— избирательное травление материала в незащищенных резистивной маской участках подложки. *Сенсибилизирование* — вспомогательная операция по активации поверхности при химическом осаждении. *Сеткография* (трафаретная печать) — нанесение рельефа продавливанием специальных составов (паст) через сетчатый трафарет. *Скрайбирование* — частичная резка подложки с последующей ломкой. *Субтрактивная технология* — технология, основанная на селективном травлении материала. *Транспарентный* (цветной) *фотошаблон* — фотошаблон, на котором изображение сформировано покрытием, не пропускающим актиничное и пропускающим неактиничное для фоторезиста излучение.

*Фотолитография* — формирование на подложке с помощью фоторезистов (под влиянием актиничного излучения) рельефной резистивной маски, соответствующей расположению и конфигурации элементов схемы. *Фоторезист* — светочувствительный материал, используемый для формирования на поверхности защитного рельефа и изменяющий под воздействием актиничного излучения свою растворимость в проявителях. *Фотошаблон* — прозрачная для актиничного излучения основа (стекло, пленка), на которой сформирован рисунок элементов схемы из материала соответствующей оптической плотности, не пропускающего актиничное излучение.

*Химическое осаждение* — восстановление металлов из растворов их солей. *Электролитическое осаждение* — осаждение металлов под действием электрического тока из электролитов, содержащих соли осаждаемого металла.

*Эмульсионный фотошаблон*—фотошаблон, на котором изображение элементов схемы сформировано с помощью фотографической эмульсии. *Эпитаксия* — осаждение монокристаллических пленок, когерентных (повторяющих структуру) со структурой подложки. *Гетероэпитаксия* — осаждение слоя одного материала на подложках из другого. *Автоэпитаксия* — осаждение монокристаллической пленки материала на монокристалле того же материала.

## 6.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСКОВЫХ СВЧ ПЛАТ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Основные технологические операции[1] [6.1]:

1. Механическая обработка фольгированных заготовок. Резку производят на фрезерном станке дисковыми твердосплавными фрезами либо гильотинными и роликовыми ножницами.

1а. Механическая обработка нефольгированных заготовок (такая же, как операция 1).

2. Сверление технологических отверстий ∅2 ...12 мм по кондуктору твердосплавными спиральными или быстрорежущими сверлами на настольных сверлильных станках. Для улучшения качества последующей металлизации производят зенковку отверстий, а также подтравливание диэлектрика в отверстиях.

3. Подготовка поверхности фольгированного диэлектрика: механическая зачистка или химическая обработка последовательно в щелочном моющем растворе и в мягком травителе для меди.

3а. Подготовка поверхности нефольгированного диэлектрика: матирование поверхности или нанесение тонкого адгезионного подслоя (пленочного адгезива на ламинаторе или жидкого адгезива на центрифуге, в том числе адгезива, уже содержащего каталитически активный металл) [6.2].

3б. Химико-механическая очистка поверхности нефольгированного диэлектрика для вакуумной металлизации.

4. Формирование позитивного защитного рисунка полосковой платы: нанесение химически стойких эмалей методом трафаретной печати, или пленочных фоторезистов на ламинаторах, или жидких фоторезистов на центрифуге (либо на установках вытягивания). После нанесения фоторезиста (для формирования защитной маски) его подвергают сушке, экспонированию, проявлению, термодублению, при необходимости проводят ретушь.

---

[1]Операции перечисляются вне зависимости от последовательности конкретных технологических процессов.

4а. Формирование негативного защитного рисунка платы.

5. Травление слоя меди номинальной толщины в кислотных или щелочных травителях, выбор которых зависит от химической стойкости применяемого фоторезиста. При выполнении защитной маски с помощью химически стойких металлов используют избирательный травитель для меди.

5а. Травление тонкого подслоя меди.

6. Удаление защитной маски фоторезиста.

7. Электролитическое осаждение антикоррозионных покрытий (Ag; Au; Sn-Bi; Sn-Co; Pd и др.).

7а. Электролитическое осаждение антикоррозионного покрытия — резистивной маски при травлении рельефа по меди.

7б. Химическое осаждение антикоррозионного покрытия (Ni-Au).

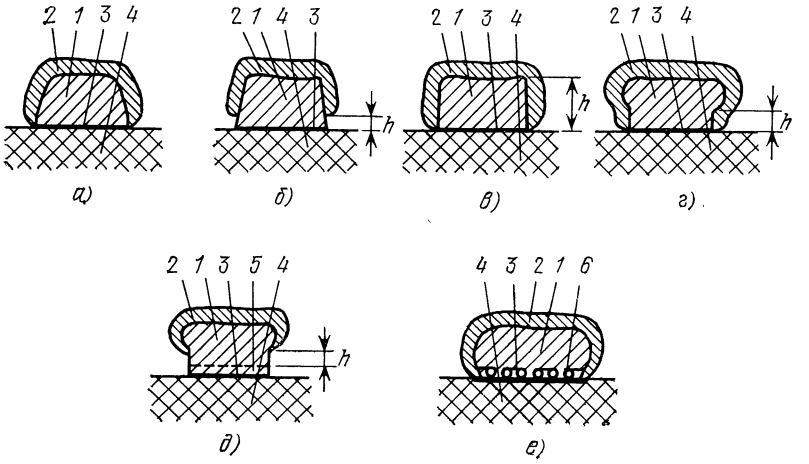



Рис. 6.1

8. Заключительная механическая обработка, включающая удаление технологических проводников и зачистку торцов платы.

9. Нанесение защитного лака ХВ с подслоем 10%-ного поливинилового спирта (ПВС) или эмали НЦ-134 на поверхность платы и сверление отверстий после формирования рисунка схемы.

10. Химическое осаждение тонкослойной меди с предварительной сенсибилизацией и активацией поверхности диэлектрика.

10а. Химическое осаждение меди до номинальной толщины.

10б. Сенсибилизация и активация поверхности диэлектрика.

11. Электролитическое доращивание меди до номинальной толщины.

12. Удаление защитного лака, нанесенного по операции 9.

13. Консервация платы канифольным составом.

14. Осветление защитного металлического покрытия.

15. Формирование подслоя, т. е. тонкослойная металлизация платы (операция 10), или приклейка тонкой фольги, или напыление металла по всей поверхности диэлектрика [6.3].

16. Декапирование подслоя — легкое подтравливание в пробельных местах фоторезистивной маски для проведения операций 10, 11.

При описании конкретных технологических циклов используем символическую запись последовательности выполняемых операций. Например, цикл состоит из резки заготовок, сверления отверстий, фотолитографии, травления медного рельефа и т. д. Символическая запись цикла: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \ldots$

Форма поперечного сечения проводника, изготовленного согласно различным технологическим вариантам, схематически изображена на рис. 6.1: *1* — медный проводник; *2* — антикоррозионное покрытие; *3* — возможный адгезион-

ный подслой; *4* — диэлектрическое основание; *5* — тонкий металлический подслой; *6* — металлические макроцентры; *h* — толщина примененного фоторезиста. Конкретные технологические режимы влияют на толщину слоев, угол наклона боковых граней, степень закругленности углов и т. д.

## СУБТРАКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (рис. 6.1, *а, б*)

Применяется для диэлектрических подложек, предварительно металлизированных до номинальной толщины, и включает в себя не менее четырех основных технологических операций: нанесение проводящего слоя номинальной толщины, формирование защитной (резистивной) маски, представляющей собой позитивный рисунок полосковой платы, травление металлизации через окна в защитной маске, удаление защитной маски.

Технология названа по способу формирования рельефа (субтрактив). При металлизации отверстий платы она является комбинированной, так как вытравливание рельефа (субтрактив) сочетается с осаждением металла в отверстиях (аддитив). Вариант субтрактивной технологии называют *негативным* (рис. 6.1 *а*), если роль позитивной защитной маски при травлении рельефа выполняют фоторезист (негативный фотохимический метод) или химически стойкая эмаль (негативный метод). Вариант называют позитивным (рис. 6.1, *б*), если роль позитивной защитной маски при травлении выполняет химически стойкий металл, осажденный на поверхность проводника через окна в негативной маске, выполненной с помощью фоторезиста (позитивный фотохимический метод) или кислотостойкой эмали (позитивный метод) [1]. Рассмотрим наиболее распространенные варианты субтрактивной технологии:

А. Негативный фотохимический метод. Схема цикла: 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8. Достоинства метода: короткий технологический цикл, полная защита полосковых элементов схемы антикоррозионным покрытием; недостаток — отсутствие металлизации отверстий.

Б. Негативный комбинированный метод. Схема цикла: 1 → 3 → 4 → 5 → 6 → 9 → 2 → 10 (или 10а → 11) → 12 → 7 → 8. Достоинство метода — полная защита полосковых элементов антикоррозионным покрытием.

В. Позитивный фотохимический метод. Схема цикла: 1 → 2 → 3 → 4а → → 7а → 6 → 5 → 14 → 13 → 8. Достоинство метода — короткий технологический цикл; недостатки: отсутствие металлизации отверстий, неполная защита торцов полосковых элементов антикоррозионным покрытием.

Г. Позитивный комбинированный метод. Схема цикла: 1 → 3 → 4а → 9 → 2 → 10а → 12 → 4 (только ретушь фоторезиста) → 7а → 6 → 5 → 14 → 13 → 8. При необходимости увеличения толщины меди в отверстиях и для улучшения перехода отверстие — проводник возможен следующий технологический цикл: 1...: 2 → 10 → 12 → 11 → 4 ...8. Достоинство метода — металлизация отверстий; недостаток — неполная защита торцов полосковых элементов антикоррозионным покрытием, так как чем толще пленка используемого фоторезиста, тем на большую высоту торец не защищен антикоррозионным покрытием.

Д. Фотохимический метод с электрохимическим осаждением металла на заготовку. Является вариантом субтрактивной технологии, близким к негативным методам. Схема цикла: 1а → 2 → 3а → 10а (или 10 → 11) → 4 → 5 → 6 →7 → 8. Достоинства метода: полная защита торцов полосковых элементов антикоррозионным покрытием, возможность использования нефольгированных диэлектриков и формирования пленочных резисторов химическим осаждением резистивных материалов (например, Ni — P) перед операцией 10а, а также напыления резистивных материалов и тонкого медного слоя на органические диэлектрики [6.3] с последующей двойной фотолитографией.

Субтрактивная технология из-за простоты является наиболее распространенной. Ее общие недостатки: большой расход металла при травлении слоя металлизации номинальной толщины; необходимость учитывать при изготовлении фотошаблонов подтрав полосковых элементов, а также использование специальных установок направленного травления для уменьшения подтрава; обязательное

[1] Терминология сложилась в технологии печатных плат.

наличие технологических перемычек при электролитическом осаждении защитного покрытия, последующее их удаление и защита лаком полосковых элементов в местах разрыва перемычек.

Использование пленочного фоторезиста упрощает технологию, уменьшает число дефектов, однако использование толстого пленочного фоторезиста для «позитивного» варианта приводит к увеличению поверхности торцов, не защищенных антикоррозионным покрытием. Фотохимические методы обеспечивают воспроизводимость рисунка схемы с высокой точностью, но промышленный выпуск металлических и капроновых сеток с размером ячеек 75 мкм, 50 мкм и менее, а также наличие химически стойких красок-эмалей (СТ-3.13, СТ-3.12) позволили использовать технологически более простой сеткографический метод.

## АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (рис. 6.1, *в, г*)

Применяется для неметаллизированных диэлектрических подложек и включает в себя не менее трех основных технологических операций: нанесение на подложку защитной маски (негативного рисунка) полосковой платы; осаждение позитивного металлического рельефа полосковой платы номинальной толщины в пробельных местах негативной защитной маски; удаление защитной маски. Схема технологического цикла фотохимического метода с селективным электрохимическим осаждением металла на заготовку: 1а → 3а → 10б → 4а → 9 → 2 → 12, → 4 (ретушь) → 10 → 11 → 6 → 7 → 8. Основные преимущества аддитивной технологии, обусловливающие ее перспективность: большая экономия металла и отсутствие процесса травления, полная защита полосковых элементов антикоррозионным покрытием; недостатки: сложность процесса подготовки поверхности диэлектрика под металлизацию в окнах фоторезиста, необходимость технологических перемычек при электролитическом наращивании рельефа схемы и осаждении антикоррозионного покрытия.

Использование толстого пленочного фоторезиста (рис. 6.1, *в*) обеспечивает более точное воспроизведение прямоугольной формы проводника без разрастания и подтравов, однако тонкие слои жидких фоторезистов (рис. 6.1, *г*) обладают большей разрешающей способностью.

## ПОЛУАДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (рис. 6.1, *д*)

Сочетает селективное осаждение рельефа полосковых плат до номинальной толщины и удаление металлического подслоя с пробельных мест плат. Включает в себя не менее шести основных технологических операций: нанесение на подложку сплошного тонкого металлического подслоя; нанесение на подложку защитной маски, представляющей собой негативный рисунок полосковой схемы; электролитическое осаждение позитивного рисунка проводника до номинальной толщины в пробельных местах защитной маски; электролитическое или химическое осаждение защитного металлического покрытия на образовавшийся рельеф полосковой платы; удаление негативной защитной маски; травление металлического подслоя при защите рельефа с помощью защитного металлического покрытия. Преимущества технологии, обеспечивающие ее перспективность: экономия металла, упрощение операции травления (травлению подвергается только тонкий слой металла 1... 5 мкм); отсутствие технологических перемычек при электролитическом осаждении металлов (проводником служит тонкий металлический подслой, электрический контакт осуществляется через специальную контактную площадку); равномерная толщина металлизации; уменьшение бокового подтравливания проводника. Разнообразие способов предварительной тонкослойной металлизации обеспечивает повышенную адгезию проводников к подложке. Рассмотрим основные варианты технологии:

А. Фотохимический метод с селективным электрохимическим доращиванием металла до номинальной толщины. Схема цикла: 3а → (или 3б) → 15 → 1 → 2 → 4а → 16 → 10 → 11 → 7а → 6 → 5а → 14 → 13 → 8. Недостаток метода—частичное отсутствие антикоррозионного покрытия на торцах проводника (рис. 6.1, *д*).

Б. Фотохимический метод с неселективным стравливанием металлического подслоя. Схема цикла: 3а (или 3б) → 15 → 1 → 2 → 4а → 16 → 10 → 11 → 6 → 5а → 7б → 8. Достоинство метода — антикоррозионное покрытие полностью защищает полосковые элементы; недостатки: сложность травления тонкого металлического слоя без растрава и изменения формы проводника, невозможность электролитического осаждения антикоррозионного покрытия без использования технологических перемычек.

Б. Фотохимический метод с прерывистым химическим осаждением антикоррозионного покрытия. Схема цикла: 3а (или 3б) → 15 → 1 → 2 → 4а → 16 → 10 → 11 → 7б (только хим. Ни-2) → 6 → 5а → 7б (хим. Ни-2 хим 3л-1). При электролитическом осаждении антикоррозионных покрытий необходимы технологические перемычки. Достоинство метода то же, что и варианта Б; недостаток— возможное нарушение антикоррозионного покрытия вследствие прерывания операции его осаждения.

### ФОТОАДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (рис. 6.1, *е*)

Заключается в селективном осаждении рисунка схемы с использованием воздействия актиничного излучения и включает в себя не менее трех технологических операций: нанесение на подготовленную диэлектрическую подложку светочувствительного состава, содержащего ион одного из металлов $Sn^+$, $Cu^+$, $Pd^+$ (возможны введение светочувствительного состава в материал подложки, нанесение на подложку центрифугированием или с помощью ламинатора слоя адгезива, содержащего светочувствительный агент); избирательное очувствление иона металла с помощью актиничного (например, ультрафиолетового) излучения через фотошаблон с негативным изображением схемы и образование металлических макроцентров в местах облучения; избирательное химическое или электрохимическое осаждение рельефа схемы до номинальной толщины на очувствленных участках, содержащих активные центры ($Pd^0$, $Cu^0$, $Sn^0$). Достоинства метода: простота технологического цикла, отсутствие дополнительных материалов — фоторезистов.

Платы на гибких диэлектриках можно изготовлять по любому из описанных выше технологических циклов [6.2]. Основная сложность связана с получением хорошей адгезии в системе полимер — металл. При вакуумной металлизации полимеров адгезионная способность улучшается с помощью предварительной химической, термической обработки или обработки в тлеющем разряде. Последовательное применение двух методов обработки может привести как к улучшению адгезии, так и к ее ухудшению. При химическом травлении и обработке пленок в тлеющем разряде из-за малой толщины диэлектрического полимерного основания возможно изменение структуры последнего, что может привести к увеличению потерь в СВЧ диапазоне. Для изготовления проводников и резисторов на гибкой подложке рекомендуется также метод трафаретной печати с использованием полимерных проводящих и резистивных паст, отверждающихся при низкой температуре [6.4].

## 6.3. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ ПЛАТ

Будем называть технологию тонкопленочной, если толщина металлизации 0,5 ... 20 мкм. Поперечное сечение микрополосковой платы, выполненной по такой технологии, схематически изображено на рис. 6.2: *1* — диэлектрическая подложка; *2* — адгезионный подслой; *3* — резистор; *4* — нижняя обкладка конденсатора; *5* — диэлектрическая прокладка в структуре конденсатора; *6* — верхняя обкладка конденсатора; *7* — проводящий слой номинальной толщины; *8* — антикоррозионное металлическое покрытие; *9* — слой герметика; *10* — металлизированное отверстие.

При изготовлении микрополосковых плат, не содержащих пленочных конденсаторов и резисторов, возможен любой технологический вариант, аналогичный вариантам изготовления полосковых плат (см. § 6.2).

Основные технологические операции:

1. Сверление отверстий на скоростном сверлильном станке алмазными перфорированными сверлами или на станке ультразвуковой прошивки.

2. Изготовление комбинированных подложек склейкой с помощью эпоксидных компаундов (ситалл — феррит и др.).

3. Приклейка фольги жидким клеем под давлением.

4. Матирование подложки.

5. Очистка подложек — химико-механическая отмывка.

6. Химическое осаждение из растворов (никель, халькогенидные пленки) резистивного материала, который одновременно является адгезионным подслоем.

7. Химическое осаждение тонкого слоя меди с предварительной сенсактивацией.

8. Электролитическое доращивание меди до номинальной толщины.

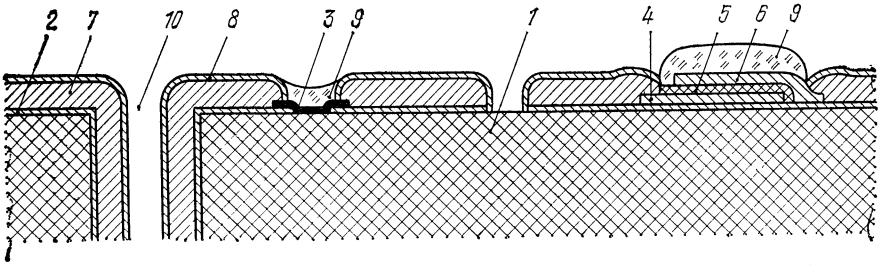



Рис. 6.2

9. Нанесение на подложку адгезионного подслоя стекла методом термического разложения элементоорганических соединений, последующее нанесение на подслой и отжиг состава, содержащего металлоорганическое соединение золота («жидкое золото») или серебра.

10 а ...10 л. Получение защитного изображения методом фотолитографии:

10а. Позитивное изображение проводниковых элементов с последующим травлением.

10б. Негативное изображение проводниковых элементов с последующим электролитическим осаждением материала в окнах фоторезиста.

10в. Позитивное изображение нижних обкладок конденсатора с последующим травлением.

10г. Негативное изображение диэлектрических обкладок конденсатора с последующим анодированием.

10. Позитивное изображение диэлектрической прокладки конденсатора. В качестве последней могут использоваться фоторезисты ФН-11, ФН-5ТК и др.

10е. Позитивное изображение конденсаторов и резисторов для формирования защитного слоя из фоторезиста ФН-11 и др.

10ж. Получение негативного изображения резистивных элементов для формирования контактной маски при последующем напылении и «взрывном» травлении маски.

10з. Позитивное изображение резистивных элементов с последующим травлением.

10и. Позитивное изображение верхних обкладок конденсатора с последующим травлением.

10к. Позитивное изображение рисунка проводниковых и резистивных элементов с последующим травлением.

10л. Негативное изображение резистивных элементов с последующим стравливанием проводящего слоя над резистивными элементами.

11. Защита технологических перемычек. Операцию выполняют вручную, методами трафаретной печати или фотолитографии.

12. Удаление защитного лака с технологических перемычек.

13. Удаление технологических перемычек.

14. Химическое осаждение антикоррозионных покрытий (Ni; Au; Sn).

15. Электролитическое осаждение антикоррозионных покрытий номинальной толщины (Au; Ag; Sn-Bi; Sn-Co).

15а. Включает операции 11 → 15 → 12 → 13.

16. Подгонка номиналов резисторов.

17. Напыление резистивных слоев. Распыление из мишени Та, Ni, сплавов РС на установках ионно-плазменного распыления; напыление нихрома, сплава МЛТ-3М.

17а. Напыление с применением свободной маски.

17б. Напыление с применением контактной маски.

17в. Напыление Та для нижних обкладок конденсаторов.

18. Напыление слоя Al с подслоем Cr или V.

19. Напыление слоя V-Cu-V или Cr-Cu-Cr при толщине слоя меди 3 ... 20 мкм.

20. Получение конденсаторов со следующей структурой: Ti-Al — нижняя обкладка; боросиликатное стекло — диэлектрическая прокладка; Al — верхняя обкладка; боросиликатное стекло — защитный слой методом «взрывного» напыления с использованием сменных свободных масок.

21. Электрохимическое анодирование Та в окнах для получения диэлектрического слоя $Ta_2O_5$

Рассмотрим основные методы тонкопленочной технологии:

А. Фольгирование с последующей фотолитографией и селективным травлением. Схема цикла: 5 → 3 → 1 → 10а → 14. Достоинства метода: простота, короткий технологический цикл; недостатки: наличие подслоя клея, отсутствие металлизации отверстий.

Б. Электрохимическая металлизация подложек. Схема цикла: 1 → 4 → 7 → → 8 → 10а → 11 → 15 → 12 → 13 — вариант с электролитическим осаждением антикоррозионного покрытия. При формировании покрытий химическим осаждением цикл сокращается: 1 → 4 → 7 → 8 → 10а → 14. Достоинство метода — простота используемого оборудования; недостаток — необходимость матирования подложки и, как следствие, возможное ухудшение электрофизических параметров.

В. Термическое разложение элементоорганических соединений с последующим электролитическим наращиванием. Схема цикла: 5 → 9 → 8 → 10а → 15а (или 14). Достоинства метода: хорошая адгезия проводников, сохранение высокого класса чистоты поверхности подложки, простота оборудования; недостаток — использование для получения адгезионного подслоя золота и его потери при нанесении препарата «жидкое золото» на центрифуге и травлении рельефа.

Г. Электрохимическая металлизация с изготовлением резистивных элементов. Схема цикла: 1 → (возможно, 2) → 6 → 8 → 10к → 10 л → 16 → 15а (или 14). Достоинства метода: простота метода, отсутствие дорогостоящего оборудования; недостаток — для стабилизации резистивных слоев последние подвергаются вжиганию, что может ухудшить адгезию проводящего слоя к резистивному адгезионному подслою.

Д. Вакуумное напыление с последующим селективным травлением. Схема цикла: 5 → 19 → 10к → 10л → 16 → 10е → 15а (или 14). Достоинства метода: высокая адгезия и прецизионность процесса.

Е. Вакуумное напыление с применением свободной маски. Схема цикла: 5 → → 17а → 20 → 19 → 10а → 16 → 10е → 15а (или 14). Достоинство метода — меньшее число операций по сравнению с методом последовательных фотолитографий; недостатки: необходимость изготовления прецизионных масок и ограниченная точность воспроизведения конфигурации рисунка (≈ ± 25 мкм для элементов шириной 200 мкм), обусловленная наличием неустранимого зазора между маской и подложкой.

Ж. Вакуумное напыление с последующей фотолитографией. Схема цикла: 5 → 17 → 10з → 18 → 10в → 19 → 10а → 10д → 18 → 10и → 16 → 10е → 15 а (или 14). Достоинства метода: высокая прецизионность, хорошая адгезия, одновременное формирование проводников, резисторов и емкостей; недостатки длительность технологического цикла и высокая стоимость оборудования.

З. Вакуумное напыление с последующей фотолитографией и электрохимическим анодированием тантала («танталовая» технология [6.5]). Схема цикла:

17в → 10г → 23 → 10в → 10ж → 17б → 19 → 10а → 18 → 10и → 16 → 10е → → 15а (или 14). Достоинства и недостатки те же, что и у предыдущего метода.

И. Ионно-плазменное распыление с последующей фотолитографией и электролитическим доращиванием рельефа («танталовая» технология). Применение процессов ионно-плазменного распыления позволяет использовать одну и ту же Та-мишень для получения слоев Та, $Ta_2O_5$, TaN. Ионное и ионно-плазменное травление в сочетании с фотолитографией обеспечивают высокую точность воспроизведения элементов схемы, при этом подвергаются травлению такие химически стойкие материалы, как нитрид тантала, пятиокись тантала и др. Поперечное сечение микрополосковой платы схематически изображено на рис. 6.3. Технологический цикл состоит из следующих операций: нанесение на диэлектрическую подложку *1* химически стойкого грунтовочного покрытия *2* пятиокиси тантала; нанесение слоя *6* нитрида тантала для формирования резистивных элементов; фотолитографическая обработка и травление для формирования резистивных элемен-

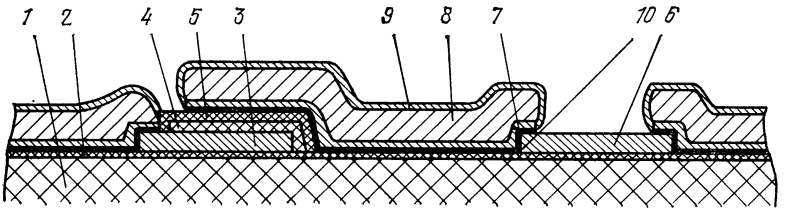



**Рис. 6.3**

тов; нанесение слоя *3* тантала для формирования нижней обкладки конденсаторов; фотолитографическая обработка и формирование нижней обкладки конденсатора; нанесение слоя *4* пятиокиси тантала для формирования диэлектрической обкладки конденсаторов; возможное нанесение слоя *5* окиси кремния или другого дополнительного диэлектрика (моноокиси кремния, смеси окислов марганца и др.) для повышения надежности диэлектрической обкладки и варьирования емкости конденсатора; фотолитографическая обработка для формирования диэлектрической обкладки конденсаторов; нанесение слоя *7* золота с подслоем *10* титана термическим испарением для контактных площадок, верхних обкладок конденсаторов и адгезионного подслоя для проводящих элементов схемы; фотолитографическая обработка для формирования проводящих элементов схемы и травления рельефа по слою *7* золота; нанесение слоя *8* меди номинальной толщины электролитическим наращиванием по золотому рисунку с использованием титанового подслоя *10* как токопроводящего контакта, не обладающего адгезией к наращиваемому материалу; нанесение антикоррозионного покрытия *9* золота с никелевым подслоем; удаление химическим травлением подслоя *10* титана.

Все варианты тонкопленочной технологии, кроме варианта И, являются сложными вариантами субтрактивной технологии. Целесообразно применять варианты с аддитивным и полуаддитивным способом формирования рельефа (§ 6.2).

Рассмотрим некоторые особенности изготовления полупроводниковых ИС СВЧ. В ИС СВЧ активный элемент представляет собой распределенную полупроводниковую структуру. Различают два варианта изготовления полупроводниковых ИС: 1) на диэлектрическом основании; 2) на полуизолирующем материале. В первом случае используют подложки с эпитаксиальным слоем высокоомного кремния или арсенида галлия на диэлектрическом основании (сапфир, шпинель, окись берилия и др.). В структуре кремний на сапфире [6.6] фотолитографией и последующим селективным травлением формируют изолированные островки кремния под отдельные активные структуры. Затем получают активные и пассивные элементы схемы в результате следующих технологических операций: легирования, диффузии, нанесения диэлектрических слоев, испарения металлов в вакууме, фотолитографии, селективного травления и т. д. Возможно также формирование элементов схемы по одному из вариантов тонкопленочной тех-

нологии. Технологические недостатки метода: возможность загрязнения полупроводника при диффузии примесей из материала подложки; значительное число дефектов в полупроводнике, вызванных различием кристаллических структур подложки и полупроводника; наличие ступенек полупроводник — диэлектрик, затрудняющих получение надежных металлических соединений. Применение многослойных структур: диэлектрик — сегнетоэлектрик — полупроводник; диэлектрик — феррит — полупроводник; диэлектрик — пьезоэлектрик — полупроводник дает возможность реализовать ИС СВЧ, выполняющие разнообразные функции [6.7].

Изготовление монолитных полупроводниковых ИС СВЧ заключается в создании на полупроводниковой пластине активных и пассивных элементов, разделении их слоями полуизолятора или барьерами, образуемыми областями полупроводника с $p$ — $n$ -переходами. Полуизолятор — полупроводник, содержащий минимальное количество примесей, может использоваться в качестве подложки ИС. Концентрация примесей для полуизолирующего GaAs $\leqslant 10^{15}$, удельное сопротивление $10^6 \ldots 10^9$ Ом·см. Современные монолитные кремниевые ИС способны работать в диапазоне частот 5 ГГц [6.6]. На частотах выше 5 ГГц практически единственным материалом для изготовления монолитных ИС остается арсенид галлия.

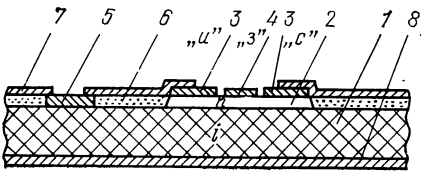


Рис. 6.4

Рассмотрим кратко возможный вариант изготовления ИС СВЧ на полуизолирующей подложке GaAs. На рис. 6.4 схематически представлен разрез участка ИС.

На полуизолирующей подложке *1* $i$-GaAs выращен эпитаксиальный слой *2* GaAs-$n$-типа ($\sim$ 0,5 мкм) (возможно также локальное ионное легирование подложки под маской $SiO_2$, в этом случае формируется участок $n$-типа в толще полупроводника). На подложку наносятся маскирующий слой $SiO_2$ и легкотравящийся слой металла (Al, V). Затем методом фотолитографии и локального травления формируются окна под омические контакты «исток — сток» транзистора. Проводится напыление материала омических контактов (например, сплав Au-Ge). Затем формируются контакты *3* взрывным травлением (Al, V). Материал контактов остается только в окнах, сформированных в слое $SiO_2$ и взрываемого металла. Аналогичным способом можно получить контакт *4* к затвору типа «барьер Шоттки». В качестве материала затвора могут использоваться Al, Mo, Ti, Pt, Au и др. Резистивный элемент *5* можно получить до формирования контактов активного элемента. Для этого используется метод ионного легирования $n$-GaAs или диффузии в окнах $SiO_2$, полученных методом фотолитографии и локального травления. Защитная маска $SiO_2$ удаляется. Наносится новая сплошная резистивная маска (фоторезист или $SiO_2$), и методом фотолитографии получается резистивный рисунок над сформированными элементами схемы. Затем проводится протонная бомбардировка $n$-GaAs, нейтрализующая доноры в $n$-слое и превращающая полупроводник в $i$-GaAs [6, 8], или анодное окисление $n$-GaAs и образование слоя окислов *6*, или вытравливание слоя $n$-GaAs до $i$-GaAs, удаляется маска (фоторезист или $SiO_2$), напыляется проводящий материал и методом фотолитографии и избирательного травления формируются проводящие элементы *7* схемы и, при необходимости, «земля» *8*.

Возможно также изготовление резисторов в тонкопленочном исполнении.

## 6.4. ТОЛСТОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ ПЛАТ

В основе толстопленочной технологии лежит метод *трафаретной печати* с последующим вжиганием паст для создания толстопленочных элементов и проводников [6.9]. Пасты обычно наносятся толстым слоем 25 ... 50 мкм через специальный сетчатый трафарет. Для изготовления трафарета на нижнюю поверх-

ность капроновой или металлической сетки, натянутой с помощью специального устройства, наносится светочувствительный состав (пигментная бумага, пленочные фоторезисты или фоторезисты для валкового нанесения). Затем методом фотолитографии получается заданный негативный рисунок схемы. Через незаполненные задубленным светочувствительным составом участки сетчатого трафарета паста продавливается на подложку в количествах, определяемых размерами ячеек трафарета и толщиной светочувствительного слоя. Разрешающая способность трафарета в основном ограничивается минимальными размерами ячеек. Число изготовляемых трафаретов определяется числом наносимых технологических слоев.

Для воспроизводимости процессов нанесения паст и хорошего совмещения трафаретов необходимо прецизионное оборудование. Установка для трафаретной печати имеет посадочное место для фиксированного крепления диэлектрической подложки механическим способом или вакуумным присосом, а также приспособ-

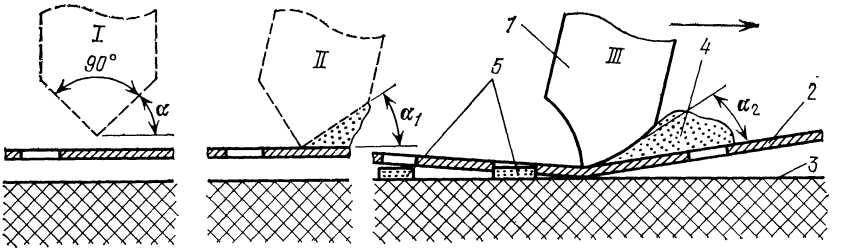



Рис. 6.5

ление для крепления трафарета и его совмещения с подложкой. При бесконтактном методе печати после укрепления подложки и трафарета между ними устанавливается зазор порядка 0,5 ... 0,75 мм ± 25 мкм, зависящий от состава, назначения и вязкости пасты, заданной толщины наносимого слоя и т. д. Неточное соблюдение размера зазора между трафаретом и подложкой от платы к плате влияет на толщину полученного отпечатка и, следовательно, на электрические характеристики элементов. Например, изменение зазора на 25 мкм при формировании пленочного резиста может вызвать изменение его сопротивления на 1%. Толщина отпечатка и форма его поперечного сечения зависят от вязкости пасты, равной обычно (150...200) · $10^3$ /сП. Существует также сложная зависимость между геометрическими размерами и толщиной отпечатка, которая меняется в зависимости от видов паст, сеток и характера технологического процесса.

Процесс продавливания пасты через отверстия трафарета с помощью ракеля схематически изображен на рис. 6.5. Римскими цифрами отмечено последовательное положение ракеля: *I* — исходное положение; *II* — положение ракеля в контакте с подложкой; *III* — положение и форма ракеля в рабочем состоянии. Угол заточки ракеля обычно 90°; $\alpha$ и $\alpha_1$— установочные углы порядка 30 ... 45°; $\alpha_2$ — угол атаки ракеля. На верхнюю поверхность трафарета *2* перед ракелем *1* наносят слой пасты *4*. Ракель равномерно перемещается вперед со скоростью 50... 150 мм/с и прогибает трафарет до соприкосновения с подложкой *3*. Давление ракеля на пасту зависит от скорости его перемещения, формы и способа закрепления, от вязкости пасты, размеров ячеек трафарета и т. д. По мере прохождения ракеля трафарет возвращается в исходное положение. На подложке *3* остается слой пасты *5*, воспроизводящий рисунок открытой части трафарета. Повышение давления ракеля и увеличение натяжения сетки увеличивают толщину слоя. Повышение скорости движения ракеля уменьшает толщину слоя. Геометрические размеры получаемых элементов ограничены в основном размерами ячеек трафарета. Для повышения разрешающей способности используют метод контактной печати с применением биметаллических трафаретов. На рис. 6.6, *а* дано изображение части биметаллического трафарета; на рис. 6.6, *б* — сечение трафарета вертикальной плоскостью. При изготовлении трафарета обычно используют

фольгу 2 бериллиевой бронзы толщиной ≈ 50 мкм. На обе стороны фольги наносится фоторезист и методом фотолитографии формируются на растровой стороне изображение сетки, а на контактной — точное позитивное изображение элемента. Затем на обе стороны наносится электролитическим или химическим осаждением слой никеля ≈ 10 мкм. После удаления фоторезиста проводится двустороннее травление фольги при защите рисунка несьемной маской 1 и 3 из никеля. Обычно рисунок сетки выполняется под углом 45° к краям изображения элемента, чтобы избежать совпадения перемычек 6 растра с краями элемента 4 на контактной стороне и сохранить высокое разрешение. Применяются сетки с шириной перемычки 50, 25 мкм и линейным размером ячейки 5 соответственно 100, 50 мкм, так как при меньших размерах ячейки и ширине перемычек затруднено продавливание паст.

Недостатки метода: малая эластичность масок трафаретов, ограничивающая их использование на подложках больших размеров; отсутствие зазора между маской и подложкой, что требует, во избежание смещения рисунка схемы, специального точного оборудования для вертикального удаления маски.

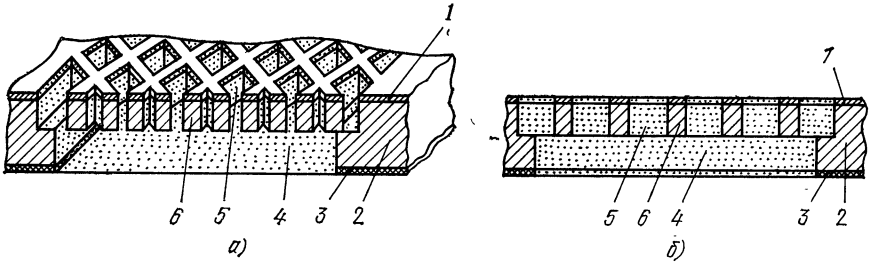



Рис. 6.6

При изготовлении микрополосковых плат по толстопленочной технологии используются термостойкие подложки, параметры которых при температуре вжигания паст не изменяются. Для лучшей адгезии рекомендуется использовать шлифованные подложки из неорганических диэлектриков с шероховатостью поверхности 0,5 ... 0,75 мкм, а также полированные подложки при подборе соответствующих паст и условий проведения технологического процесса, обеспечивающих минимальное растекание пасты и хорошую адгезию.

В состав паст для толстопленочной технологии входит не менее трех основных компонентов: функциональный материал — мелкодисперсный порошок с размером частиц ⩽ 2 мкм, обеспечивающий заданные свойства пасты (металл, диэлектрик, резистивный материал); стеклофаза (постоянное связующее) — специальные легкоплавкие стекла, обеспечивающие при оплавлении скрепление частиц функционального материала и контакт пленки к подложке; органическая связка (временное связующее) — органические растворители, жидкие смолы, жироподобные вещества, воск и т. д. Органическая связка должна полностью удаляться при сушке и вжигании паст и обеспечивать: длительное до полугода хранение пасты без изменения ее вязкости, получение четкого отпечатка, легкое удаление паст с трафарета при помощи растворителя. В зависимости от функционального материала различают три основных типа паст: проводниковые, диэлектрические и резистивные.

После нанесения на подложку толстопленочных паст последние подвергаются *сушке* и *вжиганию*. Последовательность нанесения резистивных, диэлектрических и проводящих паст определяется режимом их вжигания: каждое последующее вжигание проводится при температуре, более низкой, чем предыдущее, для уменьшения возможности взаимодействия слоев. При вжигании используют конвейерные печи. Скорость проведения процесса сушки паст тщательно подбирают, так как при быстром нагреве выгорание органической связки может привести к разрушению пленки, а при медленном выгорании в композиции может сохраняться углерод, наличие которого способно привести к возникновению нежелательных реакций в пленке при прохождении подложки через горячую зону печи.

После сушки пленок подложки поступают в зону вжигания, где обеспечивается нагрев до 1000° С. Температура вжигания и длительность пребывания подложки в высокотемпературной зоне зависят от состава паст. В печи температура должна поддерживаться с точностью вплоть до ±1° С, так как, например, при вжигании резисторов изменение температуры на 1° С может привести к изменению их сопротивления на 3%. Вжигание можно проводить как в открытой печи, так и в печах с ламинарным потоком газов (азот, инертные газы и т. д.) В печах открытого типа с непрерывно движущейся конвейерной лентой сложно поддерживать температуру с высокой точностью. После вжигания толщина слоя паст составляет соответственно 12,5 ... 30 мкм и подложки поступают в зону охлаждения.

Процесс изготовления толстопленочных микрополосковых плат включает в себя следующие основные технологические операции: изготовление сменных сетчатых трафаретов; изготовление проводниковых элементов и нижних обкладок конденсаторов с последующим вжиганием; последовательное изготовление и вжигание дополнительной изоляции (например, при наличии перекрещивания проводниковых слоев); изготовление и вжигание диэлектрических слоев конденсаторов; изготовление и вжигание верхних обкладок конденсаторов; изготовление и вжигание резистивных слоев; подгонка номиналов конденсаторов и резисторов; герметизация резисторов.

Преимущества толстопленочной технологии: высокая производительность, технологическая гибкость, простота процесса; недостатки: более низкая разрешающая способность и точность воспроизведения геометрических размеров по сравнению с тонкопленочной технологией, трудность травления паст и т. д.

Получение слоев с малыми геометрическими размерами элементов возможно при использовании фоточувствительных паст. Другой способ повышения разрешающей способности толстопленочной технологии — использование травящихся паст: нанесение сплошного слоя паст, их сушка, фотолитография и защита элементов схемы маской фоторезиста, струйное травление (вымывание) пасты с пробельных элементов схемы. Возможны также различные варианты совмещения толстопленочной и тонкопленочной технологии, например, с таким порядком операций: изготовление сменных сетчатых трафаретов; нанесение сплошного тонкого проводящего слоя с помощью проводящей пасты методом трафаретной печати или с использованием металлоорганических соединений (Ag или Au) методом центрифугирования; вжигание сплошного проводящего слоя; фотолитография с последующим травлением для формирования тонкого проводящего рельефа; формирование толстопленочных конденсаторов и резисторов; электролитическое усиление проводящего рельефа; электролитическое или химическое осаждение защитного покрытия.

## 6.5. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

Подготовительными являются следующие операции: резка подложек, изготовление отверстий, склейка подложек, очистка и подготовка поверхностей подложек.

Резку подложек производят в начале или конце технологического цикла. При малых геометрических размерах микрополосковой платы применяют мультиплицированный фотошаблон с предусмотренными зазорами между схемами на ширину реза, и резку проводят в конце технологического цикла. Разделение подложек из неорганических диэлектриков осуществляют тремя способами [6.11]:

1. Диэлектрическая подложка с помощью термопластичного канифольного состава приклеивается к стеклянному основанию. Резка проводится алмазными дисками диаметром 75 ... 100 мм, толщиной 0,1 ... 0,3 мм на спецстанке или на полуавтомате, ширина реза 0,5 ... 0,8 мм.

2. Скрайбирование алмазным резцом и последующая ломка пластин (рекомендуется для подложек толщиной до 0,5 мм). Глубина надреза — до 0,5 толщины пластины. При скрайбировании потери материала минимальны, так как ширина линии надреза ± 0,05 мм.

3. Лазерное скрайбирование. Обеспечивает отличное качество реза, однако чувствительно к нарушениям технологии и требует высокой культуры производства [6.12].

Существуют три способа изготовления отверстий в подложках из неорганических диэлектриков:

1. Скоростное сверление — применяется при изготовлении отверстий ∅0,8 мм и проводится с помощью перфорированных алмазных сверл [6.13]. Одним сверлом сверлят до 10 отверстий. При серийном выпуске сверление проводят по кондуктору, имеющему отметку базового угла.

2. Ультразвуковая пробивка отверстий — наиболее универсальна, дает возможность получать отверстия любой конфигурации, а также проводить одновременную пробивку близко расположенных отверстий. Например, для пробивки отверстий под выводы транзистора изготовляют концентратор, в котором инструмент представляет собой систему из трех твердосплавных цилиндров.

3. Лазерная пробивка отверстий — практически единственная, позволяющая получать отверстия диаметром 0,05 ... 0,5 мм [6.14]. Для предотвращения образования вокруг отверстий валика из удаляемого материала на подложку предварительно наносится слой защитного лака. После пробивки отверстий весь конденсат удаляется с поверхности подложки вместе с лаком.

Выбор способа пробивки отверстий зависит от соотношения $K = D/h$, где $D$ — диаметр отверстий; $h$ — толщина обрабатываемого материала. Величина $K$ для скоростного сверления максимальна ($K \geqslant 0{,}5$), а для лазерного — минимальна ($K \approx 0{,}1$).

Склейка подложек применяется для создания комбинированных подложек, например ситалл-ферритовых. Обезжиренные подложки склеивают эпоксидным клеем в специальном приспособлении, смазанном антиадгезионными смазками. Полимеризацию клея проводят при температуре не ниже + 150° С и давлении $(0{,}5 \ldots 1) \cdot 10^{-3}$ Па.

При отмывке подложек перед вакуумным напылением используются различные способы удаления загрязнений: химические реакции; механическая очистка (кистевая обработка, распыление реактива, кипячение, ультразвуковая обработка и т. д.); растворение загрязнений (жиров в растворителях, солей в воде и др.). Наиболее распространенной является кислотно-щелочная обработка. Удаление канифольных мастик и обезжиривание проводится последовательной обработкой гидрофобными и гидрофильными растворителями [6.15]. Затем проводятся кислотная обработка при нагреве и щелочная обработка в перекисно-аммиачной смеси с помощью ультразвука. Обработка в горячей хромовой смеси, серной и соляной кислотах может привести к размягчению поверхностного слоя ситаллов и, как следствие, к ухудшению адгезии напыленных пленок. В этом случае подложки промывают в горячей $HNO_3$ или в 10%-ном растворе $KMnO_4$ с последующим удалением продуктов реакции в концентрированной $H_2O_2$. Последняя операция — отмывка подложек в бидистиллированной воде с последующей сушкой на центрифуге или обработка подложек в парах растворителей в специальных камерах. Быстрым и эффективным способом отмывки подложек является «фреоновая технология» [6.16]. Перспективна плазмохимическая очистка подложек («сухая технология»), обеспечивающая атомарно чистую поверхность.

При подготовке подложек под химико-электролитическую металлизацию предусматривают обычно предварительное увеличение степени шероховатости — матирование поверхности. Для матирования подложек из ситалла используют смесь $HF + H_2SO_4$, затем следует механическая зачистка, так как на поверхности образуется мягкотравленный нерастворимый слой. Это может быть вызвано как образованием новых нерастворимых продуктов реакции, так и тем, что скорость диффузии травителя в ситалл превышает скорость травления. Более технологично использование шлифованного ситалла с последующей обработкой в горячих кислотах: $H_3PO_4 + H_2O$; $HNO_3$; $HCl$. Трудность химической обработки ситаллов обусловлена их сложным физико-химическим составом.

При контроле отмывки поверхности подложек наиболее распространены методы оптической микроскопии (подсчет светящихся точек в темном поле, исчезающих и неисчезающих рисок) и методы, основанные на смачивании (полная смачиваемость подложки, измерение угла смачивания, метод конденсации паров, метод рисок и царапин и т. д.). Однако смачиваемость и несмачиваемость не могут служить однозначным критерием отмывки, так как состояние поверхности (гидрофильность или гидрофобность) зависит от последней операции отмывки. Всестороннюю и тщательную оценку чистоты подложек следует проводить при от-

работке и выборе технологии отмывки. Из-за высокой активности подготовленных подложек их сплошной контроль может привести к дополнительному загрязнению. Чистота поверхности является критерием переменным и зависит от предъявляемых к подложке требований. Для объективной оценки подготовки поверхности следует оценивать адгезию пленок к подложке [6.16].

Адгезию можно оценить силой, которая необходима для отрыва или отслаивания пленок [6.17]. При отрыве контрольной площадки измеряется величина нормального усилия $F_н$ [Н/м²] (1 кгс/см² $\approx 10^5$ Н/м²), а при отслаивании скрайбированного полоска — величина тангенциального усилия $F_т$ [Н/м] (1 кгс/см $\approx$ $\approx 10^3$ Н/м). Сплошной контроль адгезии возможен, если на каждой микрополосковой плате предусмотрено не менее трех контрольных площадок размером 0,5 × 0,5 мм, выдерживающих трехкратную перепайку медной проволоки ∅0,07 мм (в течение не более 3 с).

## 6.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ИСПАРЕНИЯ

Вакуумная технология обеспечивает получение пленок с заданными электрофизическими свойствами и хорошей адгезией на полированных диэлектрических подложках (∇ 13—14) [6.18]. Сущность метода термического испарения в вакууме состоит в том, что при температуре, когда давление собственных паров испаряемого вещества значительно превышает давление остаточных газов, а тепловая энергия превышает силу сцепления между атомами, происходит термическое испарение материала. При этом в сторону подложки направляется прямолинейный молекулярный поток испаряемого вещества.

На рис. 6.7 схематически изображено подколпачное устройство установки термического испарения в вакууме. Из испарителя *1* испаряемое вещество *2* осаждается на подложку *3* или на заслонку *4*, контролирующую начало и окончание осаждения материала на подложку. Подложка подогревается с помощью нагревателя *5*. Длина $L$ свободного пробега атомов испаряемого вещества в вакууме должна превышать расстояние между испарителем и подложкой. Для термического испарения используют вакуумные установки с давлением порядка $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ Па ($L \approx 70$ см). Во время испарения контролируются температура подложки, температура испарителя скорость конденсации испаряемого вещества, толщина пленок, давление остаточных газов и т. д., для чего вакуумные установки оснащены специальными датчиками и приборами [6.19]. Использование «карусели» подложек обеспечивает одновременную обработку нескольких подложек (от 6 до 150). За один цикл откачки возможно нанесение нескольких материалов при смене испарителей. При использовании метода свободной маски используют сменные «карусели» масок, совмещаемых с подложками. Для увеличения равномерности и одновременного нанесения материала на обе стороны подложки разработаны системы сложного вращения подложек по 2—3-м осям. Испаряемый материал принято называть навеской. Подложки подвергаются в вакуумных установках термической обработке (нагрев до 500° С) и очистке в тлеющем разряде (при давлении 13... 1 Па), что позволяет получать пленки с улучшенной адгезией [6.20].

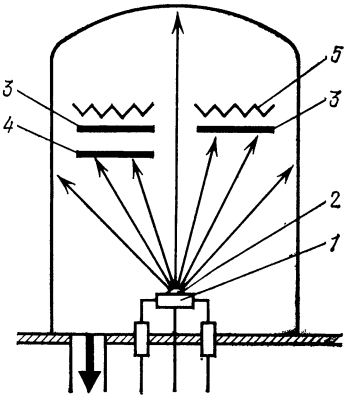


Рис. 6.7

Методом вакуумного испарения получают токопроводящие, диэлектрические и резистивные слои. Однако свойства тонких пленок, нанесенных в вакууме, и монолитного материала могут не совпадать из-за вероятности образования структурных дефектов. При напылении проводящих слоев Cu, Ag, Au на неорганические диэлектрики для улучшения адгезии применяют напыление адгезионного подслоя толщиной 30...80 нм Cr, Ni-Cr, Ti, V и др. Материал подслоя

окисляется нагретой подложкой и дает прочную связь металл — окисел — подложка. Чистый металл подслоя адгезирует к чистому металлу проводника. Осаждение проводится в вакуумной камере за один цикл, для чего в вакуумных установках предусматривается возможность смены испарителей без разгерметизации системы. Один и тот же материал, осажденный в вакуумных установках разного типа, может обладать существенно различными свойствами.

Рассмотрим наиболее распространенные способы получения пленочных слоев методом вакуумного испарения.

## ИСПАРЕНИЕ ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ ИСПАРИТЕЛЕЙ — ПРЯМОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ

Это наиболее простой способ получения тонких пленок. Испаряемый материал помещают в испаритель. Для нагрева через испаритель (форму и материал которого подбирают в зависимости от испаряемого вещества) пропускается ток. В качестве материалов для испарителей обычно используются тугоплавкие металлы: вольфрам, тантал, молибден, ниобий. Методом прямого термического испарения получают проводящие слои Cu, Al, Au, Ag, Pt; резистивные слои Ni, Cr, PC, Ni-Cr, керметы, МЛТ (PC, МЛТ, керметы испаряют из спиртовых суспензий), диэлектрики SiO, GeO. Этот метод не обеспечивает точного воспроизведения состава и свойств многокомпонентных резистивных пленок (МЛТ, Ni-Cr и т. д.) [6.21].

Достоинства метода: простота, возможность с большой скоростью осаждать пленки металлов и диэлектриков, большая чистота пленок вследствие использования высокого вакуума; недостатки: возможность химического взаимодействия материала навески с материалом испарителя и загрязнения пленки материалом испарителя; сложность распыления тугоплавких материалов в связи с затруднением подбора материала испарителя; трудность распыления материалов, сложных по своему химическому составу, так как различие парциальных давлений отдельных компонентов или высокая степень термической диссоциации не дают возможности воспроизвести в пленке химический состав таких соединений; необходимость наличия высокого вакуума.

## ИСПАРЕНИЕ С КОСВЕННЫМ НАГРЕВОМ (ИНДУКЦИОННОЕ)

В этом случае применяют тигли из тугоплавких металлов или термостойкой керамики, подогреваемые с помощью проволочной спирали, ВЧ индуктора, электронного луча и т. д. [6.18]. Материал тигля при температурах испарения должен быть инертным к навеске испаряемого материала, устойчивым к термоударам и не должен выделять газов.

## ЭЛЕКТРОННАЯ БОМБАРДИРОВКА

Метод основан на нагреве навески до температуры испарения в результате ее бомбардировки потоком электронов высокой энергии [6.18]. В тигель-анод загружают материал навески, кольцевой катод, эмиттирующий электроны, окружен металлическим экраном, благодаря чему электроны по криволинейной траектории устремляются к тиглю, фокусируясь на материал навески. Испарение электронной бомбардировкой часто применяется совместно с прямым термическим испарением.

Другая разновидность метода — электронно-лучевое испарение. Применяют электронно-лучевые пушки с электростатической и магнитной фокусировкой, в которых источник электронов вынесен из зоны, подверженной влиянию газов и паров испарителя 6.22]. Этим методом испаряют проводящие материалы, тугоплавкие металлы Ta, Re, W, Mo, Nb, Hf, материалы с небольшой разницей упругости паров (некоторые резистивные сплавы $CrSi_2$, $TiSi_2$, стекла и т. д.) и таблетированные окислы редкоземельных металлов.

Достоинства метода: возможность испарять тугоплавкие материалы и некоторые многокомпонентные сплавы благодаря концентрации мощности до $10^8$

Вт/см² в фокальном пятне; высокая скорость испарения и хорошая адгезия материала к подложке; возможность регулирования испарения навески; недостатки: наличие вторичной электронной эмиссии; трудность испарения многокомпонентных сплавов.

### ТЕРМИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ (ВИБРОДОЗИРОВАНИЕ)

Порошкообразный испаряемый материал (обычно сложного состава) подается на нагретый испаритель, температура которого тщательно подбирается и должна превышать температуру испарения наиболее тугоплавкого компонента. Материал подается на раскаленную поверхность испарителя небольшими порциями с помощью дозаторов. Скорость подачи из дозатора должна быть такой, чтобы при данной температуре обеспечивалось полное испарение материала. Только в этом случае на поверхности подложки можно получить пленку заданного состава, так как над испарителем будут присутствовать в паровой фазе все компоненты материала сложного состава. Процесс испарения состоит из ряда дискретных актов, сопровождающихся быстрым и полным испарением каждой отдельной порции материала.

Метод термического взрыва позволяет получать высококачественные резистивные пленки из керметов и металлосилицидных сплавов, а также диэлектрические пленки из мелкодисперсных порошков различных стекол (боросиликатных, алюмосиликатных и др.) и ситаллов.

## 6.7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

### КАТОДНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ В ДИОДНОЙ СИСТЕМЕ

В вакуумной установке диодного типа распыление материала катода-мишени осуществляется положительно заряженными ионами инертного газа, разгоняемыми электрическим полем в пространстве тлеющего разряда. Скорость распыления пропорциональна плотности ионного тока, который зависит от мощности, выделяющейся на мишени-катоде, и давления газа [6.23].

Простейшая схема диодной системы представлена на рис. 6.8. Распыляемый материал *1* (плоская мишень) служит катодом, подложка *2* — анодом. Между ними может находиться заслонка *3*. Перед началом процесса ионного распыления в установке проводят откачку до получения вакуума не менее $10^{-3}$ Па и прогревают камеру для уменьшения скорости последующего газовыделения, затем камеру заполняют тщательно очищенным инертным газом, создавая давление 0,1 ...70 Па. На первом этапе процесса проводится ионная очистка, при этом подложка служит распыляемым катодом и разряд зажигается между подложкой и заслонкой. Подложка бомбардируется положительными ионами инертного газа, что приводит к очистке поверхности подложки. На втором этапе проводится распыление мишени при вакууме $\approx$1,3 Па. Энергия бомбардирующих ионов должна быть не менее определенного порогового значения, ниже которого не осуществляется распыление мишени, и не больше определенного значения, при котором возможна имплантация бомбардирующих ионов в мишень [6.28]. В качестве ионизирующего газа применяют Ar, Ne и др. Обычно используют аргон, обладающий бо́льшим молекулярным весом, что обеспечивает наиболее высокую скорость распыления. Пленки материалов, полученные этим методом, часто содержат нежелательные примеси, так как распыление проводят

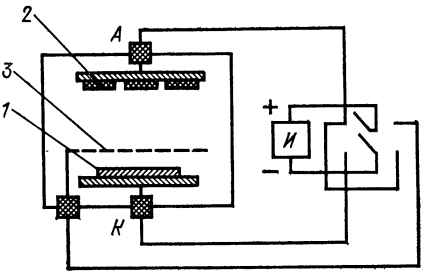


Рис. 6.8

при невысоком вакууме. К ним относятся химические соединения, образованные вследствие наличия в атмосфере разряда активных газов и органических паров ($O_2$; $N_2$; $H_2O$; $CO_2$; $CH_4$), а также внедрения и «замуровывания» атомов нейтральных газов. Под действием электронной бомбардировки молекулы органических загрязнений адсорбируются на поверхности растущей пленки. Катодное распыление обеспечивает хорошую адгезию пленки к подложке благодаря высокой энергии выбиваемых атомов и ионов (среднее значение 5 эВ).

Резистивные пленки можно получать распылением спрессованных мишеней Cr-Si, Mo-$Si_2$, Cr-$Si_2$, Ta-Al и др., слои которых отличаются высокой стабильностью электрофизических свойств.

Преимущества метода: возможность распыления любых металлов, а также тугоплавких многокомпонентных сплавов; возможность получения пленок практически любой толщины; высокая воспроизводимость свойств нанесенных слоев благодаря использованию плоской мишени (одна и та же мишень на много процессов); адгезия катодно осажденных пленок выше, чем у термически осажденных. Недостатки: скорость осаждения пленок ниже, чем при термическом испарении; невозможность распыления диэлектриков.

## ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ В ТРИОДНОЙ СИСТЕМЕ

В вакуумной установке триодного типа дополнительный термокатод испускает в сторону анода электронный поток, который ионизирует остаточный газ, поддерживая горение дугового разряда. Разряд зажигается при постоянном напряжении $\approx$ 200 В между анодом и термокатодом. После возникновения разряда напряжение между электродами снижается до $\approx$ 20 В, а ток достигает нескольких ампер [6.28]. Мишень вводится в плазму как самостоятельный электрод и имеет отрицательный относительно плазмы потенциал. Положительные ионы рабочего газа вытягиваются из плазмы и, ускоряясь до энергии в сотни электрон-вольт, бомбардируют мишень, при этом распыляемый материал осаждается на подложку. Одна из возможных триодных систем схематически изображена на рис. 6.9. В разрядную камеру вводят анод *1* и дополнительный термокатод *2*.

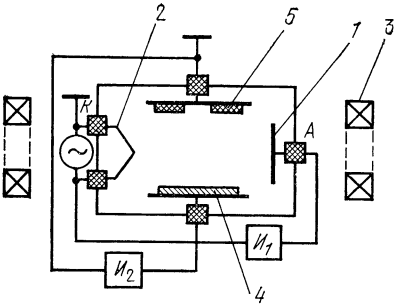



Рис. 6.9

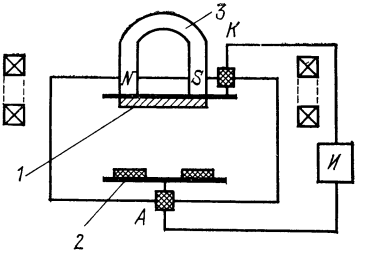



Рис. 6.10

Наличие термокатода и магнитных катушек *3*, создающих продольное магнитное поле, позволяет снизить рабочее давление до $10^{-1}$ ....$10^{-3}$ Па, в результате чего уменьшается степень загрязнения пленки газовыми включениями, и увеличить скорость распыления мишени *4*. Скорость осаждения металлов и сплавов на подложку *5* достигает 300 нм/мин.

В установках с тетродной системой введение дополнительного электрода с положительным относительно катода потенциалом приводит к сужению разряда, уменьшению расстояния мишень — подложка и снижению рабочего давления до $10^{-3}$ Па.

Достоинства метода по сравнению с катодным распылением: понижение рабочего давления в камере до $10^{-2}$...$10^{-3}$ Па; уменьшение расстояния мишень — подложка и, как следствие, уменьшение возможных загрязнений пленки; большая плотность осажденных слоев; отсутствие эффекта замуровывания газа.

## МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

В установках используют магнитное поле, силовые линии которого параллельны распыляемой поверхности мишени и перпендикулярны силовым линиям электрического поля [6.24]. Наличие скрещенных полей у поверхности мишени резко увеличивае тплотность ионного потока и соответственно скорость распыления мишени. Система может работать в довольно широком диапазоне рабочих давлений (1...$10^{-2}$) Па, обычно в атмосфере аргона, и относится к низковольтным системам распыления ($U \approx 300$ ... 800 В). На мишень, как правило, подается отрицательный потенциал при нулевом потенциале анода. Индукция магнитного поля, создаваемая обычно постоянными магнитами, порядка 0,03 ... 0,1 Т. Диодная система магнетронного распыления схематически изображена на рис. 6.10, где основные элементы: *1* — катод-мишень, *2* — анод-подложкодержатель, *3* магнитная система. Скорость распыления для металлов при постоянном токе велика и составляет: для Cu, Pd, Au, Ag 50 ... 60 нм/с; для Mo, Al, Ge, Cr 10... 20 нм/с; для Si, Ti, Ta, W, Nb $<$ 10 нм/с [6.24].

Преимущества метода: снижение степени загрязненности пленок благодаря пониженным рабочим давлениям; большая скорость распыления; высокая степень использования материала мишени (порядка 60%); отсутствие перегрева подложек и возможность нанесения пленок на гибкие органические материалы; сохранение стехиометрии состава распыляемого материала; хорошая адгезия осажденных пленок. Недостаток системы на постоянном токе — возможность возникновения электрического дугового разряда на мишени.

## ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Его особенностью является возможность распылять диэлектрики, что исключается в системах на постоянном токе. ВЧ распыление можно применять во всех рассмотренных выше системах ионно-плазменного распыления. Например, в диодной системе в вакуумной камере размещены два электрода с водоохлаждением. Один электрод является держателем мишени, другой — держателем подложек. ВЧ напряжение прикладывается к электродам-держателям. На мишень подают напряжение 1 ...5 кВ при мощности 1 ... 2 кВт. Распыление проводится в вакууме $\approx$ 1 Па в высокочастотном разряде, мишень попеременно бомбардируется электронами и ионами. Можно считать, что за один полупериод напряжения происходит нейтрализация заряда на диэлектрической мишени, а за второй — распыление мишени. При использовании скрещенных электрических и магнитных полей возможны увеличение степени ионизации газа и повышение вакуума до $10^{-2}$ Па.

Преимущества метода: возможность получения проводящих пленок и диэлектрических слоев; возможность распыления многокомпонентных мишеней с точным воспроизведением стехиометрии; высокая скорость конденсации ($\approx$ 100 нм/мин); возможность использования ВЧ диодной установки для травления материалов, в том числе диэлектриков (см. § 6.12); хорошая адгезия пленок. Недостаток — возможность разогрева поверхности пленки быстрыми электронами до критических температур и нарушение ее структуры.

## РЕАКТИВНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Может применяться во всех рассмотренных выше системах распыления. Для этого в вакуумную камеру вводят добавки реакционноспособных газов ($O_2$, $N_2$, $C_2H_2$, $CH_4$ и др.) или газ, способный взаимодействовать с материалом катода, образуя летучие соединения. Наиболее широко применяется реактивное распыление для получения маскирующих пленок окислов и нитридов. Например, в азотно-аргонной, кислородно-аргонной и азотно-кислородно-аргонной среде получают нитриды, оксиды и оксинитриды тантала [6.25]. При получении окислов чаще используют диодную систему, где процесс катодного распыления проводится в контролируемой атмосфере, состоящей из аргона с добавкой кислорода — реактивного компонента. В триодных системах проводится реактивное рас-

ыление двойных и тройных сплавов Ta-Au в атмосфере Ar + $O_2$; Ti — Zr — — Al в атмосфере Ar + $N_2$; Ta — NiCr в атмосфере Ar + $N_2$.

Преимущество метода — возможность получения окислов и нитридов практически любых материалов.

## РАСПЫЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ — ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

В качестве автономного ионного источника можно использовать практически любую компактную катодную систему, обеспечивающую поток сфокусированных ионов. Ионный источник с коаксиальной конструкцией электродов схематически изображен на рис. 6.11, где основные элементы: катод *1*, кольцевой анод *2* и магнитная система *3*. В центре катода имеется отверстие для подачи газа (аргона или реакционноспособного газа). Давления внутри источника $p_1 \approx 1 \ldots 10$ Па достаточно для поддержания разряда. Газ ионизируется при прохождении зоны разряда, и пучок ионов *4* поступает в вакуумную камеру, бомбардируя мишень *5*. Жирная штриховая линия — ускоряющая сетка при прохождении пучка ионов в вакуумную камеру. Тонкая пунктирная линия — траектория движения пучка ионов. Давление в вакуумной камере $p_2 < p_1$ и равно $10^{-2} \ldots 10^{-3}$ Па [6.22]. Разница давлений $n_2$ и $p_1$ обеспечивается откачкой вакуумной системы и разницей объемов ионного источника и вакуумной камеры. Автономный ионный источник чаще применяется для ионного травления (см. § 6.12).

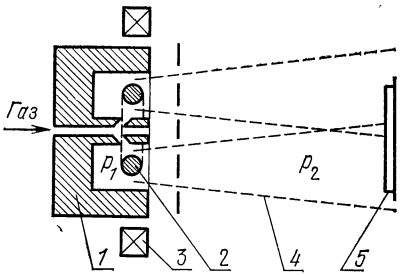


Рис. 6.11

Преимущества метода: низкое давление в реакционной камере и, как следствие, большая чистота осажденных пленок; высокая скорость осаждения благодаря малому расстоянию между мишенью и подложкой; возможность распыления материалов нескольких мишеней, т. е. получение пленок сложного состава; возможность реактивного распыления и ионного травления материалов в одной установке.

## 6.8. ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

### ПИРОЛИЗ

Пиролиз — термическое разложение сложного вещества, находящегося в виде пара. При контакте паров исходного вещества с нагретой поверхностью на границе фаз происходит разложение вещества с образованием на подложке осажденного твердого слоя и газообразных продуктов, которые удаляются из реактора. Осаждение из газовой фазы проводится в горизонтальном или вертикальном реакторе [6.26, 6.27].

Для получения пленок окислов III, IV групп периодической системы элементов обычно используют реакцию термического разложения элементоорганических соединений (ЭОС). Для получения пленок чистого $SiO_2$ проводится пиролиз силанов (тетраэтоксисилана — ТЭОС, этилтриэтоксисилана — ЭТЭОС, амилтриэтоксисилана и др.). Реакцию пиролиза ТЭОС в инертной среде в окончательном варианте можно представить следующим образом:

$$Si(OC_2H_5)_{4\,(газ)} \xrightarrow{750^\circ C} SiO_{2\,(тв)} + 4C_2H_4\uparrow_{(газ)} + 2H_2O_{(пар)}.$$

Использование в качестве газа-носителя кислорода позволяет проводить реакцию при температуре 300 ... 400° С с высокой скоростью (20 нм/мин), однако при этом повышается вероятность взрыва.

Пиролиз металлоорганических соединений (МОС) позволяет получать окислы и металлические пленки. Исходным материалом для получения $Al_2O_3$ могут служить соединения триалкильного и триалкоксильного ряда: $Al(CH_3)_3$, $Al(C_2H_5)_3$, $Al(C_3H_7)_3$, $Al(C_4H_9)_3$ или $Al(OC_2H_5)_3$, $Al(OC_3H_7)_3$ и т. д. В качестве газа-носителя используются сухие газы $N_2$, $N_2+O_2$, $N_2+H_2$. Для получения пленок Mo используют арен-карбонильное соединение $C_6H_5Mo(CO_3)$; для пленок W-дибензолвольфрам $(C_6H_6)_2W$; пленки Cr получают разложением дибензолхрома, а также карбонила хрома $C_6H_5Cr(CO)_3$, пленки Ni и NiCr — разложением бисэтилбензолхрома и бисэтилбензолникеля. При разложении паров формиата меди $Cu(HCO_2)_2 \cdot H_2O$ в потоке аргона при $T \approx +380°$ С получаются пленки Cu с малым числом дефектов [6.26]. Слои $Ta_2O_5$ из МОС с высокой температурой кипения {$Ta(O_3H_7)_5$ — пентоизопропилтантал} получаются в вертикальном кварцевом реакторе.

Перспективными диэлектрическими материалами являются карбиды и нитриды. Поликристаллический карбид кремния SiC можно получить пиролизом метилхлорсилана:

$$CH_3SiCl_{3\,(газ)} \rightarrow SiC_{(тв)} + 3HCl_{(газ)}.$$

Нитрид кремния $Si_3N_4$ осаждают из газовой фазы методом аммонолиза $SiCl_4$ сухим $NH_3$ или нитрованием $SiH_4$ аммиаком. Аналогично можно получить нитрид германия. В качестве примера пиролиза более сложной системы с участием активных газов рассмотрим получение $Al_2O_3$ из $AlCl_3$:

$$\underset{\substack{\uparrow \\ 2AlCl_3}}{AlCl_{6\,(газ)}} + 3H_{2\,(газ)} + 3CO_{2\,(газ)} \rightarrow Al_2O_{3\,(тв)} + 6HCl_{(газ)} + 3CO_{(газ)}.$$

В некоторых случаях применяют стекловидные смешанные пленки (окислов, нитридов и окислов), когда они обладают лучшими электрофизическими свойствами. Примером получения стекловидной смеси является следующая реакция:

$$SiCl_{4\,(газ)} + POCl_{3\,(газ)} + H_{2\,(газ)} + CO_{2\,(газ)} \rightarrow SiO_2 \cdot P_2O_{5\,(тв)} + газы.$$

Качество пленок, получаемых при пиролитическом осаждении, определяется давлением паров разлагаемого вещества, общим потоком газов, температурой осаждения, геометрией реакционной камеры.

## ТРАНСПОРТНЫЕ РЕАКЦИИ

**Газотранспортные реакции.** Примером газотранспортной реакции может служить осаждение $Al_2O_3$ за счет разности температур источника и подложки:

$$Al_2O_3 + 6HCl \xrightarrow{+400°C} 2AlCl_3 + 3H_2O \xrightarrow{+800°C} Al_2O_3 + 6HCl.$$

Пленки CdS с подслоем ZnS на сапфире получают в результате обратимых газотранспортных реакций в атмосфере $H_2$:

$$ZnS + H_2 \rightleftarrows H_2S + Zn;$$

$$CdS + H_2 \rightleftarrows H_2S + Cd.$$

**Химические транспортные реакции.** При химических транспортных реакциях твердое или жидкое вещество взаимодействует с газообразным соединением, при этом образуются газообразные продукты реакции. Реакция обратима, сдвиг равновесия зависит от температур. Методом газотранспортных реакций получают слои различных окислов, а также нитридов, боридов и других соединений.

## ПИРОГИДРОЛИЗ

Многие химические соединения способны гидролизоваться не только в водных растворах, но и при взаимодействии с водяными парами. Легко гидролизуются хлориды, алкоксисоединения различных элементов, а также галогеносодержащие кремнийорганические соединения и частично замещенные алкоксисоединения с алкильными и арильными органическими радикалами [6.29]. Нагретые

пары пленкообразующего вещества или пары его раствора в легколетучей жидкости (например, $TiCl_4$ в $CCl_4$) подают вместе с парами воды в печь. Подложку нагревают в печи сопротивления или ВЧ нагревателем. Рост пленок зависит от материала и температуры подложки. В качестве примера рассмотрим процесс образования пленок двуокиси кремния $SiO_2$. В результате гидролиза $SiCl_4 + 4\ H_2O = Si\ (OH)_4 + 4\ HCl$ ортокремниевая кислота адсорбируется на поверхности подложки и дегидратируется, образуя равномерный слой $SiO_2$: $Si\ (OH)_4 = SiO_2 + H_2O$. Наиболее изученной является реакция гидролиза галоидов алюминия $2AlCl_3 + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6HCl$. Пирогидролизом получают также пленки двуокиси титана [6.30] $TiCl_4 + 2\ H_2O \rightarrow TiO_2 + 4\ HCl$.

Одним из вариантов получения пленок толщиной до 1,5 ... 2,0 мкм пирогидролизом является газоструйный метод, заключающийся в пульверизации паров гидролизующихся соединений на нагретую подложку.

Метод осаждения из газовой фазы в сочетании с фотолитографией позволяет получить ширину проводников до 0,5 мкм. Этим методом получают качественные пленки при понижении температур процесса за счет использования новых реагентов и технологических приемов (действие ВЧ полей, воздействие УФ излучений, создание газовых разрядов, понижение давления в реакторе и т.д.). Перспективными диэлектрическими материалами, осаждаемыми из газовой фазы для СВЧ интегральных схем, являются BN, $TiO_2$, $Al_2O_3$ в сочетании с $SiO_2$ и $Ta_2O_5$.

## 6.9. ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ РАСТВОРОВ

### ГИДРОЛИЗ

При осаждении окисных пленок из растворов гидролизирующихся соединений в качестве пленкообразующих обычно применяют вещества, находящиеся в растворе в коллоидальном или полимеризованном состоянии [6.29, 6.31]. Растворы обладают пленкообразующими свойствами при комнатной температуре либо только при нанесении их на нагретую подложку методом пульверизации (температура подложки 300 .. 600° С). Последний метод по физико-химическим процессам и получаемым пленкам приближается к осаждению пленок из газовой фазы газоструйным методом, но ряд реакций по взаимодействию компонентов осуществляется в растворе, а не в парах. Методом "пульверизации" получают пленки $SiO_2$-$B_2O_3$-$Al_2O_3$-PbO, пленки $SnO_2$ и др., толщина которых, от долей микрона до нескольких микрон, определяется временем обработки подложки парами. Чаще применяют осаждение пленок толщиной 0,1 ... 0,3 мкм методом центрифугирования (скорость вращения центрифуги 2000 ... 4000 об/мин). Пленки толщиной до 1 мкм и больше можно получить в результате многократного нанесения растворов с промежуточным прогревом слоев.

Наиболее изученными и нашедшими практическое применение для получения пленкообразующих растворов являются алкоксисоединения элементов IV группы и некоторых элементов III и V групп: $Si\ (OCH_3)_4$, $Si\ (OC_2\ H_5)_4$, $Ti\ (OCH_3)_4$, $Sn\ (OC_2H_5)_4$, $Al(OC_2H_5)_3$ и др. Пленкообразующими могут быть и некоторые неорганические соли в спиртоводных и ацетоводных смесях, хлориды (Zn, Al, Si, Ti, Ta, Mn и др.), нитриды (Al, Zn, La, Ti и др.), хлорокиси (Ti, Sb, V, W и др.), ацетаты (Zn, Al, La, Si и др.) и соли легко испаряемых и разлагающихся кислот.

В качестве основного пленкообразующего компонента чаще всего применяют гидролизующиеся алкоксисоединения кремния. Реакцию гидролиза можно представить в виде

$$>Si-OR + HOH \rightarrow >Si-OH + ROH.$$

Она обычно сопровождается межмолекулярной конденсацией продуктов гидролиза и образованием полисилоксанов. Окислы, которые трудно нанести в виде однокомпонентного слоя, вводят в пленкообразующий раствор из другого окисла, который обеспечивает получение высококачественных пленок. Наиболее часто применяемым материалом для получения коллоидных пленкообразующих растворов является тетраэтоксисилан (ТЭОС). Гидролиз последнего проводится в при-

сутствии органических полярных растворителей, хорошо смешивающихся с водой (обычно спирт, ацетон). В качестве катализатора процесса гидролиза и стабилизатора готового раствора применяют неорганическую кислоту (обычно HCl, $HNO_3$). Например, на 100 мл раствора берут ТЭОС 12 ... 30 мл; $H_2O$ — 2 .. 10 мл; HCl 2 ... 10 мл, $C_2H_5OH$ до 100 мл. Для получения многокомпонентных стекол в раствор вводятся алкоксисоединения, гидролизующиеся соли и т. д. необходимых элементов. Возможно взаимодействие исходных соединений с растворителем и водой, между собой и с продуктами гидролиза ТЭОС. Для устойчивости растворов в состав вводятся щелочные окислы и борный ангидрид. Пленкообразующие растворы ТЭОС — золи характеризуются определенной вязкостью и «временем жизни». Старение сопровождается резким увеличением вязкости и необратимым превращением растворов в гель. Растворы хранят в герметичной упаковке, предохраняющей их от доступа влаги.

Технология осаждения окисных пленок из растворов гидролизующихся соединений: приготовление раствора требуемого состава; его созревание (от нескольких часов до нескольких суток); нанесение раствора на подложку — образование пленки, более полный гидролиз и удаление летучих компонентов (вода, растворитель и др.), при этом скорость образования пленки зависит от влажности воздуха и температуры подложки; прогрев подложки с пленкой до 120 ... 150° С (высушивание) и повышение адгезии пленки; термообработка 200 ... 400°С и окончательный гидролиз (до 200° С); полное удаление растворителей и органических остатков и разложение неорганических солей и кислот (200 ... 500° С); вжигание пленки выше 500° С (температура зависит от состава стекла) и окончательное формирование окисных пленок. Выпускается несколько марок растворов-эмульситонов для получения окисных пленок: Т — 1/4-0,04 ($SiO_2$); КФК-50-10Т ($SiO_2+P_2O_5$), КБК-5-20Т ($SiO_2+B_2O_3$); КАС-80-1Т ($SiO_2+Al_2O_3$) и др., обеспечивающих стабильность свойств в течение шести месяцев.

При изготовлении ГИС применяется нанесение на ситалловую подложку адгезионного подслоя хемоэмали следующего состава: свинец уксуснокислый 8,5 г; триметоксибор 3,2 мл; ТЭОС 11 мл, этиленгликоль 2 ... 3 мл; спирт этиловый 20 мл (состав в расчете на 10 г стекла). Свинцово-боро-силикатное стекло получается вжиганием при температуре 850° С. Затем на подложку центрифугированием наносится 12%-ный препарат «жидкое золото». Подложка обрабатывается при температуре 780° С и на поверхности получается пленка металлического золота с высокой адгезией благодаря промежуточному слою PbO — $B_2O_3$ — — $SiO_2$. Боросиликатные пленки используются для защиты нихромовых резисторов и фотошаблонов.

Достоинства метода: простота оборудования; высокие качества получаемых пленок; разнообразие химического состава стекол; возможность получения адгезионных подслоев (при сохранении высокого класса поверхности подложки), диэлектрических прокладок, защитных слоев.

## ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ХАЛЬКОГЕНИДОВ МЕТАЛЛОВ

Халькогенидными пленками, или халькогенидными стеклами, называют пленки соединений $MeB^{VI}$ (где Ме—металл, а $B^{VI}$ — элементы шестой группы S, Se, Te). Интерес к халькогенидным пленкам вызван их физическими свойствами (полупроводниковыми свойствами, устойчивыми высокоомными и низкоомными состояниями). Для осаждения пленок готовится раствор комплексной соли металла, а затем добавляется халькогенизатор (тиомочевина, селеномочевина, тиоацетамид и др.). На подложках ситалла, предварительно подвергнутых кислотной обработке, и на органических диэлектриках осаждаются пленки CdS, CuS, PbS, NiS для формирования резисторов с сопротивлением от $10^{10}$ ... $10^{11}$ Ом/□ для CdS, до 60 ... 150 Ом/□ для NiS. Приведем пример растворов для осаждения пленок: 1) PbS : Pb $(CH_3COO)_2$ — $5\cdot10^{-3}$ ...$10^{-2}$ Моль/л, KOH, — 0,05 ... 0,1 Моль/л, $N_2H_4CS$ — 0,05 ... 0,1 Моль/л; 2) CuS : $CuSO_4$ — $10^{-3}$ ... $10^{-2}$ Моль/л, $NH_3$ — 1,0 ... 2,0 Моль/л, $N_2H_4CS$ — $10^{-3}$ ... $10^{-2}$ Моль/л, $10,5 < pH < 12,1$ [6.32]. Получаемые пленки обладают хорошей адгезией к диэлектрикам, в том числе к гибким (полиимидные пленки). Нанесение халькогенидных пленок исключает операции сенсактивации и химического меднения. Гальвани-

ческое (электролитическое) осаждение металлов проводится из медных и никелевых электролитов непосредственно на халькогенидные пленки, последние используются в качестве проводящего и адгезионного подслоя. Осажденные халькогенидные пленки полностью повторяют рельеф подложки и не снижают класса чистоты поверхности.

## ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В основе метода химического восстановления металлических пленок лежит реакция взаимодействия ионов металла с восстановителем, в результате которой на каталитически активную поверхность оседает слой металла [6.33]. В качестве восстановителей наиболее часто применяют гипофосфит $H_2PO_2^-$ ($NaH_2PO_2$); боргидрид $BH_4^-$ ($NaBH_4$) и его производные $R \cdot BH_3$; формалин $CH_2O$, гидразин $N_2H_4$ и его производные $R \cdot N_2H_4$ (гидразин-сульфат, гидразинборан и др.). В состав растворов химической металлизации обычно входят: соли металла, восстановитель, лиганды — комплексообразователи, стабилизаторы и вещества, регулирующие $pH$ раствора. Химическое осаждение пленок проводится на диэлектрические подложки и металлический рельеф [6.34].

Химическая металлизация диэлектриков начинается с предварительной обработки подложки, затем проводится осаждение меди и никеля. Слой никеля осаждается без предварительного развития поверхности при последующем высокотемпературном вжигании. Для осаждения химической меди подложку подвергают матированию, например, при осаждении хим. Cu используют ситалловые подложки $\nabla$ 8 ... 10. Предварительно проводится сенсибилизирование поверхности. В качестве сенсибилизатора обычно применяются соли Sn (II). Продукты гидролиза олова присоединяются к поверхности во время промывания ее водой. Сенсибилизирование улучшается при промывании водным раствором аммиака ($pH=10$), а также при введении в раствор небольшого количества Sn (IV), при обработке подложек в водном растворе ацетона и когда ацетон вводится в раствор сенсибилизатора. Используются кислые, спиртовые и щелочные растворы сенсибилизаторов. При сенсибилизировании ситалла обычно применяется состав $SnCl_2 \cdot 2\ H_2O$ 10...100 г/л, HCl 10... 50 мл/л; возможно введение поверхностно-активного вещества (ПАВ), например лаурилсульфата натрия 0,001... 250 г/л, [6.33]. Для надежного сенсибилизирования необходимо тщательно соблюдать режим промывки.

Для последующего активирования ситалла чаще всего используются кислые растворы $PdCl_2$ : $PdCl_2$ 1...2 г/л, HCl 10 ... 12 м/л, $H_2O$ до 1 л, $pH =$ 1,5...2,5, возможно введение ПАВ и органических растворителей. От количества оставшегося на поверхности подложки палладия зависят скорость металлизации и адгезия химически осажденных покрытий. Высушивание активированной поверхности увеличивает сцепление металла с подложкой. Для усиления активирования многократно повторяют операции сенсибилизирования и активирования, которые можно совмещать (сенсактивирование). В этом случае сенсактиватор содержит ионы $Sn^{2+}$ и $Pd^{2+}$, например: $PdCl_2$ 1 г/л, $SnCl_2$ 45 г/л, HCl 120 мл/л, KCl 190 г/л, $H_2O$ до 1 л (подогрев и вибрация). Применяются беспалладиевые активаторы для последующего осаждения хим. Cu, обеспечивающие хорошую адгезию медной пленки. В качестве примера медного активатора укажем следующий состав: Cu $(CH_3COO)_2$ 50 г/л; глицерин 50 г/л, патока рафинадная 420 г/л (или сахар рафинад 170 г/л), $SnCl_2$ 0,2 г/л; ПАВ (феноксол) 15 мл/л; $H_2O$ до 1 л; $3{,}5 < pH < 5$. Раствор наносится методом окунания, подложки с нанесенным слоем активатора подвергаются термической обработке $\approx 150°$ С в течение 1 ч в атмосфере азота. Химическое меднение проводится для получения проводящего подслоя под электролитически осаждаемую до номинальной толщины медь. Слой химической меди должен обладать хорошей адгезией, для чего применяется состав, содержащий ионы никеля. В состав осадка входит $\approx 4\%$ никеля. Для химического меднения ситалловых подложек применяется состав: $CuSO_4$ 15 ... 20 г/л; $NiCl_2$ 4... 5 г/л; K, Na виннокислый 60 ... 80 г/л; NaOH 15 ... 20 г/л; $Na_2CO_3$ 5... 7 г/л; $CH_2O$ (30 ... 40%-ный) 20 ... 30 мл/л; $H_2O$ до 1 л; $11{,}1 < pH < 12{,}4$. Толщина осажденного слоя меди 1 ... 3 мкм.

Большой интерес представляет возможность получения толстых слоев химической меди с высоким качеством и низким удельным сопротивлением. Известен ряд рецептур толстослойного химического меднения [6.1]: 1) $CuSO_4$ 50 ... 100 г/л, NaOH 60 г/л, K, Na виннокислый 170 г/л, трилон Б 20 г/л, $NiCl_2$ 4... 5 г/л, $C_2H_5OH$ 50 мл/л, $K_3[Fe(CN)_6]$ 0,1 г/л, $CH_2O$ 30 мл/л, 10%-й раствор триформилизопертиоцианата —0,15 мл/л. Осаждение проводится с помощью вибрации ванны; 2) $CuSO_4$ 25 г/л, трилон Б 50 г/л, NaOH 25 г/л, 2-меркаптобензтиазол (2-МБТ) 10 мл/л, $K_3[Fe(CN)_6]$ 30 .... 60 мг/л; $CH_2O$ 40 .... 60 мл/л; $pH$ до 12,8 (при температуре $\approx 50°$ С скорость осаждения до 40 мкм/ч); с понижением температуры реакции и уменьшением величины $pH$ скорость осаждения снижается; 3) $CuSO_4$ 90....110 г/л, NaOH 90 ... 110 г/л, K, Na виннокислый 150 ... 200 г/л, $Na_2CO_3$ 25.... 30 г/л, $CH_2O$ 30 .... 40 мл/л, $C_2H_5OH$ 40 .... 60 мл/л, ПВС 0,04 .... 0,06 г/л. Однако растворы не обеспечивают воспроизводимости процессов меднения плоской поверхности. Осаждение толстослойной химической меди делает возможным металлизацию отверстий и разомкнутых элементов схемы без формирования контактных технологических перемычек, которые необходимы при электролитическом доращивании.

Электролит для химического осаждения никеля на диэлектрическую подложку выбирают в соответствии с заданными электрическими свойствами никелевого подслоя. При формировании никелевых резисторов применяют следующий раствор одноразового использования: $NiCl_2$ 30 г/л, $NaH_2PO_2$ 40 г/л. При химическом осаждении никеля в качестве адгезионного и токопроводящего подслоя под гальваническое наращивание меди после осаждения никеля проводится термообработка подложек с хим. Ni $\approx$180 ... 200° С в течение 2 ... 3 ч. Для дальнейшего формирования никелевых резисторов проводится стабилизирующая термообработка 200° С в течение 20 ч.

При химической металлизации металлов осаждение Ni, Au, Pd по сформированному рельефу схемы применяют в качестве защитных антикоррозионных покрытий. Процесс осаждения никелевых покрытий химическим восстановлением из растворов самопроизвольно начинается только на металлах, катализирующих эту реакцию (Al, Zn, Mg, Ni, Co и т. д.). Для осаждения никеля на медь последняя приводится в контакт с более электроотрицательным металлом, чаще всего с Al. Однако операция касания алюминиевой палочкой каждого элемента схемы — трудоемкий и сложный процесс. При осаждении никелевых покрытий из растворов с восстановителем $NaH_2PO_2$ на платах, не содержащих никелевых резисторов, рекомендуется предварительная активация медного рельефа в растворе: $PdCl_2$ 0,5 ... 0,4 г/л, K, Na виннокислый 25 ... 30 г/л, HCl 50 ... 55 мл/л, $H_2O$ до 1 л, — обеспечивающем равномерное осаждение никеля по поверхности без разрастания элементов схемы. Для химического никелирования применяют следующий раствор: $NiCl_2$ 45 г/л, $Na_3C_6H_5O_7$ 45 г/л, $NH_4Cl$ 25 г/л, $NaH_2PO_2$ 10 г/л, $pH = 7{,}8 ...8$, $T = 80 ... 85°$ С, скорость осаждения 10 мкм/ч, толщина слоя Ni обычно 2 ... 5 мкм. При монтаже навесных контактов с помощью сварки рекомендуется осаждение покрытий Ni-B. Состав раствора для автокаталитического осаждения никеля на медный рельеф, не нуждающийся в дополнительных инициаторах процесса: Ni $SO_4$ 40 г/л, $NaH_2PO_2$ 30 г/л, $NH_4Cl$ 120 г/л, лимонная кислота 80 г/л, $pH = 4 ... 4{,}2$, T 80 ... 90° С. При формировании покрытий Ni-B, Ni-P возможно увеличение электрических потерь, что требует подбора состава раствора и режима никелирования. Можно получить бесфосфорное никелевое покрытие из раствора [6.35] Ni $(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 41 г/л, $N_2H_4 \cdot H_2SO_4$ 8 г/л. Химическое золочение по слою хим. Ni проводится в электролите: $K[Au(CN)_2]$ 4 г/л, $Na_3C_6H_5O_7$ 50 г/л, $NH_4Cl$ 75 г/л, $NaH_2PO_4$ 10 г/л, $pH \approx 7$, $T = 90 ... 95°$ С. Толщина покрытия Au 0,5 ... 1 мкм. Для улучшения адгезии и снятия внутренних напряжений подложки со сформированными слоями хим. Ni, хим. Au подвергают отжигу + 180° С—20 ч. Для химического палладирования по никелю применяют раствор $PdCl_2$ 4 ... 5 г/л, трилон Б 12 ... 30 г/л. $NH_4OH$ 300 ...350 мл/л, гидразин гидрат $\approx$ 2 г/л.

Химическое бестоковое осаждение металлов имеет преимущество перед гальваническим осаждением, повышая равномерность осаждаемого покрытия по поверхности подложки и исключая необходимость формирования, защиты и удаления технологических перемычек. Покрытие хим. Ni — хим. Au применяется для защиты микросхем в негерметичных корпусах [6. 36].

## ИММЕРСИОННОЕ И КОНТАКТНОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В РАСТВОРАХ

Возможно только на металлической поверхности за счет растворения более электроотрицательного металла, толщина слоя 0,1 ... 1 мкм. Отметим основные процессы: 1) иммерсионное серебрение электрически не соединенных проводников за счет обменной реакции между ионами серебра в растворе и медью на поверхности схемы в составе: Ag 15 ... 17 г/л ($AgNO_3$), $K_4Fe(CN)_6$ 40 ... 50 г/л, KCNS 50 г/л, $Na_2S_2O_3$ 5 г/л, $pH = 8 ... 10$, T 55° C с последующей термообработкой 120° C 2 ч и ингибированием в растворе каптакса ≈ 10 г/л; 2) контактное золочение медных проводников ($2Au^+ + Cu^0 \rightarrow Cu^{2+} + Au^0$) в растворе Au 9 ... 10 г/л [$KAu(CN)_2$], $K_3C_6H_5O_7$ 40 г/л, $C_6H_8O_7$ 40 г/л, $T \approx 95$ °C; 3) оловянирование медных проводников ($Sn^{2+} + Cu^0 \rightarrow Sn^0 + Cu^{2+}$) в растворе $SnCl_2$ 5 ... 8 г/л, тиомочевина 35 ... 45 г/л, $H_2SO_4$ 30 ... 40 г/л; 4) никелирование медных проводников в расплаве; CaCl 100 г. $NiCl_2$ 4 г, $NH_4Cl$ 2 г, $H_2O$ 60 мл, температура расплава + 160° C. Последняя реакция может быть использована для никелирования медных проводников на платах с никельсодержащими резисторами. При осаждении никеля из расплава никельсодержащие резисторы на плате пассивируются. Последующее доращивание никеля до номинальной толщины в растворе химического восстановления не требует дополнительной активации.

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Выполняется из растворов методами центрифугирования, распыления, вытягивания и т. д. Для получения диэлектрической пленки заданной геометрии применяют специальные светочувствительные композиции — фоторезисты (см. § 6.11) — или наносят материалы методом пульверизации при использовании «свободной» маски. Селективное осаждение полимерной пленки может применяться при формировании диэлектрических прокладок конденсаторов и для локальной защиты элементов схемы. При локальной изоляции с помощью полиимидных пленок используются следующие технологические операции: нанесение полиамидных лаков и сушка на воздухе; получение негативного рельефа с помощью фоторезистов ФН-11, ФН-5ТК; травление полиамида в окнах фоторезиста в растворе щелочи; удаление фоторезиста; имидизация (термическая полимеризация) полиамидного рельефа. Полиимидные пленки обладают высокой термостойкостью и хорошими диэлектрическими характеристиками.

Для герметизации полосковых и микрополосковых схем применяют фторопластовый лак ФП-525, силоксановый лак КО-990 и др., используют пленки, осажденные из раствора полистирола в толуоле, раствора фторорганических полимеров в смеси органических растворителей (ацетон 25%, толуол 25%, амилацетат 50%) и др. Возможно использование широкого спектра материалов с подбором соответствующих диэлектрических характеристик температурных режимов и способов нанесения.

# 6.10. ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК В РАСТВОРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

## ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ (ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ) ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Основано на электролизе растворов под действием электрического тока и осаждении металла на катоде [6.37]. В ИС методом электролитического осаждения изготовляют токопроводящие элементы схемы (Cu, Ag) и защитные антикоррозионные покрытия (Ni, Au, Sn-Bi, Sn-Co и др.).

В зависимости от технологии осаждение слоя металла проводится по всей поверхности подложки (субтрактивная технология), по сформированному рисунку схемы, соединенному в единую электрическую цепь с помощью технологических перемычек (усиление сформированного медного рельефа, осаждение защитных

покрытий); в окнах резистивной защитной маски предварительно нанесенный токопроводящий подслой используется в качестве электрического контакта (полуаддитивная технология). Равномерность нанесения электролитических покрытий зависит от геометрических и электрохимических условий их осаждения. Для улучшения электрохимических условий применяют электролиты с высокой рассеивающей способностью. При заниженных плотностях тока возможно утоньшение покрытия в середине платы, при завышенных плотностях тока — образование утолщений и шероховатостей на углах и торцах платы. В качестве анодов могут применяться растворимые аноды, состоящие из осаждаемого металла (проводящий слой платы обычно служит катодом). Для предотвращения зашламления ванны аноды неблагородных металлов помещают в защитные чехлы из ткани «Бельтинг» или хлорин. При электрической проработке свежеприготовленного электролита аноды загружаются на всю глубину ванны, электролит перемешивается. При рабочем режиме ванны глубина погружения плат должна быть несколько ниже глубины погружения анодов для обеспечения равномерности осаждения. Равномерность осаждения металлического слоя по поверхности платы повышается при тщательном подборе соотношения площадей анод—катод и расстояния анод — катод и при оптимальном взаиморасположении металлизируемых подложек (катода) и анода (вертикальном, горизонтальном).

Мелкокристаллические малонапряженные осадки получаются при реверсировании тока, т. е. периодическом переключении полюсов на шинах ванн с помощью автоматического реле времени. Соотношение катодных периодов (осаждение металла на подложку) и анодных периодов (частичное растворение осажденного покрытия) обычно составляет от 15 : 1 до 7 : 1. Реверсирование способствует получению более плотных и качественных покрытий, устраняет пассивирование анодов, что позволяет повысить плотность тока, а следовательно, и скорость осаждения покрытий. Наиболее гладкие и беспористые слои получаются при осаждении Cu, Sn-Bi, Sn-Co при использовании асимметричного переменного тока промышленной частоты [6.37]. Для улучшения качества получаемых осадков применяются механическое или воздушное перемешивание электролитов, ультразвуковая вибрация, строго соблюдается температурный режим осаждения. Для получения равномерных покрытий платы располагаются параллельно анодам.

При формировании медного проводящего слоя номинальной толщины электролитическим осаждением необходимо получить плотный (беспористый) мелкокристаллической осадок с минимальным удельным сопротивлением, не снижающий класса обработки поверхности платы и обеспечивающий высокую точность выполнения последующих операций. Хорошими свойствами обладают медные пленки, осажденные из цианистых электролитов, однако из-за высокой токсичности последние не находят широкого применения при изготовлении ИС.

В группе щелочных электролитов следует отметить пирофосфатный электролит, отличающийся высокой плотностью, равномерностью, блеском осажденной меди с наилучшими электрическими характеристиками. Пример состава пирофосфатного электролита меднения $CuSO_4$ 30 ... 35 г/л, $Na_4P_2O_7$ 120 ... 145 г/л, $Na_2HPO_4$ 60 ... 100 г/л, $KNaC_4H_4O_6$ 25 ... 35 г/л, $pH = 8 ... 9$, $T \approx 50 ... 70°C$, катодная плотность тока $D_к = 1 ... 1,5$ А/дм². Недостатки пирофосфатного электролита: необходимость подогрева и перемешивания раствора, а также сложность его корректировки.

Используют также щелочной этилендиаминовый электролит: $CuSO_4$ 100 ... ... 120 г/л, $(NH_4)_2SO_4$ 50... 60 г/л, $Na_2SO_4$ 50 ... 60 г/л, этилендиамин 50 ... 60 г/л, $pH = 7,5 ... 8$, $D_к = 1$ А/дм². Применяют реверсирование тока.

Из кислых электролитов используют электролиты с добавкой этилового спирта, например $CuSO_4$ 160 ... 200 г/л, $H_2SO_4$ 40 ... 50 г/л, кислота винная 2 г/л, $C_2H_5OH$ 40 ... 50 г/л, $D_к = 3 ... 4$ А/дм². Разработаны электролиты с выравнивающей добавкой ЛТИ, которые отличаются большой рассеивающей способностью, блескообразованием и не нуждаются в дополнительном перемешивании: $CuSO_4$ 70 ... 80 г/л, $H_2SO_4$ 150 ... 180 г/л, NaCl 0,03 ... 0,06 г/л $(NH_4)_2SO_4$ 50 ... 60 г/л, ЛТИ 1... 3 мл/л, $D_к = 2 ... 4$ А/дм².

В качестве защитных антикоррозионных покрытий при изготовлении микрополосковых плат часто применяют комбинированное покрытие Ni-Au.

Осаждение обычно проводится по сформированному рельефу схемы, что обеспечивает полную защиту торцов элементов на плате, однако требует наличия технологических перемычек между разомкнутыми элементами схемы и вызывает неравномерность электролитического осаждения покрытий при ширине полосковых линий менее 10 мкм. Никелевый подслой, предотвращающий диффузию между медью и золотом, рекомендуется осаждать из электролитов, обеспечивающих осадки с минимальными внутренними напряжениями, например, сульфаминовый электролит [6.38]: $Ni(SO_4) \cdot (NH_4)_2 \cdot 6H_2O$ 50 г/л, $C_6H_8O_7$ 2 г/л, $pH = 5{,}6$, $D_к = 0{,}6$ А/дм², скорость осаждения $\approx 0{,}1$ мкм/мин. Напряженные никелевые осадки могут вызывать отслаивание медных проводников от подложки. Наиболее широко для осаждения Ni применяют сернокислые электролиты типа: $NiSO_4$ 200 г/л, NaCl 10 г/л, NaF 6 г/л, $H_3BO_3$ 30 г/л, нафталин $\approx$ 4 г/л, $pH = 5{,}8 \ldots 6{,}3$, $T \approx 40°$ С. В никелевых электролитах используют растворимые никелевые аноды.

Для осаждения золота обычно применяют цитратные электролиты золочения, например: $K[Au(CN)_2]$ 8 ... 10 г/л (в пересчете на Au), $C_6H_8O_7$ 30 г/л, $K_3C_6H_5O_7$ 80 г/л, $D_к = 0{,}4$ А/дм², $pH = 4{,}5 \ldots 5$. Анодами могут служить пластины золота, платины или платинированного титана. Наряду с покрытиями из чистого золота широко применяются покрытия из сплавов на основе золота, например, Au-Co из раствора $K[Au(CN)_2]$ 9 ... 10 г/л (в пересчете на Au), $KC_6H_7O_7$ 60 ... 80 г/л, $CoSO_4$ 1 г/л, $pH = 4{,}5 \ldots 4{,}7$, $D_к \approx 0{,}2$ А/дм². Осадки обладают блеском, повышенной твердостью и износостойкостью, однако напряженность осадков может вызвать отслаивание полосковых элементов от подложки при толщине осадка Au-Co более 5 мкм [6.39].

С целью экономии драгметаллов применяют антикоррозионные покрытия на основе сплавов олова (Sn-Bi, Sn-Co, Sn-Pb, Sn-Ni). Для электроосаждения сплавов Sn-Bi (содержание Bi до 5%) применяют электролит: $SnSO_4$ 45 ... 55 г/л, $H_2SO_4$ 120 ...140 г/л, $BiNO_3$ 0,5 ... 1 г/л, эмульгатор ОП-10 $\approx$ $\approx$ 3 ... 5 г/л. Наличие добавки Bi в покрытии Sn-Bi повышает его антикоррозионную стойкость. Однако режим работы ванны требует постоянного контроля. Для осаждения плотных осадков рекомендуется использовать реверсирование тока. Более стабильным электролитом, обеспечивающим получение плотных полублестящих осадков, является электролит Sn-Co: $SnCl_2$ 50 ... 60 г/л, NaF 30... 40 г/л, NaCl 5.... 7 г/л, $CoCl_2$ 7... 8 г/л, HCl 1 мл/л, вещество ОС-20 В (ГОСТ 10730—64) $\approx$ 2 ... 5 г/л, $pH = 4 \ldots 5{,}5$, $D_к = 0{,}5 \ldots 10$ А/дм². Покрытие содержит $\approx$ 4% Co и отличается высокой антикоррозионной стойкостью. При работе с электролитами для осаждения олова и его сплавов применяют растворимые аноды из олова.

## АНОДНОЕ ОКИСЛЕНИЕ (АНОДИРОВАНИЕ)

Различают электролитическое анодирование—окисление поверхности металла или полупроводника в жидком электролите [6.40] — и плазменное анодирование — окисление образца, находящегося под положительным потенциалом по отношению к кислородосодержащей плазме [6.28]. Анодирование применяют в основном для подгонки резисторов на основе вентильных материалов и их сплавов (Ta, TaN, TaAl, Nb и др.) и для формирования диэлектрических прокладок конденсаторов частичным или «сквозным» (на всю глубину) окислением слоя вентильного металла (Ta, Al, Nb, Ti и др). Часто используют анодные окислы $Ta_2O_5$ и $Al_2O_3$.

В качестве катода при электролитическом анодировании пленок применяют графит или нержавеющую сталь. Потенциал анода подается непосредственно на окисляемый материал или при подгонке резисторов на подвижный анод (молибденовая игла), касающийся окисляемого материала.

Различают два способа электролитического анодирования (электрохимического окисления): 1) при постоянном токе; 2) при постоянном напряжении. Электролитическое анодирование проводится в водных растворах и в безводных электролитах, например в этиленгликоле, диметилформамиде, н-метилацетамиде, спиртах с добавками солей для увеличения электропроводности. При анодировании при постоянном токе приращение толщины окисного слоя сопровождается увели-

чением напряжения в связи с ростом сопротивления окисной пленки. Чаще применяют анодирование при постоянном напряжении, где по мере роста окисной пленки плотность тока уменьшается.

Пленки Al, предназначенные для формирования окисла $Al_2O_3$, должны иметь минимальную высоту микронеровностей и быть устойчивыми к «сползанию» с подложки в процессе электрохимического окисления, что возможно при подборе соответствующего режима и применении адгезионного подслоя из Ti или V. Для сквозного окисления рекомендуется использование ванадиевого подслоя, так как ванадий надежно анодируется, не ухудшая при этом адгезии [6.41].

Окисление при постоянном напряжении до 200 В проводится в водных растворах, а выше 200 В — в неводных электролитах. Для окисления Al можно предложить большое число разнообразных электролитов: 1) 2...4%-ный водный раствор винной кислоты; 2), 0,3%-ный раствор винной кислоты с этиленгликолем (1 : 1); 3) безводный этиленгликоль ~ 114 мл, кислота борная ~99 г, 25%-ный раствор $NH_4OH$ — 48 мл; 4) 20%-ный раствор $H_2SO_4$; 5) 6%-ный раствор щавелевой кислоты, 3%-ный раствор лимонной кислоты и 0,5%-ный раствор борной кислоты (1 : 1 : 1); 6) 10%-ный раствор сульфосалициловой кислоты, 2%-ный раствор борной кислоты (1 : 1) ($U \approx 150 \ldots 180$ В).

Для анодирования тантала применяют безводный этиленгликолевый электролит и водные электролиты следующего состава: 1) этиленгликоль ~514 г/л, щавелевая кислота ~ 236 г/л, вода дистиллированная ~ 250 мл; 2) этиленгликоль ~ 300 г/л, щавелевая кислота ~100 г/л; вода дистиллированная ~200 мл и др. Анодирование тантала в водных электролитах проводят при $U \approx 120 \ldots$ $\ldots 150$ В.

Плазменное анодирование (сухое анодирование) основано на выделении отрицательных ионов, но вместо электролита используется кислородная плазма, содержащая положительные и отрицательные ионы кислорода. Преимущество метода—в большей скорости окисления, во много раз превышающей анодное, и чистоте процесса. Плазменным анодированием проводят подгонку резисторов на основе Ta, Ta-AL, Nb и сплавов PC [6.21].

## 6.11. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

*Литография* — процесс, направленный на создание на поверхности подложки защитного (резистивного) рельефного изображения требуемой конфигурации. Методы создания рельефа разделяются на три группы [6.42, 6.43]: фотолитография (контактная, проекционная); электроно- и рентгенолитография. Литографический процесс включает в себя три основные операции: нанесение на подложку чувствительного к излучениям вещества — резиста и сушка; экспонирование резиста путем воздействия на него актиничным излучением (для фотолитографии — ультрафиолетовым, электронолитографии—электронным и рентгенолитографии — рентгеновским облучением); проявление скрытого изображения путем обработки в проявителях и получение резистивного рельефа. В зависимости от размеров элементов литографию можно разделить на три категории сложности: получение элементов с размерами более 10 мкм — задача полностью решена методами обычной контактной фотолитографии; получение элементов с размерами 10 ... 1 мкм с точностью 0,5 ... 0,2 мкм — задача решается усовершенствованными методами контактной и проекционной фотолитографии; получение элементов менее 1 мкм с точностью 0,2 ... 0,1 мкм — задача решается методами рентгено- или электронолитографии. При изготовлении гибридных интегральных микросхем наиболее широко применяется контактная фотолитография. С помощью фотолитографических процессов формируют защитное рельефное изображение схемы с последующим переносом изображения на подложку.

Прежде чем приступить к фотолитографическим операциям, необходимо изготовить фотооригинал и фотошаблон или комплект фотошаблонов (при проведении нескольких последовательных фотолитографий с совмещением) [6. 44]. С помощью специального оборудования в зависимости от типа используемого фоторезиста изготовляют позитивный или негативный фотошаблон. Применяют эмульсионные, металлизированные и транспарентные фотошаблоны. Эмульсионные фотошаблоны можно изготовить на «безусадочной» фотопленке (ФТ-41П, ФТ-ПП и

др.), обеспечивающей получение минимальных элементов схемы, и на высокочувствительных фотопластинах (СРБШ, ВР-Э, Микрат НК). Для изготовления металлизированных фотошаблонов применяют оптическое стекло (К-8) с металлизированным рисунком (обычно из хрома). Изготовление металлизированных фотошаблонов требует дополнительных технологических операций, однако они обладают рядом преимуществ перед эмульсионными: высокая износостойкость — механическая и термическая стабильность; влагостойкость; резко ограниченные края изображения; отсутствие вуали и др.

Когда технологический процесс предусматривает проведение нескольких последовательных фотолитографических операций, требующих совмещения, комплект фотошаблонов должен иметь изображение базовых элементов или так называемых реперных знаков, представляющих собой вписывающиеся друг в друга фигуры. Качество используемых фотошаблонов во многом определяет качество фотолитографии.

## ФОТОРЕЗИСТЫ

Действие актиничного ультрафиолетового излучения вызывает в фоторезисте фотохимические процессы, которые могут привести к повышению растворимости экспонированного участка (позитивные фоторезисты) или к уменьшению растворимости экспонированного участка (негативные фоторезисты). На рис. 6.12, *а* и *б* дано схематическое изображение процесса экспонирования фоторезиста. На подложку *1* нанесен слой фоторезиста *2*, через фотошаблон *4* фоторезист подвергнут действию излучения. В облученных областях *3* негативного фоторезиста (рис. 6.12, *а*) происходит реакция фотополимеризации или инициированной сшивки линейных полимеров [6.45]. В результате проявления на подложке остается рельефное изображение *5*, обладающее резистивными свойствами. На рис. 6.12, *б* изображен процесс экспонирования позитивного фоторезиста, в облученных областях *3* которого происходит реакция фотолиза с образованием растворимых в проявителе веществ. После проявления на подложке остается рельефное изображение *5* необлученного фоторезиста, обладающее защитными свойствами.

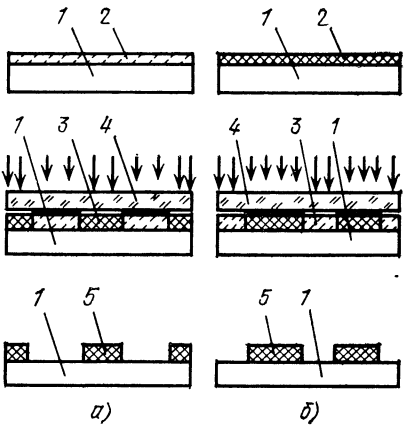


Рис. 6.12

В состав фоторезистов входят светочувствительные составляющие, пленкообразующие продукты и растворители. Взаимодействием компонентов системы определяются свойства фоторезистов. Отечественные позитивные фоторезисты (типа ФП) изготовляются на основе светочувствительных соединений нафтохинондиазидов (НХД), максимум спектральной чувствительности которых лежит в области 330 .... 480 нм. В результате фотолиза светочувствительных соединений облученные участки становятся растворимыми в щелочных составах. По характеру фотохимических реакций негативные фоторезисты (типа ФН) можно разделить на три группы: на основе эфиров коричной кислоты и поливинилового спирта — поливинилцинаматные (ПВЦ) (ФН-5ТК и ФН-4ТВ с добавкой оптического сенсибилизатора); на основе циклокаучуков с добавкой сшивающего сенсибилизатора (фоторезист ФН-11); на основе фотополимеризующихся композиций (акриловые или стирольные сополимеры) с добавкой инициатора полимеризации (фоторезисты ФСТ, ФПК-4ВЩ и пленочные фоторезисты СПФ и ФПП).

Фоторезисты характеризуются следующими параметрами [6.45].

*Разрешающая способность* — число полос фоторезиста, разделенных промежутками такой же ширины на 1 мм (число линий на миллиметр). Разрешающая спо-

собность является относительным критерием, так как зависит от толщины пленки фоторезиста и используемого фотолитографического оборудования. При толщине пленки позитивных фоторезистов 0,2 ... 0,3 мкм с помощью высокопрецизионного оборудования достигается предельная разрешающая способность 1000 ... 2000 лин/мм. Однако при такой толщине пленки фоторезиста не получаются резистивные слои с малой дефектностью. Обычно применяют пленки фоторезиста с толщиной не менее 0,7 ... 1 мкм. Характеризуя разрешающую способность фоторезиста, разумнее говорить о минимальных размерах воспроизводимых элементов при данной толщине фоторезиста в стабильных условиях экспонирования и проявления.

*Светочувствительность* — величина, обратная времени экспонирования, необходимого для перевода фоторезиста в растворимое (ФП) или нерастворимое (ФН) состояние. Светочувствительность зависит от фотолитографического процесса и оборудования. Для сравнения светочувствительности различных марок фоторезистов экспонирование проводят в стабильных условиях.

*Стойкость к воздействию агрессивных факторов* оценивается по числу проколов (дефектов) в пленке фоторезиста на единице площади при воздействии травителей на подложку (кислотостойкость, щелочестойкость) или по числу проколов в пленке фоторезиста при электролитическом осаждении металлов в окнах фоторезиста (гальваностойкость) [6.46].

*Адгезия* фоторезиста к подложке определяет уход размеров элементов в процессе проявления и подтравливание при последующем травлении рельефа, характеризует возможность использования данного фоторезиста на определенном типе подложки. Адгезию можно оценить скоростью отслаивания полосков фоторезистивной пленки в ультразвуковой ванне или агрессивном травителе. Важной характеристикой является также устойчивость к воздействию проявителя (в минутах), исключающая нарушение сформированного слоя при перепроявлении.

*Стабильность* определяет воспроизводимость элементов минимальных размеров при использовании различных партий фоторезиста и при различном времени и условиях их хранения.

Параметры ряда выпускаемых промышленностью жидких фоторезистов представлены в табл. 6.1.

## НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТОВ НА ПОДЛОЖКУ

В зависимости от назначения фоторезиста, его свойств и вязкости можно выбрать один из следующих способов нанесения.

*Центрифугирование* — растекание фоторезиста под действием центробежных сил. Подготовленную (легко смачивающуюся фоторезистом) подложку помещают на столик центрифуги. Из дозатора подают на пластину порцию фоторезиста. Пластина укрепляется на столике центрифуги с помощью воздушного присоса или механических фиксаторов. Скорость вращения центрифуги 1500 ... 6000 оборот/мин, время центрифугирования 20... 30 с. Толщина слоя фоторезиста пропорциональна его вязкости и обратно пропорциональна скорости вращения. Возможная толщина слоя 0,5... 1 мкм, при большей толщине нарушается однородность структуры фоторезистивной пленки. Возможно двухразовое нанесение фоторезиста с промежуточной подсушкой нанесенного слоя. В результате подрастворения первого слоя повторное нанесение не обеспечивает удвоения толщины фоторезиста (например, для фоторезиста ФП-383 один слой $\approx$ 0,8 мкм; два слоя $\approx$ 1,2 мкм). Недостатки метода: наличие валика на краях пластины, размеры которого зависят от вязкости фоторезиста, скорости вращения и геометрии пластины; наличие внутренних напряжений и проколов, возникающих за счет засасывания пылинок к центру вращающейся пластины.

*Вытягивание* — нанесение фоторезиста окунанием (или погружением) — наилучший способ при двусторонней фотолитографии. Время подъема пластины регулируется от 5 до 30 см/мин. Толщина слоя (1... 4 мкм) зависит от скорости извлечения пластины и вязкости фоторезиста (например, для фоторезиста ФП-27-18БС скорость вытягивания 20 см/мин обеспечивает получение слоя 1,5 мкм).

Таблица 6.1

**Основные параметры жидких фоторезистов**

| Марка фоторезиста | Назначение | Спектральная чувствительность, нм | Характеристики по ТУ | | Минимальные размеры, мкм, элементов при толщине фоторезиста 0,8 мкм | Предельно-допустимая концентрация паров растворителя, мг/м³, при температуре | Проявитель | Состав | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Разрешение | Толщина пленки, мкм | | | | растворитель | сухие компоненты |
| ФП-383 6-14-632-76 | Полупроводники ИС, металлические пленки | 330...480 | 400 лин/мм | 1,0±0,1 | 1 мкм | 10 11°С | 2% $Na_3PO_4$ | Диоксан | НХД (продукт 383), ФФС |
| ФП-РН-7 6-14-1061-74 | То же, и окисные пленки | 330...480 | 400 лин/мм | 0,9±0,2 | 1,5 | 10 5,8°С | 0,5% КОН | ДМФ, МЦА МЭК | НХД (продукт 7), ФФС |
| ФП-РН-7-2 6-14-14-98-77 | То же | 330...480 | 400 лин/мм | 1,1...1,4 | 1,5 | 10 5,8°С | 0,5%, КОН | ДМФ, МЦА, МЭК | НХД (продукт 7) ФФС |
| ФП-27-18БС 6-14-424-78 | Полупроводники, ИС, печатные платы, окислы, металлические пленки, гальванические процессы | 330...480 | 100 мкм (ширина воспроизводимых элементов) | 4 | 2 | 120 45°С | 0,5... 1% КОН | МЦА, н-бутанол | НХД (продукт 27), ФФС+бутилированный стиромаль |
| ФП-25 6-14-40-1173-77 | Глубинное травление при повышенных температурах | 330...480 | 20 мкм | 7,0±1,0 | 3 | 10 7°С | 0,5% КОН | ДМФ, МЭК, диоксан | НХД (продукт 7) ФФС |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ФП-29<br>6-14-40-1189-77 | Глубинное травление полупроводниковых подложек | 330...480 | 20 мкм | 6...7 | 3 | 10<br>7°С | 1% КОН | ДМФ, диоксан | НХД (продукт 7) ФФС, эпоксидно новолачный блок-сополимер 6-ЭИ-10 |
| ФП-75<br>6-14-40-1187-77 | Для СВЧ приборов | 330...480 | 20 мкм | 0,9 ..1,0 | 1 | 10<br>7°С | 0,5% КОН | ДЭК, ДМФ МЦА, МЦ | НХД (продукт 7) ФФС |
| ФП-36<br>6-14-40-1174-77 | Для металлизированных фотошаблонов | 330...480 | 2±0,3 мкм | 0,9...1,2 | 2 | 10<br>7°С | 0,5% КОН | ДЭК, ДМФ, МЦА, диоксан | НХД (продукт 7) ФФС |
| ФП-617<br>ФП-626 | Для маски при ионном травлении | 330...480 | 400 лин/мм | — | 1 | — | 0,6% КОН | Диглим | НХД (продукт 332), смола СФ-0116 |
| ФН-5ТК<br>ФН-5ТК-2<br>6-14-252-77 | Полупроводники, металлические пленки | 250...460 | 15...20<br>100 мкм | 1,0 | 4 | 120<br>49°С | Толуол ТХЭ | МЦА | ПВЦ+оптический сенсибилизатор-тиазолин |
| ФН-11к<br>6-14-40-1171-77 | Полупроводники, мелкоструктурные маски, сталь | 330...380 | 10 мкм | 1,0 | 5 | 50<br>4...5°С | Уайт спирит | Ксилол толуол | Циклокаучук+ +сшивающий агент-бисазид |
| ФН-11<br>6-14-631-77 | Полупроводники, сталь | 330...380 | 10 мкм | 1,5...2,0 | 5 | 50<br>4...5°С | То же | То же | Циклокаучук +сшивающий агент-бисазид |

Примечание. МЦ—метилцеллозоль, ТХЭ—трихлорэтилен, ФФС—фенолформальдегидные смолы, ДМФ—диметилформамид, МЦА—метилцеллозольвацетат, МЭК—метилэтилкетон, ДЭК—диэтилкетон.

*Валковое нанесение* или вальцевание используется при изготовлении печатных плат и сетчатых трафаретов в толстопленочной технологии. Этим способом наносят фоторезисты высокой вязкости (ФП-В1, ФН-4ТВ, ФПК-4ВЩ). Способ допускает возможность сушки фоторезиста непосредственно на выходе с помощью инфракрасных ламп или горячего воздуха. Получаются слои толщиной 2 ... 12 мкм в зависимости от применяемых валиков.

*Ламинирование* — накатка фоторезистивной пленки. Сухие пленочные фоторезисты предназначены главным образом для изготовления печатных плат. Светочувствительный липкий слой фоторезиста (толщина 20, 40 или 60 мкм) находится между пленкой из полиэтилена (толщина 25 мкм) и пленкой из лавсана (толщина 25 ... 30 мкм). Пленка полиэтилена отделяется в момент накатки, а пленка фоторезиста контактирует с нагревательным полозом. Обнаженной стороной подогретый фоторезист прикладывается к тщательно подготовленной плате. Накатка осуществляется специальными валиками. Определяющими факторами являются: скорость накатки, температура нагревательного полоза, давление, регулируемое в зависимости от толщины слоя, и натяжение пленки. Готовая плата покрыта слоем фоторезиста, защищенного сверху лавсановой пленкой, которая служит для механической защиты фоторезиста и является газовым барьером при экспонировании.

Жидкие фоторезисты можно наносить методом пульверизации — распыления и электростатического нанесения.

## СУШКА ФОТОСЛОЯ (ПЕРВАЯ СУШКА)

После нанесения на подложку жидкие фоторезисты подвергаются сушке для удаления растворителя и окончательного формирования слоя фоторезиста, а также для обеспечения большей адгезии между подложкой и фотослоем. От этой операции зависят время экспонирования и точность передачи размеров. Сушка позволяет фоторезисту выдержать действие сил деформации во время проявления. Наиболее распространена термическая сушка, температура и время которой подбираются в зависимости от марки фоторезиста и толщины нанесенного резистивного слоя. После сушки фотослоя последний не должен быть липким (при контакте с фотошаблоном) и должен обеспечивать стойкость фоторезиста в проявителе. Режим сушки определяется следующими факторами: растворитель должен удаляться без нарушения резистивной пленки; для лучшей адгезии температура должна максимально приближаться к температуре оплавления пленкообразующего агента фоторезиста; сушка не должна приводить к термической сшивке полимерной основы, что может вызвать сложность экспонирования и увеличение времени проявления фоторезиста; время сушки при выбранной температуре ограничено стойкостью светочувствительной составляющей фоторезиста. Для позитивных фоторезистов марки ФП (ФП-383, ФП-РН-7, ФП-27-18БС) режим термической сушки варьируется от $t \approx 30$ мин при $T_c = 85°$ С до $t = 15$ мин при $T_c = +100°$ С. Наиболее принятый режим сушки $t = 15 ... 20$ мин при $T_c = +90°$С с предварительной подсушкой фотослоя после нанесения на воздухе 20 ... 30 мин (при защите от пыли и активного излучения). Для жидких негативных фоторезистов ФН (ФН-11, ФН-5ТК) нанесенный фотослой сушат при комнатной температуре, а затем в термостате при $+100°$ С (в течение 15 ... 30 мин). Для фотополимеризующихся светочувствительных композиций типа холодной эмали ХЭ, ФПВ-1 и ФПК-4ВЩ сушка фотослоя производится без нагрева во избежание термической сшивки полимера. Применение пленочных фоторезистов исключает операцию предварительной сушки фотослоя. Для завершения усадочных деформирующих процессов в пленке подложки после нанесения фоторезиста выдерживаются перед экспонированием 30 мин.

Для снижения дефектности пленок фоторезиста ФП, вызванной его «разбрызгиванием» при сушке, применяют термокомпрессионную сушку в среде азота при повышенном давлении и температуре $\leqslant +110°$ С в течение 15 мин, что улучшает защитные свойства пленок.

Кроме термической сушки для жидких фоторезистов применяют инфракрасную сушку при температуре 120...130° С, что позволяет полностью сформиро-

вать фотослой за 2...3 мин. Облучение предпочтительнее проводить с обратной стороны пластины. Использование СВЧ-печей для сушки фоторезиста сокращает время сушки до 2... 4 с, уменьшая время экспонирования и проявления фоторезиста.

## ЭКСПОНИРОВАНИЕ ФОТОСЛОЯ

Экспонирование — это формирование заданного рельефа в пленке фоторезиста с помощью фотошаблона под действием актиничного излучения. Операцию проводят на установках экспонирования и совмещения. В качестве актиничных источников применяются ртутно-кварцевые лампы ДРШ, ПРК, ДРТ для фоторезистов ФН и ФП и ЛУФ-80 для фотополимеризующихся композиций.

В производстве ИС наиболее широко применяется метод контактной печати. Возможности контактной фотолитографии ограничены явлениями дифракции и отражения света в системе фотошаблон — фоторезист [6.43]. Разрешающая способность фоторезистов определяется с помощью специального тестового фотошаблона — миры с элементами различных геометрии и размеров. Для позитивных фоторезистов теоретически можно получить элементы размером 0,5 мкм ($\lambda$ = 450 нм). При сохранении плоскопараллельности шаблона и подложки реализуемая разрешающая способность для НХД фоторезистов 500 пар линий/мм (1000 лин/мм), что соответствует воспроизведению штриха 1 мкм. Для негативных фоторезистов (типа ФН) минимально воспроизводимые размеры 4...5 мкм.

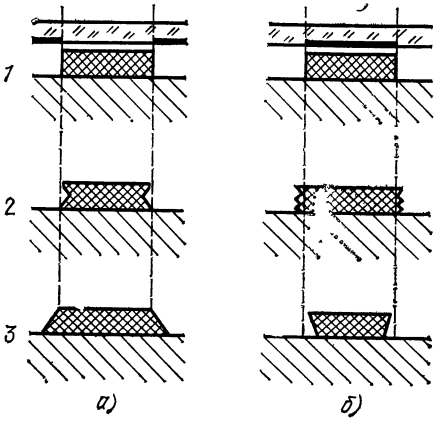


Рис. 6.13

При использовании любого фоторезиста необходимо для каждой получаемой партии подбирать режим экспонирования и проявления. Последние две операции неразрывно связаны между собой. Время экспонирования для данного оборудования определяется точностью передачи размеров элементов с фотошаблона на фоторезист. С этой целью снимают характеристическую кривую точности передачи размеров в зависимости от времени проявления при фиксированном времени экспонирования и в зависимости от времени экспонирования при фиксированном времени проявления. При правильном подборе времени экспонирования край изображения должен быть четким, а рисунок фоторезиста должен геометрически соответствовать рисунку фотошаблона.

На рис. 6.13 дано схематическое изображение рельефа для негативного (*а*) и позитивного (*б*) фоторезистов. Цифре *1* соответствует правильно подобранное время экспонирования, цифре *2* — недостаточное время экспонирования, цифре *3* — завышенное время экспонирования. При контроле с помощью микроскопа в случае недоэкспонирования наблюдается размытость края фоторезиста, а при переэкспонировании — двойной край (клин фоторезиста). При проведении на одной подложке двух или более фотолитографических операций перед экспонированием совмещается изображение схемы с изображением фотошаблона по реперным знакам. Точность совмещения зависит от типа выбранной установки и физических возможностей оператора [6.45].

При экспонировании негативных фоторезистов (ФН-11 и ФПК-4ВЩ, ХЭ) следует учитывать, что фоторезист ингибируется кислородом воздуха. Экспонирование проводится с вакуумным прижимом или в атмосфере азота. Можно наносить дополнительный слой 15%-ного раствора ПВС с добавкой феноксола на слой фоторезиста для создания газового барьера. Время экспонирования считается оптимальным, если после проявления толщина рельефа фоторезиста составляет не менее 90% толщины нанесенного слоя. Наиболее светочувствительными

и обладающими наибольшим разрешением являются позитивные фоторезисты (типа ФП).

Жидкие фотополимеризующиеся композиции наносятся на подложку слоем не менее 4 мкм, минимальная ширина получаемых линий 30 ... 40 мкм. Пленочные фоторезисты можно экспонировать с помощью передвигающихся источников света. Экспонирование проводится «холодными» лампами через лавсановую пленку, которая служит газовым барьером. Пленочные фоторезисты применяют для получения линий и зазоров $\geqslant$ 100 мкм.

Метод проекционной (бесконтактной) фотолитографии позволяет с большой точностью получить микронные и субмикронные размеры элементов по всему полю подложки. В проекционной фотолитографии используют сложные оптические системы. Изображение фотошаблона проецируется на подложку [6.42], что исключает износ фотошаблонов и повреждение пленки фоторезиста, которые имеют место при контактной печати.

## ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОСЛОЯ

Химико-фотографическая обработка проводится при погружении в раствор проявителя, выдержке в парах или с помощью струйных установок, снабженных форсунками для распыления проявителя. Для тонких слоев фоторезиста достаточна обработка в неподвижной ванне или в ванне при движении проявителя относительно слоя фоторезиста. Все позитивные фоторезисты на основе НХД после экспонирования в ультрафиолетовых лучах растворимы в щелочных растворах. Фоторезист ФП-383 проявляется в 2 ... 3%-ном растворе тринатрийфосфата при комнатной температуре. Проявитель фильтруют и контролируют по значению *pH* (*pH* $\approx$ 12,3). Время проявления фотослоя зависит от его толщины. Для улучшения проявления при малых геометрических размерах элементов схемы в проявитель добавляют поверхностно-активное вещество «Прогресс» (5 капель на 100 г проявителя).

Применяют проявитель следующего состава: 1 объем 2%-ного раствора $Na_3PO_4$, .1... 3 объема глицерина. Проявление производится во вращающихся стаканах, время проявления для глицериновых проявителей увеличивается, и при этом возможность перепроявления уменьшается. Фоторезист ФП-27-18БС проявляют в 0,1 ... 1%-ном растворе КОН, концентрация проявителя находится в прямой зависимости от толщины слоя фоторезиста (до 1%-ного раствора КОН). Время проявления позитивных фоторезистов в безглицериновых проявителях 20 ... 40 с. После проявления подложки тщательно промывают под струей холодной воды и сушат на центрифуге или в потоке очищенного воздуха.

Негативные фоторезисты (типа ФН) проявляются в органических проявителях. Для фоторезиста ФН-5ТК на основе ПВЦ проявителем является смесь толуола и трихлорэтилена (2:1) или п-ксилол. Проявление производится в сменных ваннах в течение 60 с (20 с в каждой ванне). Фоторезист ФН-11 на основе циклокаучука проявляют в уайтспирите или бензине в сменных ваннах в течение 60 с. После проявления платы промывают в проточной воде. В проявителе пленка негативного фоторезиста набухает, что приводит к некоторому искажению размеров и частично является причиной более низкой разрешающей способности фоторезистов ФН по сравнению с ФП. Негативные фотополимеризующиеся композиции ФПК-4ВЩ, ФПП, ФП-В1, ХЭ и др. проявляются в 2 ... 4%-ном растворе бикарбоната натрия, возможно с добавкой ПАВ (ОП)-7, в течение 5... 7 мин при перемещении раствора относительно подложки. Для ускорения проявления проявитель можно подогревать до 40° С. Пленочные фоторезисты делятся на водощелочепроявляемые (аналог «ламинара») и фоторезисты с органическим проявлением (аналог «ристона»). К первой группе относятся пленочный ФПП и СПФ (ВЩ), которые проявляются в подогретом 4%-ном растворе бикарбоната натрия. Защитная пленка лавсана перед проявлением удаляется. Фоторезисты СПФ (СПФ-1, СПФ-2) проявляются в 1, 1, 1-трихлорэтане (метилхлороформе) с использованием специального технологического оборудования. Удаление лавсановой пленки и проявление производятся через 30 мин после экспонирования. За оптимальное время экспонирования принимается время, в 1,5 раза большее необходимого для

полного удаления незадубленного СПФ [6.47]. После проявления платы промываются в проточной воде под давлением порядка 0,14 МПа, так как гидрофобный растворитель удаляется с плат при механическом воздействии воды.

## ТЕРМООБРАБОТКА ФОТОСЛОЯ (ЗАДУБЛИВАНИЕ — ВТОРАЯ СУШКА)

Позволяет удалить проявляющий растворитель и улучшить адгезию к подложке. Сушка проводится в интервале температур 110...180° С. От температуры, характера ее изменения и времени сушки зависит точность передачи размеров изображения. При термозадубливании могут исказиться размеры элементов защитной полимерной маски по сравнению с фотошаблоном, что особенно сказывается при толщинах фоторезиста более 0,8 мкм. Для точной передачи малых размеров (1...2 мкм) во избежание оплывания краев фотослоя рекомендуется применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Примерный режим обработки позитивных фоторезистов: 10 ... 15 мин выдержка после проявления, сушка 110.... 130° С 30 мин, затем сушка 150 .... 180° С не менее 30 мин. Позитивные фоторезисты можно длительно термообрабатывать при высоких температурах. Ограничивающим фактором являются окисление пленочных слоев схемы и сложность удаления задубленного фоторезиста. Для негативных жидких фоторезистов рекомендован следующий режим сушки: 100 ... 120° С в течение 15... 20 мин и 160 ... 180° С в течение 10 ... 15 мин. Для жидких и пленочных фотополимеризующихся композиций операция второй сушки (термозадубливание) исключается. Вторая сушка фотослоя может производиться обработкой инфракрасными лучами и в СВЧ сушильных печах. После термозадубливания фоторезиста производится травление рельефа платы (см. § 6.12) или электролитическое наращивание в окнах сформированной защитной полимерной маски.

## УДАЛЕНИЕ ФОТОСЛОЯ

Различают два способа удаления: мокрый (жидкий) и сухой (плазмохимический). При мокром способе фотослой удаляется в жидкостях: кислотах, щелочных растворах, органических растворителях. Применение различных составов для снятия фоторезистов определяется степенью его термозадубливания. Для позитивных фоторезистов применяют следующие составы для удаления фоторезистивного слоя: ацетон или диметилформамид + ПАВ («Прогресс») (слабое термозадубливание фоторезиста); обработка в окисляющих агентах (горячая концентрированная $H_2SO_4$ или смесь $H_2SO_4+K_2Cr_2O_7$); растворение в щелочах (горячий 10 ... 15%-ный раствор КОН или NaOH; 4%-ный раствор $Na_3PO_4$ при $T\approx80°$ С, перекисно-аммиачные смеси в ультразвуковых ваннах); обработка в 4 ... 30%-ном кипящем водном растворе синтанола ДС-10. Для удаления фоторезиста ФН-5ТК применяют растворитель метилцеллозольвацетат или смесь растворителей метиленхлорид, толуол, трихлорэтилен 1:0,5 : 0,5. Фоторезист ФН-11 удаляется в смеси ксилола и толуола. Водощелочепроявляемые полимеризующиеся жидкие и пленочные фоторезисты удаляются с помощью 15%-ного раствора горячей щелочи. Фоторезисты пленочные СПФ удаляют с помощью хлористого метилена, распыляемого под давлением 0,29 МПа, или хлористым метиленом, при механическом воздействии щетками. Негативные органически проявляемые фоторезисты жидкие (типа ФН) и пленочные (типа СПФ) плохо удаляются с подложки без механического воздействия.

Мокрые способы удаления фоторезиста с использованием окисляющих сред и различных растворителей имеют недостатки: большая трудоемкость, загрязнение подложек продуктами реакции, зависимость процессов от режимов термозадубливания фоторезистов.

Сухой способ удаления фоторезиста основан на его плазмохимическом травлении в кислородосодержащей атмосфере с добавками азота 1... 10% и общем давлении $\approx$ 1Па или в кислородной плазме ВЧ разряда. Метод может быть с успехом применен для удаления негативных и позитивных фоторезистов [6.48] с образованием легколетучих продуктов $CO_2$, CO, $H_2O$.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НЕКОТОРЫХ МАРОК ФОТОРЕЗИСТОВ

Из серийно выпускаемых фоторезистов наиболее широко применяется ФП-383, который рекомендуется для работы на полупроводниковых подложках и металлизированных диэлектриках. Фоторезист обеспечивает получение микронных размеров с высоким качеством края элементов при травлении в кислых растворах и имеет следующие преимущества: высокие разрешающая способность и светочувствительность, хорошая кислотостойкость; недостатки фоторезиста: критичность к условиям хранения, пожароопасность, высокая токсичность.

Следует отметить фоторезист ФП-27-18БС, рекомендуемый для работы на металлизированных диэлектриках, окислах и полупроводниках. Фоторезист обеспечивает получение элементов с размерами не менее 2 мкм (при толщине фотослоя 0,8 мкм). Он используется в качестве резистивной маски при глубинном травлении и гальваническом наращивании в кислых растворах. Преимущества фоторезиста: хорошая разрешающая способность, повышенная адгезия к подложке, высокая кислото- и гальваностойкость, улучшенное пленкообразование (уменьшение ретуши), устойчивость к перепроявлению, легкое и полное удаление с материала подложки, некритичность к условиям хранения, пониженная токсичность и пожароопасность; недостатки: меньшая разрешающая способность, более низкая светочувствительность по сравнению с ФП-383.

Ионностойкие фоторезисты ФП-617, ФП-626 рекомендуются для работы на полупроводниках и металлизированных диэлектриках и используются в качестве маски при ионном и плазмохимическом травлении [6.49]. Их преимущества по сравнению с ФП-383: высокая стойкость при ионном травлении, легкое и полное удаление сухим методом, повышенная светочувствительность (сравнительное время экспонирования при толщине фотослоя 1 мкм: ФП-383—30 с, ФП-617—20 с, ФП-626 — 12 с), высокая разрешающая способность, позволяющая получать микронные и субмикронные размеры (аналогично ФП-383) при использовании соответствующего оборудования; недостаток: более низкая кислото- и гальваностойкость.

Фоторезисты ФН-5ТК и ФН-11 используются на полупроводниках и металлизированных диэлектриках для получения резистивного рельефа при работе в щелочных растворах (травление, осаждение в окнах). В кислых растворах предпочтительнее использовать позитивные фоторезисты из-за их большей разрешающей способности. Фоторезист ФН-11 широко применяется для получения диэлектрических прокладок емкостей и локальной защиты микрополосковых плат. Преимущества негативных фоторезистов по сравнению с позитивными: повышенная щелочестойкость, хорошие диэлектрические свойства; недостатки: меньшая разрешающая способность (размер элементов $\geqslant$ 4 мкм), необходимость проявления и удаления в органических жидкостях (повышенная пожароопасность процесса), трудность удаления термозадубленного фоторезиста.

Негативную фотополимеризующуюся композицию ФПК-4 ВЩ можно рекомендовать для валкового нанесения при изготовлении сетчатых трафаретов в толстопленочной технологии. Фотослой обладает хорошим разрешением, повышенной стойкостью к растворителям, входящим в состав толстопленочных паст, проявляется в щелочах и легко удаляется в подогретых растворах щелочей.

Негативные пленочные фоторезисты СПФ-1 и СПФ-2 рекомендуются для получения рельефа на металлизированных диэлектриках (полосковые платы и микрополосковые платы) с размером элементов $\geqslant$ 100 мкм. Преимущества фоторезистов СПФ: исключение сушки, дубления и ретуши фотослоя; защита отверстий от затекания фоторезиста; высокая кислото- и гальваностойкость; щелочестойкость; недостатки: более низкая разрешающая способность по сравнению с жидкими фоторезистами, проявление и удаление фоторезиста в органических жидкостях. При использовании вакуумного ламинатора пленочные фоторезисты могут быть использованы для локальной защиты схемы со сформированным рельефом.

## 6.12. ТРАВЛЕНИЕ

При изготовлении микрополосковых плат используют четыре разновидности операций травления: поверхностное, селективное, «взрывное» и травление распылением. *Поверхностное травление* (подтравливание поверхности) применяется для удаления поверхностного окисленного слоя материала перед операциями последующего химического или электролитического наращивания сплошного слоя или доращивания сформированного рельефа. Для этих целей обычно используют разбавленные или буферные травители. Например, для меди: 1) 25 мл 10%-ного раствора $(NH_4)_2S_2O_8$ + 5 мл $H_2O_2$; 2) HCl 50 мл/л, тиомочевина 75 г/л; 3) $H_2SO_4$ 50 мл/л; натрий бихромат 120 мг/л и др. Для равномерности травления поверхность платы должна быть гидрофильной, ее обрабатывают в гидрофильных растворителях или в горячей воде + ПАВ. В травильные растворы платы погружаются сухими, после подтравливания их декапируют в 10%-ном растворе

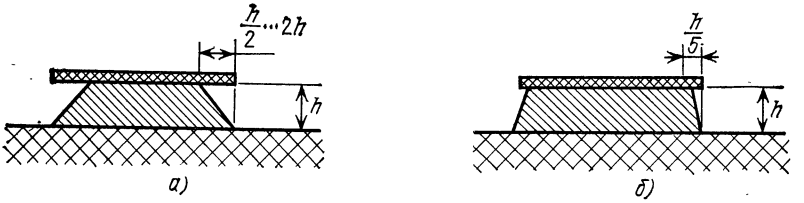



Рис. 6.14

HCl. Для подтравливания никелевой поверхности применяются различные сочетания разбавленных кислот ($HNO_3$, HCl, $H_2SO_4$, $H_3PO_4$) или ультразвуковая обработка в горячем растворе: HCl ≈ 100 мл/л, $H_2SO_4$ ≈ 70 мл/л, уайтспирит ≈ ≈ 20 мл; ОП-7 ≈ 15 мл с последующим декапированием в 5... 10%-ном растворе HCl.

*Селективное травление* пленочных материалов проводится с помощью защитной маски, в качестве которой может быть использован фоторезист или другой материал, инертный к травителю, например хром при травлении рельефа по меди. Для повышения надежности и уменьшения числа дефектов при травлении рельефа можно использовать двухслойную защитную маску, например маску фоторезист-хром на меди при травлении медного рельефа (при напылении слоев Cr-Cu-Cr) и предварительном формировании позитивного рельефа по хрому под маской фоторезиста. Выбор травителя определяется последовательностью технологических операций, физико-химическими свойствами обрабатываемого материала и имеет ряд ограничений: скорость травления должна быть достаточно высокой при минимальном размере «клина подтрава»; травитель должен реагировать только с обрабатываемой пленкой и не реагировать с защитной маской или поверхностью под пленкой; выделение пузырьков газа нежелательно. Обычно травитель перемешивается или взбалтывается для непрерывного омывания поверхности свежими порциями реагента. Разбрызгивание и струйное направленное травление, позволяющее поддерживать постоянные концентрацию реагента и скорость травления, значительно увеличивает расход травителя. Применение струйного травления в замкнутом цикле с корректировкой травильного раствора и регенерацией отработанного состава дает существенную экономию материалов и обеспечивает уменьшение клина подтравливания [6.1].

Подтравливание становится особенно существенным при травлении слоя меди толщиной 5 ... 30 мкм. На рис. 6.14 дано схематическое изображение клина подтрава: *а* — для прямого химического травления; *б* — для травления с применением установок направленного травления ($h$ — толщина пленки). Из-за разницы в толщине и плотности обрабатываемого материала по поверхности подложки, неравномерности травления, горизонтального движения травящего раствора ширина подтравленного участка равна, а иногда и больше толщины пленки (до 2 $h$). При изготовлении шаблонов необходимо вводить корректировку размеров элементов рисунка в расчете на конкретный технологический вариант.

Для травления элементов микронных размеров существует более сложная зависимость геометрии от травителей и режимов. В этом случае большое значение имеет неоднородность пленки по толщине [6.50].

Для травления меди существуют разнообразные травители. В качестве примера приведем составы некоторых из них: 1) $H_2O_2$ 150 мл, HCl 150 мл, $H_2O$ 700 мл; 2) $(NH_4)_2S_2O_8$ 300 г, $H_2SO_4$ 150 мл, $H_2O$ 1 л; 3) $CrO_3$ 450 г, $H_2SO_4$ 160 мл $H_2O$ 600 мл; 4) $CrO_3$ 150 г/л, $HNO_3$ 35 г/л, HCl 10 г/л, $H_2O$ до 1 л; 5) $(NH_4)_2S_2O_8$ 180 г/л, $NH_4NO_3$ 120 г/л, $H_2SO_4$ 6 мл/л. Хорошее качество травления обеспечивают растворы с добавками двухлористой меди; 1) $H_2O_2$ 100 мл, HCl 450 мл, $H_2O$ 450 мл, $CuCl_2$ 50 г; 2) $FeCl_3$ 163 г/л, $CuCl_2$ 170 г/л, KCl 180 г/л, HCl 50 мл; 3) CuCl (на Cu) 100 ... 110 г/л, NaCl 100 г/л, HCl 40 ... 50 г/л с корректировкой раствора. Последние два раствора можно использовать в установках струйного травления [6.1].

Отметим щелочной травильный раствор на основе хлорита натрия $NaClO_2$ 18 ... 20 г/л, $NH_4Cl$ 27 ... 30 г/л, $NH_4NO_3$ 35 ... 40 г/л, $NH_4HCO_3$ 50 ... 59 г/л, $NH_4OH$ 100 ... 150 мл/л, $pH \approx 9$. Раствор можно применять для травления Cu при использовании в качестве резистивной маски оловянных покрытий. Применяют щелочные травители с добавками $CuCl_2$: 1) $CuCl_2$ 54 г/л, $NH_4Cl$ 80 г/л, $(NH_4)_2CO_3$ 390 г/л; 2) $NH_4OH$ 100 г/л, $CuCl_2$ 100 г/л, $(NH_4)Cl$ 150 г/л, $pH = 8 ... 9$, травление проводится при $T \approx 45°$ С с перемешиванием раствора.

Для травления никеля применяют следующие составы: 1) $HNO_3$ 50 мл, $H_3PO_4$ 950 мл; 2) $HNO_3$ 250 мл, $H_3PO_4$ 250 мл, $CH_3COOH$ 250 мл, $H_2O$ 250 мл (на водяной бане $T \approx 40 ... 60°$ С); 3) $HNO_3$ 15 ... 21 вес %, $H_2O_2$ 5 ... 7 вес %, фениломочевина 0,3 .... 1,0 вес. %, $T \approx 45 ... 50°$ С.

Для травления алюминия используют фосфорную кислоту, ее смеси с уксусной, азотной кислотами и водой при $T \approx 50°$ С. Из-за большой вязкости фосфорной кислоты пузырьки водорода осаждаются на алюминиевую пленку и оставляют характерные круглые непротравленные участки алюминия — «пятачки». Применяют вибрацию травителя с частотой 30 ... 50 Гц и малой амплитудой. Укажем состав некоторых травителей для алюминия: 1) $H_3PO_4$ 60 мл, спирт изопропиловый 15 мл, $H_2O$ 10 мл; 2) $CrO_3$ 40 ... 80 г/л, $NH_4F$ (или NaF) ... ...5 ... 15 г/л, коллоид (крахмал водорастворимый) 0,5 ... 5 г/л, ацетат кадмия 20...40 г/л, $H_2O$ до 1 л. При работе с щелочестойкими фоторезистами можно использовать щелочной травитель: NaOH 1 г, ферроцианид 88 г, $H_2O$ 800 мл.

Травление хрома иногда затруднено наличием слоя окиси $CrO_3$, препятствующей его взаимодействию с травителями. Для травления хрома применяют концентрированную и разбавленную HCl при $T = 60°$ С. В качестве катализаторов реакции используют контакт хрома с Al, Zn, Sn, Mg и т. д. При затруднении травления используют насыщенный раствор $AlCl_3$, нагретый до 70°С, или $ZnCl_2$. В травитель можно добавлять ПАВ (СВ-104, СВ-102). Известны травители на основе церия (Ce) и перманганата калия: 1) $CeSO_4$ 100 г/л, $H_2SO_4$ 50 мл/л, $H_2O$ до 1 л; 2) $H_2O_2$ 100 мл, $H_2O$ 100 мл, $KMnO_4$ 5 г. Последний раствор разрушает фоторезистивную маску. Из щелочных травителей для хрома отметим следующий: $K_3Fe(CN)_6$ 250 г/л, KOH 28 г/л, $H_2O$ до 1 л.

Для травления золота применяют растворы «царской водки» с «буферными» добавками уксусной кислоты, а также иодистые травители, например: 1) KI 80 г, $I_2$ 18 г, $H_2O$ 60 мл; 2) этиленгликоль 25 мл, иодный травитель $KI:I_2:H_2O = 4:1:2$ 5 мл, $H_2O$ 20 мл.

Для травления олова (Sn) используют 25%-ный раствор $HNO_3$ или смесь: $HNO_3$ 30 мл, HCl 90 мл, $CH_3COOH$ 900 мл с добавкой $NaNO_3$ 200 г.

Для травления тантала используют агрессивные растворы, содержащие ион фтора: 1) $HNO_3$:HF = 1:1...10:1; 2) $HNO_3$ 100 мл, NaF 10 г. Травление производят в полиэтиленовой, фторопластовой или винипластовой ванне.

Для травления титана используют смеси кислот с содержанием иона фтора: 1) $H_2SO_4$ 15 мл, HF 10 мл, $H_2O$ 90 мл; 2) $NH_4OH$:HF = 1:1; 3) HF:$HNO_3$:$CH_3COOH$ = 1:10:10 и т. д.

Ванадий травят в концентрированной перекиси водорода $H_2O_2$ или $HNO_3$.

Нихром травят в травителях для хрома в горячих кислотах: 1) $HNO_3$:HCl:$H_2O$ = 2:3:5; 2) $H_2SO_4$:HCl:$H_2O$ = 1:1:1; 3) в цериевых травителях $HNO_3$:$H_2O$ = 1:2 + $CeSO_4$ до насыщения и т. д.

Сплав МЛТ-3М травят с использованием фтористых травителей: 1) $HNO_3$ 100 мл, HF 50 мл, NaF 10 мл (насыщенный раствор); 2) HCl 40 ... 50 мл, $NH_4F$ 5 г, $H_2O$ 50 мл и т. д. Для сплава РС-3710 рекомендован травитель $HNO_3$ 35 мл, HF 5 мл, $H_2O$ 60 мл; для РС-5406 $HNO_3$ 100 мл, NaF 10 г, $T = 40 ... 45°$ С. Для травления слоя $SiO_2$ применяют буферные травители, например HF 9 мл, $NH_4$ 30 г, $H_2O$ 60 мл и т. д. Из-за сложности травления резистивных и диэлектрических пленок обычно применяют вакуумное напыление с помощью метода свободной или контактной маски.

Для получения рельефа на пленках из материалов, трудно поддающихся травлению, в том числе керметов, боросиликатных, алюмосиликатных стекол и т. д., применяют *метод контактной маски* и *«взрывное» травление*. В качестве растворимых материалов используют фоторезисты и легко травящиеся металлы V, Al, Cu и др. Фоторезисты перед напылением подвергаются специальной обработке для облегчения их последующего удаления [6.51]. Из-за нагрева подложек при осаждении пленок заданного материала удаление фоторезистов усложняется; применение металлических контактных масок предпочтительнее, несмотря на удлинение технологического цикла. Достоинства метода: высокая точность воспроизведения элементов схемы, получение рельефа химически стойких материалов; недостаток — возможность «вырывов» в элементах схемы.

*Травление распылением* [6. 52] бывает трех видов: ионное, ионно-химическое и плазмохимическое.

*Ионное* травление основано на физическом распылении материала направленным потоком ионов. Для этого используют установку с ионным источником (рис. 6.11), в которой вместо мишени располагают подложку со сформированным резистивным рельефом схемы. В качестве защитной маски применяют ионностойкие фоторезисты ФП-617, ФП-626 или другие материалы с меньшей скоростью ионного травления по сравнению с обрабатываемым материалом. Рельеф получают за счет разности в скоростях распыления резистивной маски и обрабатываемого материала. Травление проводится в атмосфере Ar при давлении $\approx 10^{-2}$ Па. Преимущества метода: возможность получения микронных и субмикронных размеров, отсутствие подтравов; недостатки: низкая скорость травления, сложность травления диэлектриков (ионы образуют на диэлектрике заряд и происходит пробой).

Для *ионно-химического* травления применяются активные газы $CF_4$, $CCl_3F$, $CCl_2F_2$, $CClF_3$, $C_2Cl_2$ и т. д. Вместо ускоряющей сетки на пути потока ионов размещают нейтрализатор, который, эмиттируя электроны, нейтрализует ионы, превращая их в химически активные радикалы или возбужденные молекулы и атомы. Преимущества метода: высокое разрешение, отсутствие подтравов, возможность травления диэлектриков, управляемая степень ионизации и нейтрализации; недостаток — малая производительность.

*Плазмохимическое* травление — травление с помощью химически активных частиц (возбужденных молекул, атомов радикалов и ионов) в диодной ВЧ системе. Давление в реакционной камере $10^2$ Па, степень ионизации невелика ($\approx 5\%$). В качестве реакционных газов используются фториды и хлориды углерода ($C_2HCl_3$, $CF_4$, $CCl_3H$, $CCl_2F_2$ и т. д.), трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, хладоны, кислород и смеси газов. Возбуждаемые или ионизируемые частицы газа в результате диффузии достигают поверхности подложки со сформированным рельефом защитной маски и вступают во взаимодействие с поверхностью. Экран предохраняет фоторезистивную маску от травления атомарным кислородом, от ионов и ультрафиолетового излучения. Фоторезистивная маска удаляется в кислородосодержащей плазме. Объемная система плазмохимического травления не всегда может обеспечить должную степень равномерности. В этих случаях применяют систему плоского типа [6.53]. Преимущества плазмохимического травления: высокая разрешающая способность — получение микронных и субмикронных размеров, высокая скорость травления, широкий диапазон травимых материалов; недостаток метода по сравнению с ионным травлением — возможность подтравов. Боковое подтравливание при плазмохимическом травлении значительно меньше, чем при химическом (угол растрава 10... 20°), что обеспечивает повышенную точность геометрических размеров вытравливаемых элементов. При плазмохимической обработке можно производить в одной установке травление, снятие фоторезиста и очистку поверхности.

Приложение

# ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА СВЯЗАННЫХ ОТРЕЗКОВ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ ПРОВОДНИКОВ

Вид сверху на отрезок связанных многопроводных линий (СМЛ) приведен на рис. П. 1. Плоскости отсчета ($T_1$ — $T_1$), ($T_2$ — $T_2$) совпадают с концами отрезка СМЛ. На рис. П. 2 показаны поперечные сечения анализируемых связанных линий. Варьируя нагрузки, подключенные к отдельным линиям, образующим СМЛ, можно реализовать широкий класс СВЧ элементов: фильтры, направленные ответвители, фазовращатели и пр. [3.33].

Алгоритм определения $S$-матрицы отрезка СМЛ, реализованный в виде программы KAMPL на языке Фортран, можно условно разбить на три этапа:

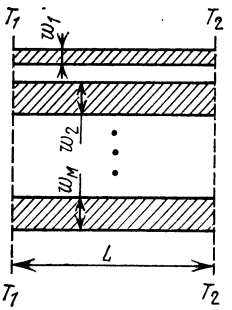



Рис. П.1

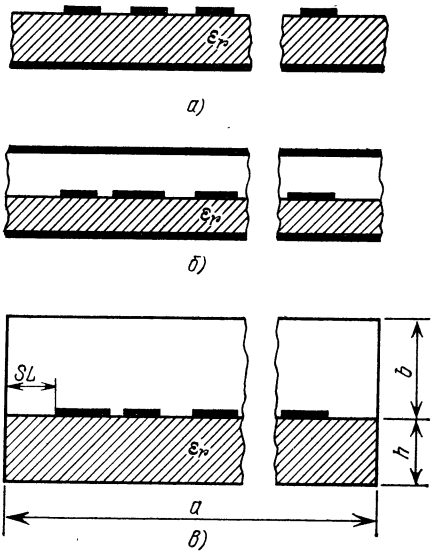



Рис. П.2

1. Вычисляется матрица емкостных коэффициентов [C]. Задача решается в статическом приближении методом интегральных уравнений без учета потерь.

2. Определяются собственные значения $\beta_k$ и матрица собственных векторов [R] [3.21].

3. Определяется $S$-матрица

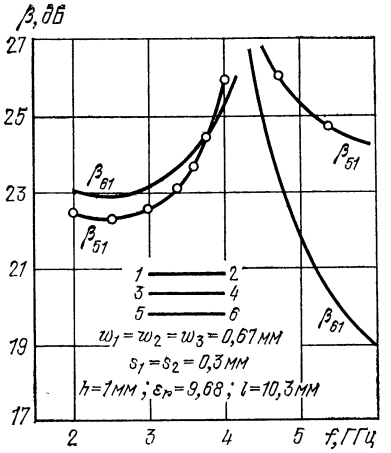
$$[S] = ([1] - [Y])\,([1] + [Y])^{-1};$$

где $[Y] = -j\,[\bar{Q}]\,[\bar{C}]\,[\bar{R}]\,[\bar{q}]\,[\bar{\varphi}]\,[\bar{R}]^{-1}\,[\bar{Q}]$.

Элементы квадратных матриц $[\bar{Q}]$, $[\bar{C}]$, $[\bar{R}]$, $[\bar{q}]$, $[\bar{\varphi}]$ порядка $2K \times 2K$ имеют вид $Q_{mn} = \delta_{mn}\sqrt{Z_{вn}/Z_c}$, где $\delta_{mn}$ — символ Кронекера; $Z_{вn}$ — волновое сопротивление линии, подключаемой к $n$-му плечу[1], $Z_c = 120\ \pi$, $m = n = 1, 2, \ldots, 2K$, $K$ — число полосок;

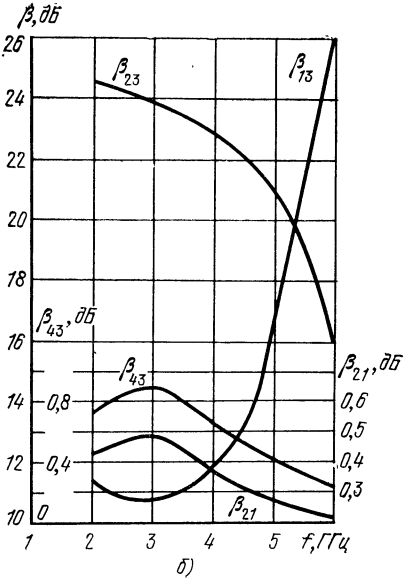
$$[\bar{C}_{kl}] = \begin{bmatrix} C_{kl} & 0 \\ 0 & C_{kl} \end{bmatrix}, \quad k, l = 1, 2, \ldots, K;$$

[1] В приводимой программе $Z_{вn}$ = 50 Ом.

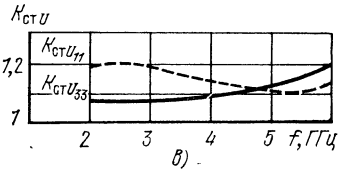



а)

Рис. П.3




б)




в)

$C_{kl}$ — элементы матрицы [C] — нормированной к $\varepsilon_0$;

$$[\bar{\mathbf{R}}_{kl}]=\begin{bmatrix} R_{kl} & 0 \\ 0 & R_{kl} \end{bmatrix}, \quad k,\ l=1,\ 2,\ldots,\ K;$$

$R_{kl}$ — элементы матрицы [R]:

$$[\bar{\mathbf{q}}_{kl}]=\delta_{kl}\begin{bmatrix} k_0/\beta_k & 0 \\ 0 & k_0/\beta_k \end{bmatrix};$$

$$[\bar{\varphi}_{kl}]=\delta_{kl}\begin{bmatrix} \operatorname{ctg}\theta_k & -1/\sin\theta_k \\ -1/\sin\theta_k & \operatorname{ctg}\theta_k \end{bmatrix},$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$; $\theta_k = \beta_k L$; $L$ — длина области связи, мм. На рис. П 3 в качестве примера приведены характеристики трех связанных НПЛ, рассчитанные по программе KAMPL [3.31]. Обращение к программе имеет вид: CALL KAMPL (W, AS, S, H, E, AL, BL, DL, SL, HL, K, IV, IND). Формальные параметры подпрограммы: $K$ — число полосковых линий, $H$ — высота подложки, $HL$ — текущая длина волны, $DL$ — длина области связи. Для конструкции на рис. П.2, *а* и *б* значения идентификаторов AL, BL и SL задаются произвольно, для конструкции на рис. П. 2 *в* AL = $a$, BL = $b$; IDN = 1, 2, 3, соответствует отрезку СМЛ, изображенной на рис. П. 2; W (K) — массив для размеров ширин полосок; AS (K) массив размеров зазоров между полосками, в котором последний элемент равен нулю; S (K2, K2) — двухмерный массив с элементами $S$-матрицы; индекс IV используется для сокращения времени при расчете частотных характеристик $S$-матрицы. При IV = 1 рассчитывается матрица емкостных коэффициентов, при IV > 1 эта матрица не вычисляется; K 2 = 2 × K.

Примечание. Элементы матрицы печатаются построчно в следующем порядке: $S_{11}$, $S_{21}$, $S_{31}$, ..., $S_{12}$, $S_{22}$, $S_{32}$ и т. д.

```
      SUBROUTINE KAMPL(W,AS,S,
     *H,E,AL,BL,DL,SL,HL,K,IV,IND)
      DIMENSION W(1),AS(1),S(1),XL(10),XR(100),R
                                X(100)
      COMPLEX S
      PI=3.14159
      HL=HL*H
      Q=2.*PI*DL/HL
      IF(IV-1)1,1,2
    1 CALL LOADGO(W,AS,XL,XR,RX,
     *H,E,AL,BL,SL,K,IND,4HGRIN)
      PRINT 10
   10 FORMAT(33HСКОРРЕКТИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ШИРИН

     *31HСВЯЗАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ)
      DO 3 I=1,K
      R=W(I)
      PRINT 4,R
    4 FORMAT(5X,F10.2)
    3 CONTINUE
    2 CALL LOADGO(XL,XR,RX,S,K,Q,4HMATR)
      HL=HL/H
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GRIN(W,S,XL,XR,RX,
     *H,E,AL,BL,SL,K,IND)
      DIMENSION W(1),S(1),XL(1),XR(1),RX(1),
     *M(10),C1(100),C2(100),X(100),
     *A(10000),B(1000),X1(1000),B1(1000)
      PI=3.14159
      Q=1.E-9
      K1=K*K
      A1=0.
      DO 3 I=1,K
    3 A1=A1+W(I)
      T=A1/200
      N=0
      DO 5 I=1,K
      M(I)=W(I)/T/2.
      N=N+M(I)
    5 W(I)=2.*T*M(I)
      S1=0
      I1=0
      DO 1 J=1,K
      M2=M(J)
      DO 4 I=1,M2
      I1=I1+1
      X(I1)=T*(2*I-1)+S1
    4 CONTINUE
      S1=S1+2.*T*M2+S(J)
    1 CONTINUE
      DO 8 IL=1,2
      IF(IL-1) 31,31,32
   31 ER=1.
      GO TO 33
   32 ER=E
   33 I1=0
      DO 2 M1=1,K
      DO 2 N1=1,K
```

```
      K4=M(N1)
      DO 2 I=1,K4
      I1=I1+1
      B(I1)=0.
      IF(M1.EQ.N1)B(I1)=1.
    2 CONTINUE
      I4=0
      DO 15 I=1,N
      M1=(I-1)*N+I
      M2=N*I
      J=I
      I1=0
      DO 15 I2=M1,M2
      I1=I1+1
      IF(I.EQ.1) GO TO 19
      AX=ABS(X(I)-X(J))
      DO 16 I5=1,I4
      R=ABS(X1(I5)-AX)
      I0=1
      IF(R.LE.Q) I0=0
      IF(I0) 16,17,16
   17 A(I2)=B1(I5)
      I3=(I1-1)*N+M1
      A(I3)=B1(I5)
      GO TO 20
   16 CONTINUE
   19 I4=I4+1
      I3=(I1-1)*N+M1
      X1(I4)=ABS(X(I)-X(J))
      GO TO(9,10,11),IND
    9 Y=X1(I4)
      B1(I4)=F1(ER,Y,T,H)
      GO TO 18
   10 Y=X1(I4)
      B1(I4)=F2(ER,Y,T,H,BL)
      GO TO 18
   11 Y1=X(I)+SL
      Y2=X(J)+SL
      B1(I4)=F3(ER,Y1,Y2,T,H,AL,BL)
   18 A(I2)=B1(I4)
      A(I3)=B1(I4)
   20 J=J+1
   15 CONTINUE
      CALL GELG(B,A,N,K)
      M1=1
      M2=0
      I1=0
      DO 8 I=1,K
      DO 8 J=1,K
      M2=M2+M(J)
      S1=0.
      DO 6 K4=M1,M2
      S1=S1+B(K4)
    6 CONTINUE
      M1=M2+1
      I1=I1+1
      IF(IL.EQ.1) C1(I1)=2.*T*S1
      IF(IL.EQ.2) C2(I1)=2.*T*S1
    8 CONTINUE
      DO 12 I=1,K1
      RX(I)=C2(I)
   12 CONTINUE
      CALL NROOT(K,RX,C1,XL,XR)
      PRINT 60
```

```
122      60 FORMAT(28HОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ
123        *29HДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ ТИПОВ ТЕМ ВОЛН)
124         DO 13 I=1,K1
125         RX(I)=XR(I)
126      13 CONTINUE
127         CALL MINV(RX,K)
128         CALL PROA(C2,XR,C1,K)
129         I1=0
130         DO 7 I=1,K
131         Q=XL(I)
132         PRINT 50,Q
133      50 FORMAT(4X,E12.5)
134         DO 7 J=1,K
135         I1=I1+1
136         C2(I1)=0.
137         IF(I.EQ.J) C2(I1)=-1./PI/SQRT(XL(I))/2.4
138       7 CONTINUE
139         CALL PROA(C1,C2,XR,K)
140         RETURN
141         END
142         SUBROUTINE MATR(XL,XR,RX,S,K,Q)
143         DIMENSION XL(1),XR(1),RX(1),S(1),
144        *A1(400),A2(400),A3(400),A4(400)
145         COMPLEX S
146         K2=K+K
147         K3=K2*K2
148         I1=0
149         I2=1
150         I3=K
151         DO 14 I=1,K
152         DO 15 M1=1,2
153         DO 15 J=I2,I3
154         DO 15 M2=1,2
155         I1=I1+1
156         M=(1+(-1)**(M1+M2))/2
157         A1(I1)=XR(J)*M
158         A2(I1)=RX(J)*M
159      15 CONTINUE
160         I2=I2+K
161         I3=I3+K
162      14 CONTINUE
163         I1=0
164         DO 16 I=1,K
165         R=Q*SQRT(XL(I))
166         B1=COS(R)
167         B2=SIN(R)
168         IF(B2.EQ.0.) B2=1.E-6
169         DO 16 M1=1,2
170         DO 16 J=1,K
171         DO 16 M2=1,2
172         I1=I1+1
173         M=(1+(-1)**(M1+M2))/2
174         MM=(1-(-1)**(M1+M2))/2
175         A3(I1)=0.
176         IF(I.EQ.J) A3(I1)=B1/B2*M-MM/B2
177      16 CONTINUE
178         CALL PROA(A1,A3,A4,K2)
179         CALL PROA(A4,A2,A1,K2)
180         DO 23 I=1,K3
181         A2(I)=A1(I)
182         A3(I)=A1(I)
183      23 CONTINUE
184         CALL PROA(A2,A3,A4,K2)
```

```
      I1=0
      DO 24 I=1,K2
      DO 24 J=1,K2
      I1=I1+1
      A1(I1)=2.*A1(I1)
      IF(I-J)25,26,25
   25 A3(I1)=-A4(I1)
      A2(I1)=A4(I1)
      GO TO 24
   26 A3(I1)=1.-A4(I1)
      A2(I1)=1.+A4(I1)
   24 CONTINUE
      CALL MINV(A2,K2)
      CALL PROA(A3,A2,A4,K2)
      CALL PROA(A1,A2,A3,K2)
      I1=0
      DO 28 J=1,K2
      DO 28 I=1,K2
      I1=I1+1
      S(I1)=CMPLX(A4(I1),A3(I1))
   28 CONTINUE
      RETURN
      END
      FUNCTION F1(ER,X,T,H)
      PI=3.14159
      C1=T+X
      C2=T-X
      C3=C1**2
      C4=C2**2
      C5=X**2-T**2
      IS=50
      S=0.
      DO 1 I=1,IS
      A1=H*I
      A2=H*(I-1)
      B1=4.*A1*A1
      B2=4.*A2*A2
      T1=B1+C3
      T2=B2+C3
      P1=B1+C4
      P2=B2+C4
      IF(ER-1.) 2,2,3
    2 A=1
      GO TO 4
    3 E=(ER-1.)/(ER+1.)
      A=(-E)**(I-1)
    4 S=S+A*(C1*ALOG(T1/T2)+C2*ALOG(P1/P2)-
     *4.*A1*ATAN(4.*A1/(B1+C5)*T)-
     *4.*A2*ATAN(4.*A2/(B2+C5)*T))
      IF(ER.EQ.1.) GO TO 5
    1 CONTINUE
    5 F1=S/(ER+1.)/PI/2
      RETURN
      END
      FUNCTION F2(ER,X,T,H,B)
      DIMENSION F(20)
      PI=3.14159
      R=1.
      DO 1 N=1,20
      F(N)=R*N
      R=F(N)
    1 CONTINUE
      IS=20
```

```
      S=0.
      DO 2 I=1,IS
      IF(ER-1.) 3,3,4
    3 J=1
      K=1
      GO TO 5
    4 E=(ER-1.)/(ER+1.)
      DO 16 J=1,I
      DO 16 K=1,J
    5 A1=B*(I-K)+H*(I-J+K)
      A2=B*(I-K)+H*(I-J+K-1)
      A3=B*(I-K+1)+H*(I-J+K-1)
      A4=B*(I-K+1)+H*(I-J+K)
      B1=4.*A1*A1
      B2=4.*A2*A2
      B3=4.*A3*A3
      B4=4.*A4*A4
      C1=T+X
      C2=T-X
      C3=C1**2
      C4=C2**2
      C5=X**2-T**2
      T1=B1+C3
      T2=B2+C3
      T3=B3+C3
      T4=B4+C3
      P1=B1+C4
      P2=B2+C4
      P3=B3+C4
      P4=B4+C4
      IF(ER-1.) 6,6,7
    6 A=1.
      GO TO 8
    7 FI=F(I)
      FK=F(K)
      IJ=I-J
      IF(IJ)9,9,10
    9 FIJ=1.
      GO TO 11
   10 FIJ=F(IJ)
   11 JK=J-K
      IF(JK)12,12,13
   12 FJK=1.
      GO TO 14
   13 FJK=F(JK)
   14 A=(-1)**(K-1)*E**(J-1)*K/I*FI/FK/FIJ/FJK
    8 S=S+A*(C1*ALOG(T1/T2*T3/T4)+
     *C2*ALOG(P1/P2*P3/P4)+
     *4.*A1*ATAN(4.*A1/(B1+C5)*T)-
     *4.*A2*ATAN(4.*A2/(B2+C5)*T)+
     *4.*A3*ATAN(4.*A3/(B3+C5)*T)-
     *4.*A4*ATAN(4.*A4/(B4+C5)*T))
      IF(ER.EQ.1.) GO TO 2
   16 CONTINUE
    2 CONTINUE
      F2=S/(ER+1.)/PI/2
      RETURN
      END
      FUNCTION F3(ER,X1,X2,T,H,AL,BL)
      PI=3.14159
      AB=4.*AL/(PI**2)
      B=0.
      IS=500
      DO 1 N=1,IS
```

```
      B1=SIN(N*PI*T/AL)
      B2=SIN(N*PI*X1/AL)
      B3=SIN(N*PI*X2/AL)
      B4=1.
      B5=1.
      R=2.*N*PI*H/AL
      Q=2.*(BL-H)*N*PI/AL
      IF(Q.LT.5.) B4=(1.+EXP(-Q))/(1.-EXP(-Q))
      IF(R.LT.5.) B5=(1.+EXP(-R))/(1.-EXP(-R))
      B=B+B1*B2*B3/(N*(B4+ER*B5)*N)
    1 CONTINUE
      F3=AB*B
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GELG(R,A,M,N)
      DIMENSION A(1),R(1)
      EPS=1.E-7
      IF(M) 23,23,1
    1 IER=0
      PIV=0.
      MM=M*M
      NM=N*M
      DO 3 L=1,MM
      TB=ABS(A(L))
      IF(TB-PIV)3,3,2
    2 PIV=TB
      I=L
    3 CONTINUE
      TOL=EPS*PIV
      LST=1
      DO 17 K=1,M
      IF(PIV)23,23,4
    4 IF(IER)7,5,7
    5 IF(PIV-TOL)6,6,7
    6 IER=K-1
    7 PIVI=1./A(I)
      J=(I-1)/M
      I=I-J*M-K
      J=J+1-K
      DO 8 L=K,NM,M
      LL=L+I
      TB=PIVI*R(LL)
      R(LL)=R(L)
    8 R(L)=TB
      IF(K-M)9,18,18
    9 LEND=LST+M-K
      IF(J)12,12,10
   10 II=J*M
      DO 11 L=LST,LEND
      TB=A(L)
      LL=L+II
      A(L)=A(LL)
   11 A(LL)=TB
   12 DO 13 L=LST,MM,M
      LL=L+I
      TB=PIVI*A(LL)
      A(LL)=A(L)
   13 A(L)=TB
      A(LST)=J
      PIV=0.
      LST=LST+1
      J=0
      DO 16 II=LST,LEND
      PIVI=-A(II)
```

```
      IST=II+M
      J=J+1
      DO 15 L=IST,MM,M
      LL=L-J
      A(L)=A(L)+PIVI*A(LL)
      TB=ABS(A(L))
      IF(TB-PIV)15,15,14
   14 PIV=TB
      I=L
   15 CONTINUE
      DO 16 L=K,NM,M
      LL=L+J
   16 R(LL)=R(LL)+PIVI*R(L)
   17 LST=LST+M
   18 IF(M-1)23,22,19
   19 IST=MM+M
      LST=M+1
      DO 21 I=2,M
      II=LST-I
      IST=IST-LST
      L=IST-M
      L=A(L)+0.5
      DO 21 J=II,NM,M
      TB=R(J)
      LL=J
      DO 20 K=IST,MM,M
      LL=LL+1
   20 TB=TB-A(K)*R(LL)
      K=J+L
      R(J)=R(K)
   21 R(K)=TB
   22 RETURN
   23 IER=-1
      RETURN
      END
      SUBROUTINE NROOT(M,A,B,XL,X)
      DIMENSION A(1),B(1),X(1),XL(1)
      K=1
      DO100J=2,M
      L=M*(J-1)
      DO100I=1,J
      L=L+1
      K=K+1
  100 B(K)=B(L)
      MV=0
      CALL EIGEN(B,X,M,MV)
      L=0
      DO110J=1,M
      L=L+J
  110 XL(J)=1.0/SQRT(ABS(B(L)))
      K=0
      DO115J=1,M
      DO115I=1,M
      K=K+1
  115 B(K)=X(K)*XL(J)
      DO120I=1,M
      N2=0
      DO120J=1,M
      N1=M*(I-1)
      L=M*(J-1)+I
      X(L)=0.0
      DO120K=1,M
      N1=N1+1
      N2=N2+1
```

```
  120 X(L)=X(L)+B(N1)*A(N2)
      L=0
      DO130J=1,M
      DO130I=1,J
      N1=I-M
      N2=M*(J-1)
      L=L+1
      A(L)=0.0
      DO130K=1,M
      N1=N1+M
      N2=N2+1
  130 A(L)=A(L)+X(N1)*B(N2)
      CALL EIGEN(A,X,M,MV)
      L=0
      DO140I=1,M
      L=L+I
  140 XL(I)=A(L)
      DO150I=1,M
      N2=0
      DO150J=1,M
      N1=I-M
      L=M*(J-1)+I
      A(L)=0.0
      DO150K=1,M
      N1=N1+M
      N2=N2+1
  150 A(L)=A(L)+B(N1)*X(N2)
      L=0
      K=0
      DO180J=1,M
      SUMV=0.0
      DO170I=1,M
      L=L+1
  170 SUMV=SUMV+A(L)*A(L)
  175 SUMV=SQRT(SUMV)
      DO180I=1,M
      K=K+1
  180 X(K)=A(K)/SUMV
      RETURN
      END
      SUBROUTINE EIGEN(A,R,N,MV)
      DIMENSION A(1),R(1)
    5 RANGE=1.0E-6
      IF(MV-1)10,25,10
   10 IQ=-N
      DO20J=1,N
      IQ=IQ+N
      DO20I=1,N
      IJ=IQ+I
      R(IJ)=0.0
      IF(I-J)20,15,20
   15 R(IJ)=1.0
   20 CONTINUE
   25 ANORM=0.0
      DO35I=1,N
      DO 35 J=I,N
      IF(I-J)30,35,30
   30 IA=I+(J*J-J)/2
      ANORM=ANORM+A(IA)*A(IA)
   35 CONTINUE
      IF(ANORM)165,165,40
   40 ANORM=1.414*SQRT(ANORM)
      ANRMX=ANORM*RANGE/FLOAT(N)
```

```
      IND=0
      THR=ANORM
   45 THR=THR/FLOAT(N)
   50 L=1
   55 M=I+1
   60 MQ=(M*M-M)/2
      LQ=(L*L-L)/2
      LM=L+MQ
   62 IF(ABS(A(LM))-THR)130,65,65
   65 IND=1
      LL=L+LQ
      MM=M+MQ
      X=0.5*(A(LL)-A(MM))
   68 Y=-A(LM)/SQRT(A(LM)*A(LM)+X*X)
      IF(X)70,75,75
   70 Y=-Y
   75 SINX=Y/SQRT(2.*(1.+SQRT(ABS(1.-Y*Y))))
      SINX2=SINX*SINX
   78 COSX=SQRT(1.0-SINX2)
      COSX2=COSX*COSX
      SINCS=SINX*COSX
      ILQ=N*(L-1)
      IMQ=N*(M-1)
      DO125I=1,N
      IQ=(I*I-I)/2
      IF(I-L)80,115,80
   80 IF(I-M)85,115,90
   85 IM=I+MQ
      GOTO95
   90 IM=M+IQ
   95 IF(I-L)100,105,105
  100 IL=I+LQ
      GOTO110
  105 IL=L+IQ
  110 X=A(IL)*COSX-A(IM)*SINX
      A(IM)=A(IL)*SINX+A(IM)*COSX
      A(IL)=X
  115 IF(MV-1)120,125,120
  120 ILR=ILQ+I
      IMR=IMQ+I
      X=R(ILR)*COSX-R(IMR)*SINX
      R(IMR)=R(ILR)*SINX+R(IMR)*COSX
      R(ILR)=X
  125 CONTINUE
      X=2.0*A(LM)*SINCS
      Y=A(LL)*COSX2+A(MM)*SINX2-X
      X=A(LL)*SINX2+A(MM)*COSX2+X
      A(LM)=(A(LL)-A(MM))*SINCS+A(LM)
     **(COSX2-SINX2)
      A(LL)=Y
      A(MM)=X
  130 IF(M-N)135,140,135
  135 M=M+1
      GOTO60
  140 IF(L-(N-1))145,150,145
  145 L=L+1
      GOTO55
  150 IF(IND-1)160,155,160
  155 IND=0
      GOTO50
  160 IF(THR-ANRMX)165,165,45
  165 IQ=-N
      DO185I=1,N
      IQ=IQ+N
```

```
      LL=I+(I*I-I)/2
      JQ=N*(I-2)
      DO185J=I,N
      JQ=JQ+N
      MM=J+(J*J-J)/2
      IF(A(LL)-A(MM))170,185,185
  170 X=A(LL)
      A(LL)=A(MM)
      A(MM)=X
      IF(MV-1)175,185,175
  175 DO180K=1,N
      ILR=IQ+K
      IMR=JQ+K
      X=R(ILR)
      R(ILR)=R(IMR)
  180 R(IMR)=X
  185 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE MINV(A,N)
      DIMENSION A(1),M(20),L(20)
      D=1.
      NK=-N
      DO 80 K=1,N
      NK=NK+N
      L(K)=K
      M(K)=K
      KK=NK+K
      BIGA=A(KK)
      DO 20 J=K,N
      IZ=N*(J-1)
      DO 20 I=K,N
      IJ=IZ+I
      IF(ABS(BIGA)-ABS(A(IJ))) 15,20,20
   15 BIGA=A(IJ)
      L(K)=I
      M(K)=J
   20 CONTINUE.
      J=L(K)
      IF(J-K) 35,35,25
   25 KI=K-N
      DO 30 I=1,N
      KI=KI+N
      HOLD=-A(KI)
      JI=KI-K+J
      A(KI)=A(JI)
   30 A(JI)=HOLD
   35 I=M(K)
      IF(I-K) 45,45,38
   38 JP=N*(I-1)
      DO 40 J=1,N
      JK=NK+J
      JI=JP+J
      HOLD=-A(JK)
      A(JK)=A(JI)
   40 A(JI)=HOLD
   45 IF(BIGA) 48,46,48
   46 D=0.
      PRINT 1
    1 FORMAT(9HMINV D=0.)
      RETURN
   48 DO 55 I=1,N
      IF(I-K) 50,55,50
   50 IK=NK+I
```

```
      A(IK)=A(IK)/(-BIGA)
   55 CONTINUE
      DO 65 I=1,N
      IK=NK+I
      HOLD=A(IK)
      IJ=I-N
      DO 65 J=1,N
      IJ=IJ+N
      IF(I-K) 60,65,60
   60 IF(J-K) 62,65,62
   62 KJ=IJ-I+K
      A(IJ)=HOLD*A(KJ)+A(IJ)
   65 CONTINUE
      KJ=K-N
      DO 75 J=1,N
      KJ=KJ+N
      IF(J-K) 70,75,70
   70 A(KJ)=A(KJ)/BIGA
   75 CONTINUE
      D=D*BIGA
      A(KK)=1./BIGA
   80 CONTINUE
      K=N
  100 K=K-1
      IF(K) 150,150,105
  105 I=L(K)
      IF(I-K) 120,120,108
  108 JQ=N*(K-1)
      JR=N*(I-1)
      DO 110 J=1,N
      JK=JQ+J
      HOLD=A(JK)
      JI=JR+J
      A(JK)=-A(JI)
  110 A(JI)=HOLD
  120 J=M(K)
      IF(J-K) 100,100,125
  125 KI=K-N
      DO 130 I=1,N
      KI=KI+N
      HOLD=A(KI)
      JI=KI-K+J
      A(KI)=-A(JI)
  130 A(JI)=HOLD
      GO TO 100
  150 RETURN
      END
      SUBROUTINE PROA(A,B,R,M)
      DIMENSION A(1),B(1),R(1)
      IR=0
      IK=-M
      DO 10 K1=1,M
      IK=IK+M
      DO 10 J1=1,M
      IR=IR+1
      J3=J1-M
      IB=IK
      R(IR)=0.
      DO 10 I3=1,M
      J3=J3+M
      IB=IB+1
   10 R(IR)=R(IR)+A(J3)*B(IB)
      RETURN
      END
```

## ТЕСТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПОДПРОГРАММЫ KAMPL

```
      PROGRAM GIJ
      DIMENSION W(3),AS(3),S(36)
      DATA
     *(W=2.4,1.8,2.7),(AS=0.2,0.4,0.),(H=2.),(E=2.5),
     *(DL=17.),(K=3),(IV=1),(IND=1),(HL=50.)
      COMPLEX S
      K2=K*2
2     CALL KAMPL(W,AS,S,
     *H,E,AL,BL,DL,SL,HL,K,IV,IND)
3     PRINT 50,S
   50 FORMAT(6(2X,E12.5))
4     STOP
      END
```

```
ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ ТИПОВ ТЕМ ВОЛН
      2.12776+00
      1.84468+00
      1.76212+00
СКОРРЕКТИРОВАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ШИРИН СВЯЗАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ
            2.35
            1.79
            2.69
```

Элементы матрицы рассеяния

| Re | Im | Re | Im | Re | Im |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.85357-01 | -6.70450-03 | 8.50049-02 | 8.75702-01 | 3.43007-01 | -1.42732-02 |
| -4.98517-02 | -1.20486-01 | 5.34711-02 | 1.90442-02 | -2.98661-02 | -7.39774-02 |
| 8.50049-02 | 8.75702-01 | 2.85357-01 | -6.70450-03 | -4.98517-02 | -1.20486-01 |
| 3.43007-01 | -1.42732-02 | -2.98661-02 | -7.39774-02 | 5.34711-02 | 1.90442-02 |
| 3.43007-01 | -1.42732-02 | -4.98517-02 | -1.20486-01 | 2.75091-01 | -5.60273-04 |
| 9.97227-02 | 8.34167-01 | 2.68060-01 | -5.59295-03 | -4.52805-02 | -9.87363-02 |
| -4.98517-02 | -1.20486-01 | 3.43007-01 | -1.42732-02 | 9.97227-02 | 8.34167-01 |
| 2.75091-01 | -5.60273-04 | -4.52805-02 | -9.87363-02 | 2.68060-01 | -5.59295-03 |
| 5.34711-02 | 1.90442-02 | -2.98661-02 | -7.39774-02 | 2.68060-01 | -5.59295-03 |
| -4.52805-02 | -9.87363-02 | 2.89074-01 | -9.71095-03 | 8.08321-02 | 9.03623-01 |
| -2.98661-02 | -7.39774-02 | 5.34711-02 | 1.90442-02 | -4.52805-02 | -9.87363-02 |
| 2.68060-01 | -5.59295-03 | 8.08321-02 | 9.03623-01 | 2.89074-01 | -9.71095-03 |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1.1. **Большая** Советская Энциклопедия (БСЭ), 3-е изд, т. 8, с. 349 — 352.

1.2. **Линии** передачи сантиметровых волн: Пер. с англ./Под ред. Г. А. Ремеза. — М.: Сов. радио, 1951, — 416 с.

1.3. **Машкович М. Д.** Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ.— М.: Сов. радио, 1969.— 240 с.

1.4. **Яворский Б. М., Детлаф А. А.** Справочник по физике. — М.: Физматгиз, 1963,— 848 с.

1.5. **БСЭ**, 3-е изд., т. 15, с. 172, 173.

1.6. **Карякин И. И. Быстров К. Н., Киреев П. С.** Краткий справочник по физике.— М.: Высшая школа, 1962.—560 с.

1.7. **Жиров Г. А.** Технология гибридных интегральных микросхем. — Киев: Вища школа, 1976.— 240 с.

1.8. **Черняев В. Н.** Технология производства интегральных микросхем.— — М.: Энергия, 1977,— 376 с.

1.9. **БСЭ**, 3-е изд., т. 23, с. 188.

1.10. **Мейнке Х., Гундлах Ф.** Радиотехнический справочник в 2-х т.: Пер. с нем. — М. — Л.: ГЭИ, 1961, т. I. — 416 с.

1.11. **Краткий** справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры/ Р. Х. Бальян, Н. А. Барканов, А. В. Борисов и др.; Под. ред. Р. Г. Варламова.— М.: Сов. радио, 1972.— 856 с.

1.12. **Справочник** по призводству стекла в 2-х т./Под ред. И. И. Китайгородского и С. И Сильвестровича.— М.: Госстройиздат, 1963, т. I.— 620 с.

1.13. **Стекло:** Справочник/Под ред. Е. М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, 1963.— 350 с.

1.14. **БСЭ**, 3-е изд., т. 25, с. 326.

1.15. **БСЭ**. 3-е изд., т. 16, с. 242.

1.16. **Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П.** Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1972.— 512 с.

1.17. **БСЭ**, 3-е изд., т. 36, с. 632.

1.18. **Краткий** справочник машиностроителя/Под ред. А. С. Близнянского.— М.: Машгиз, 1950.— 488 с.

1.19. **ГОСТ 2789 — 73.** Классы шероховатости поверхности.

1.20. **ГОСТ 14007 — 68.** Покрытия металлические и неметаллические (неорганические), группы условий эксплуатации.

1.21. **Справочник** по электротехническим материалам в 3-х т/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. М.: Энергия, 1974, т. 2. — 616 с.

1.22. **Справочник** по электротехническим материалам в 3-х т./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. М.: Энергия, 1974, т. 1. — 584 с.

1.23. **Howe H.** Stripline Circuit Design. 1976.

1.24. **Малорацкий Л. Г.** Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. — М.: Сов. радио, 1976.—216 с.

1.25. **Александров Л. А., Вольф Е. М., Гальперин Н. М. и др.** О диэлектрических свойствах высокочастотной радиокерамики при температуре жидкого гелия. — Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1977, вып. 5 (24), с. 3—9.

1.26. **Каталог** технических ситаллов. — М.: Стройиздат, 1969. — 40 с.

1.27. **Княжер Г. Б., Литвинов П. И., Фирсов В. М.** Ситаллы для СВЧ техники. — Электронная промышленность, 1976, № 2, с. 18—23.

1.28. **Подложки** фирмы «Duplate». Проспект фирмы «Duplate», Канада, 1972.

1.29. **Alsimag Ceramics.** Проспект фирмы «American Lava Corporation», США, 1973.

1.30. **Sobol H., Caulton M.** The Technology of Microwave Integrated Circuits, — Advances in Microwaves, 1974, v. 8, p. 12—66.

1.31. **Технология** тонких пленок: Справочник в 2-х т./ Под ред. Л. Майсела и Р. Глэнга, М.: Сов. радио, 1977, т. 2. — 768 с.
1.32. **Колесов Л. Н.** Введение в инженерную микроэлектронику. — М.: Сов. радио, 1974.— 280 с.
1.33. **Wilson A. W., Terry L. E.** — Nepcon-70 Proccedings, reports. № 3-1-3-15.
1.34. **Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я.** Микроэлектроника. — М.: Высшая школа, 1977. — 416 с.
1.35. **Коултон М.** Пленочная технология и СВЧ интегральные схемы. — В кн.: Технология тонких и толстых пленок: Пер. с англ. — М.: Мир, 1972, с. 125—135.
1.36. **Парфенов О. Д.** Технология микросхем.— М.: Высшая школа, 1977. — — 256 с.
1.37. **Справочник** по электротехническим материалам в 3-х т./Под ред. Ю.В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева.—Л. Энергия, 1976, т. 3. — 896 с.
1.38. **Хамер Д., Биггерс Дж.** Технология толстопленочных гибридных интегральных схем. — М.: Мир, 1975.— 496 с.
1.39. **Бушминский И. П., Морозов Г. В.** Конструирование и технология пленочных СВЧ микросхем.— М.: Сов. радио, 1978. — 144 с.
1.40. **Воробьев Е. А., Михайлов В. Ф., Харитонов А. А.** СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. — М.: Сов. радио, 1977.
1.41. **The** thick-film microcircuitry handbook, v. 2, Du Pont, 1973.
1.42. **Николаев В. А., Славинский О. К.** Об одной конструктивной реализации сосредоточенных емкостей СВЧ.— В кн.: Современные методы разработки радиоаппаратуры.— Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 162—166.
1.43. **Николаев В. А. Славинский О. К., Смирнов А. Е.** СВЧ схемы на сосредоточенных элементах.— В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 26—39.
1.44. **Каталог** электронных материалов фирмы «Du Pont» США, 1975.

2.1. **ГОСТ 21702—76.** Устройства СВЧ. Полосковые линии: Термины и определения.
2.2. **Бинс К., Лауренсон П.** Анализ и расчет электрических и магнитных полей: Пер. с англ./Под ред. И. И. Галанова — М.: Энергия, 1970.— 376 с.
2.3. **Cohn S. B.** Characteristic impedance of schielded-strip transmission lines. — IRE, Trans., 1954, v. MTT-2, № 7, p. 52—55.
2.4. **Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.,** Специальные функции: Пер. с нем./ Под ред. Л. И. Седова.— М.: Наука, 1968.—344 с.
2.5. **Ганстон М. А. Р.** Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ: Пер. с англ./Под ред. А. З. Фрадина. — М.: Связь, 1976 — 150 с.
2.6. **Hayt W. H.** Potential solution of a homogenious stripline of finite width.— IRE, Trans., 1955, v. MTT-3, № 4, p. 16—18.
2.7. **Waldron R. A.** Theory of a stripline cavity for measurement of dielectric constants and gyromagnetic-resonance line widths.— IEEE, Trans., 1964, v. MTT-12, № 5, p. 123—131.
2.8. **Cohn S. B.** Problems of strip transmission lines.— IRE, Trans. 1955, v. MTT-3, № 3, p. 119—126.
2.9. **Гипсман А. И., Нетук А. М., Силин Р.А.** Характеристики основной волны экранированной щелевой линии. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1980, вып. 2, с. 3—6.
2.10. **Wen C. P.** Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications. — IEEE, Trans., 1969, v. MTT-17, № 12, p. 1087—1090.
2.11. **Левина Н. Н., Федоров А. Н., Щукина Г. С.** Собственные волны открытой щелевой линии. — Радиотехника и электроника, 1981, т. 26, № 7, с. 1414—1419.
2.12. **Дьюкс Дж. М.** Исследование некоторых основных свойств полосковых передающих линий с помощью электролитической ванны.— В кн.: Полосковые системы сверхвысоких частот: Пер. с англ. /Под ред. В. И. Сушкевича.—М.: ИЛ, 1959. — 356 с.
2.13. **Cohn S. B.** Thickness Correction for Capacitive Obstacles and Strip Conductors. — IRE, Trans. 1960, v. MTT-8, № 11, p. 633—637.

2.14. **Shiffres. P.** How much CW power can stripline handle. — Microwaves, 1966, № 6, p. 25—34.

2.15. **Полосковые** линии и устройства сверхвысоких частот/ Д. С. Денисов, Б. В. Кондратьев, Н. И. Лесик и др.; Под ред. В. М. Седых. — Харьков: Вища школа, 1974. — 276 с.

2.16. **Райцин Л. Г.** Электрическая прочность СВЧ устройств. — М.: Сов. радио, 1977. — 168 с.

2.17. **Спектор Н.** Оценка допустимой мощности в полосковой линии. — В кн.: Полосковые системы сверхвысоких частот. Пер. с англ./Под ред. В. И. Сушкевича — М.: ИЛ, 1959, с. 160 — 172.

2.18. **Маттей Г. Л., Янг Д., Джонс Е. М. Т.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: Пер. с англ./Под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнира. — М.: Связь, 1971.— 440 с.

2.19. **Klin G.** Thermal resistivity table simplifies temperature culculation.— Microwaves, 1970, № 2, p. 58—59.

2.20. **Вольман В. И., Пименов Ю. В.** Техническая электродинамика.— М.: Связь, 1971. — 488 с.

2.21. **Самуйлов Г. П.** О приближенном расчете собственных значений высших типов волн в полосковых линиях. — Радиотехника и электроника, 1961, т. 6, № 4, с. 579—583.

2.22. **Лерер А. М., Михалевский В. С.** К расчету щелевого моста и критических частот симметричной полосковой линии методом интегральных преобразований. — Радиотехника и электроника, 1972, т. 17, № 5, с. 913—918.

2.23. **Schneider M. V.** Microstrip — line properties of parallel strips seperated by a dielectric lines for microwave integrated circuits. — BSTJ, 1969, v. 48, № 5—6, p. 1421—1444.

2.24. **Hilberg W.** Strenge Berechnung des wellen-widerstandes von parallelen streifenleitungen und lin vergleich mit naherungen. — AEÜ, 1971, Bt. 54. № 4, S. 200—205.

2.25. **Wheeler H. A.** Transmission line properties of parallel wide strips by a conformal — mapping approximation. — IEEE, Trans. 1964, v. MTT-12, N 5, p. 280—289.

2.26. **Black K. G., Higgins T. J.** Regorous determination of the parameters of microstrip transmission lines. — IRE, Trans. 1955, v. MTT-3, № 3, p. 93—113.

2.27. **Кондратьев Б. В., Лесик Н. И., Салий И. Н., Садых В. М.** Исследование несимметричной полосковой линии с заряженной пластиной произвольной толщины — Радиотехника и электроника, 1969, т. 14, № 3, с. 524—527.

2.28. **Wheeler H. A.** Transmission sheet.— IEEE, Trans, 1965, v. MTT-13, № 3, p. 172—185.

2.29. **Silvester P.** TEM wave properties of microstrip transmission lines. — Proc. IEE, 1968, v. 115, № I, p. 43—48.

2.30. **Kaupp H.** Characteristics of microstrip transmission lines. — IEEE, Trans. 1967, v. EC-16, N 4, p. 185—193.

2.31. **Getsinger W. J.** Coupled rectangular bars between parallel plates.— IEEE, Trans., 1962, v, MTT -10, № I, p. 65—72.

2.32. **Denlinger E. J.** A frequency dependent solition for microstrip transmission lines. — IEEE. Trans, 1971, v. MTT-19, № 1, p. 30—39.

2.33. **Itoh T., Mittra R.** Spectral — Domain aproach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines. — IEEE, Trans. 1973, v. MTT-21, № 7, p. 496—499.

2.34. **Kowalski G., Pregla K.** Dispersion characteristics of shielded microstrips with finite thickness. — AEÜ. 1971, Bt. 25, № 4, s. 193—196.

2.35. Laboux A., Vorst A., Vender M., Pierart M. Duspersion characterictics of microstrip lines. — Proc. 4 th collog. Micriwave Commun. Budapest, 1970, v. 3.

2.36. Ermert H. Guided modes and radiation characteristics of covered microstrip lines. — AEU, 1976, Bt. 30, № 2, S.65—70.

2.37. Essayag G., Sauve B. Effests of geometrical parameters of a microstrip on its dispersive properties. — Electronics Letters, 1972, v. 8, № 21, p. 529 — 530.

2.38. **Richings J. G.** An accurate experimental method for determining the important properties of microstrip transmission lines. — Marconi Rev., 1974, v. 37, № 195, p. 209—216.

2.39. **Troughton P.** Measurement techniques in microstrip. — Electronics Letters, 1969, v. 5, № 1, p. 25.

2.40. **Shudobiak W. Y., Yain O. P., Makios V.** Dispersion in microstrip.— — IEEE, Trans. 1971, v. MTT-19, p. 783—784.

2.41. **Wolff I. Knoppik N.** Microstrip ring resonator and dispersion measurement on microstrip lines. — Electronics Letters, 1971, v. 26, №7, p. 779—781.

2.42. **Eaves R., Boile D. M.** Guided waves in limit cases of microstrip. — IEEE Trans., 1970, v. MTT-18, № 4, p. 231—232.

2.43. **Schneider M. V.** Dielectric loss in integrated microwave cirsuits. — BSTJ, 1969, v. 48, № 7, p. 2325—2332.

2.44. **Pucel R., Masse D., Hartwig C.** Losses in microstrip. — IEEE Trans., 1968, v. MTT-16, № 6, p. 342—350.

2.45. **Pucel R., Masse D., Hartwig C.** Correction to «Losses in microstrip.» — IEEE Trans., 1968, v. MTT-16, № 12, p. 1064.

2.46. **Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р.** Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. — М.: Сов. радио, 1972. — 232. с.

2.47. **Kompa G.** Dispersion measurements of the first two higherorder modes in open microstrip. — AEÜ, 1975, Bt. 29, № 4, S. 182—184.

2.48. **Малютин Н. Д., Воробьев П. А.** Расчет погонной емкости и характеристического сопротивления планарной полосковой линии. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1972, т. 15, № 5, с. 662, 663.

2.49. **Самохин Г. С., Чепурных И. П.** Программа расчета основных электродинамических характеристик волноводов произвольного поперечного сечения. — Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ, 1976, вып. 2, с. 119—121.

2.50. **Силин Р. А., Чепурных И. П.** Типы волн в симметричной полосковой линии. — Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ, 1981, вып. 1, с. 24—32.

2.51. **Вайнштейн Л. А.** Открытые резонаторы и открытые волноводы.— М.: Сов. радио, 1966, — 475 с.

2.52. **Егоров Ю. Н.** Частично заполненные прямоугольные волноводы. — М.: Сов. радио, 1967. — 216 с.

2.53. **Гипсман А. И., Нефедов И. С., Силин Р. А.** О возможности излучения квази-ТЕМ волн в несимметричной полосковой линии. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1979, вып. 8, с. 12—14.

2.54. **Краснушкин П. Е.** Нормальные волны. — В кн.: Физический энциклопедический словарь, в 5-т. — М.: Изд-во БСЭ, 1963, т. 3, с. 435 — 439.

2.55. **Властовский Э. Г.** К теории связанных линий передачи. — Радиотехника, 1967, т. 22, № 4, с. 28—35.

2.56. **Малютин Н. Д.** Матричные параметры неодинаковых связанных полосковых линий с неоднородным диэлектриком. — Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 12, с. 2473—2478.

2.57. **Васильев В. И., Силин Р. А.** Расчет согласования штыревых замедляющих систем. — Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ, 1977, вып. 12, с. 77—81.

2.58. **Кравченко С. И., Бахарев С. И.** Расчет матрицы рассеяния многопроводных полосковых линий и устройств на их основе. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1978, вып. 8, с. 45 — 53.

2.59. **Красноперкин В. М., Самохин Г. С., Силин Р. А.** К расчету матрицы частичных емкостей для многополосковых линий. — Элетронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1980, вып. 2, с. 40—49.

2.60. **Дмитрюк А. А., Силин Р. А.** Расчет полосно-пропускающего фильтра СВЧ на несимметричных микрополосковых линиях.—Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1978, вып. 1, с. 119, 120.

2.61. **Самохин Г. С., Гипсман А. И., Силин Р. А.** Высшие типы волн в несимметричной полосковой линии. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1977, вып. 2, с. 3—13.

2.62. **Сегнетоэлектрики** в технике СВЧ/Под ред. О. Г. Вендика. — М.: Сов. радио, 1979.— 269 с.

2.63. **Гипсман А. И., Самохин Г. С., Силин Р. А.** Распределение токов нормальных волн в несимметричной полосковой линии. — В кн.: Машинное проектирование устройств и систем СВЧ. Межвуз. сб. трудов МИРЭА.— М., 1977, с. 66—77.

2.64. **Фиалковский А. Т., Кривозубов Б. А., Морозова С. В.** Расчет краевых реактивностей интегральных схем СВЧ.—Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1978, вып. 3, с. 116, 117.

2.65. **Jansen R. H.** High-speed computation of single and coupled microstrip parameters. — IEEE Trans. 1978, v. MTT-26, № 2, p. 75—82.

2.66. **Гипсман А. И., Самохин Г. С.** Программы расчета замедления основных неизлучающихся высших типов волн в несимметричной полосковой линии. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1979, вып. 9, с. 131—132.

2.67. **Гипсман А. И., Самохин Г. С., Силин Р. А., Чурсин А. Ф.** Дисперсионные характеристики полосковой линии на многослойной подложке. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1979, вып. 10, с. 8—14.

2.68. **Гипсман А. И., Самохин Г. С., Силин Р. А., Чурсин А. Ф.** Интегродифференциальные уравнения для расчета характеристик полосково-щелевых линий в слоистом магнитодиэлектрике. — В кн.: Машинное проектирование устройств и систем СВЧ: Межвуз. сб. трудов МИРЭА. — М., 1977, с. 53—76.

2.69. **Белуга И. Ш.** Программа расчета нормальных квази-ТЕМ волн в $N$-полосковой линии с тонкими проводниками. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1977, вып. 9, с. 125—127.

2.70. **Беруга И. Ш., Хоменко В. М., Чурсин А. Г.** О решении двумерных задач электростатики методом интегральных уравнений. — В кн.: Машинное проектирование устройств и систем СВЧ: Межвуз. сб. трудов МИРЭА. — М., 1979.

2.71. **Справочник** по элементам полосковой техники/Под ред. А. Л. Фельдштейна. — М.: Связь, 1979. — 336 с.

2.72. **Белуга И. Ш.** К расчету полей поперечных электромагнитных волн в штыревых замедляющих системах. — Изв. вузов СССР. Радиотехника, 1959, т. 2, № 1, с. 84.

2.73. **Белуга И. Ш.** Расчет характеристик некоторых штыревых и резонаторных замедляющих систем. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1, Электроника СВЧ, 1963, вып. 10, с. 71—120.

2.74. **Силин Р. А., Сазонов В. П.** Замедляющие системы. — М.: Сов. радио, 1966. — 632 с.

2.75. **Akhtarzad S., Rowdothem T. R., Jons P. B.** The design of coupled microstrip lines. — IEEE Trans. 1975, v. MTT-23, № 6, p. 486—492.

2.76. **Кон С. Б.** Экранированная связанная полосковая линия. — В кн.: Полосковые системы сверхвысоких частот: Пер. с англ./Под ред. В. И. Сушкевича. — М.: ИЛ, 1959, с. 173—193.

2.77. **Itakura K., Arakam T., Yamomoto S.** Coupled Strip Transmission Line with Three Center Conducrors.—IEEE Trans., 1966, v. MTT-14, № 10, p. 446—461.

2.78. **Сато Р., Икеда Т.** Параметры линий.— В кн.: Фильтры и цепи СВЧ: Пер. с англ. Л. В. Алексеева, А. Е. Знаменского, В. С. Полякова. — М.: Связь, 1976, с. 51—70.

2.79. **Cohn S. B.** Characteristic impedance of broadside coupled strip. transmission Lines. — IEEE Trans., 1960, v. MTT-8, № 11, p. 633—637.

2.80. **Cohn S. B.** Slot-line on a dielectric substrate. — IEEE Trans., 1969, v. MTT-17, № 10, p. 768—778.

2.81. **Лерер А. М., Цветковская С. М.** Дисперсионные характеристики микрополосковых линий, связанных через щель. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1980, т. 23, № 9, с. 10.

3.1 **Олинер А. А.** Эквивалентные схемы неоднородностей в уравновешенной полосковой передающей линии. — В кн.: Печатные схемы сантиметрового диапазона: Пер. с англ./Под ред. В. И. Сушкевича — М.: ИЛ, 1956, с. 294—317.

3.2. **Кон С. Б.** Проблемы полосковых передающих линий. — В кн.: Печатные схемы сантиметрового диапазона: Пер. с англ./Под ред. В. И. Сушкевича — М.: ИЛ, 1956, с. 259 — 277.

3.3. **Kompa G.** *S*-matrix computation of microstrip discontinuities with a planar waveguide model. — AEÜ, 1976, Bd. 30, № 2, S. 58—70.
3.4. **Menzel W., Wolff J.** A method for calsulating the frequency-dependent properties of microstrip discontinuities. — IEEE Trans., 1977, v. MTT-25, № 2, p. 107—112.
3.5. См. [2.5].
3.6. **Wheeler H. A.** Transmission-line properties of parallel strips by a conformal-mapping approximation. — IEEE Trans., 1964, v. MTT-12, № 3, p. 280—289.
3.7. **Mehran R.** Frequency-dependent scattering matr ix on microstrip right angle bends, T-junctions and crossing. — AEÜ, 1975, Bd. 29, № 11, S. 454—459.
3.8. **Бахарев С. И., Смирнов В. П., Соколова Н. С.** Неоднородности в полосковых линиях. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1975, вып. 6, с. 63—68.
3.9. **Справочник** по волноводам :пер. с англ./Под ред. Я. Н. Фельда. — М.: Сов. радио, 1952, — 431 с.
3.10. **Бахарев С. И., Смирнов В. П.** Матрицы рассеяния неоднородностей в полосковых линиях. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1976, вып. 7, с. 32—39.
3.11. **Бахарев С. И., Смирнов В. П.** Центральный индуктивный штырь в полосковой линии. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1977. вып. 11, с. 145—150.
3.12. **Campbell J., Jones W.** Symmetrically truncated right-angle corners in parallel-plate and rectangular waveguides. — IEEE Trans., 1968, v. MTT-16, № 8, p. 165—176.
3.13. **Нефедов Е. И., Фиалковский А. Т.** Полосковые линии передачи. — М.: Наука, 1974. — 128 с.
3.14. **Rice S. O.** Reflection from corners in rectangular waveguides-conformal transmission. — BSTJ, 1949, v. 28, № 1.
3.15. **Farrar A., Adams A. T.** Matrix methods for microstrip htree-dimensional problems. — IEEE Trans., 1972, v. MTT-20, № 8, p. 497—504.
3.16. **Фиалковский А. Т., Сороковой П. И., Храпко А. М.** Расчет коэффициента отражения и передачи для поперечной щели в верхнем проводнике несимметричной полосковой линии. — Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ, 1974, вып. 5.
3.17. **Maeda M.** An analysis of gap in microstrip transmission lines. — IEEE Trans., 1972, v. MTT-20, № 6, p. 390—396.
3.18. **Jamashita E.** Variational method for the analysis of microstrip — like transmission lines. — IEEE Trans., 1968, v. MTT-16, № 8, p. 529—535.
3.19. **Rahmat-Samii J. Jtoh T. Mittra R.** A spectral domain analysis for solving microstrip discontinuity problems. — IEEE Trans., 1974, v. MTT-22, № 4.
3.20. **Benedek P., Silvester P.** Equivalent capacitances for microstrip gaps and steps. — IEEE Trans., 1972, v. MTT-20, N 11, p. 729—733.
3.21. **Кравченко С. И., Бахарев С. И., Костина И. А.** Расчет матрицы рассеяния для конечного числа связанных линий. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1977, вып. 11, с. 3—10.
3.22. **Wolff J. Knoppik N.** Rectangular and circular microstrip disk capacitors and resonators. — IEEE Trans., 1974, v. MTT-22, № 10, p. 857—864.
3.23. **Бахарев С. И., Соколова Н. С.** Расчет эффективной диэлектрической проницаемости подложки полосковой линии для случая кольцевого резонатора. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1976, вып. 7, с. 40—43.
3.24. **Wolff J., Knoppik N.** Mikrostrip — Scheibenresonatoren. — AEÜ, 1974, Bd. 28, № 3, S. 101—108.
3.25. **Wu Y. S., Rosenbaum F. J.** Mode chart for microstrip ring resonators. — IEEE Trans., 1974, v. MTT-21, № 7, p. 487—489.
3.26. **Schneider M. V.** Microstrip-line properties of parallel strips separated by a dielectric lines for microwave integrated circuits. — BSTJ, 1969, v. 48, № 5—6, p. 1421—1444.
3.27. **Kretzschmar J. G.** Theoretical results for the elliptic microstrip resonator. — IEEE Trans., 1972. v. MTT-20, № 5, p. 342—343.

3.28. **Kretzschmar J. G.** Mode charts for elliptic resonant cavities — Electron. Lett., 1970. v. 6, p. 432—434.

3.29. **Robinson G. H.** Resonant frequency calculations for microstrip cavities. — IEEE Trans., 1971, v. MTT-19, № 7, p. 665—666.

3.30. **Батура В. Г., Кривозубов Б. А., Моисеев В. К., Фиалковский А. Т.** Измерение диэлектрической проницаемости подложек СВЧ интегральных схем в дисковом микрополосковом резонаторе. — Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1978, вып. 9, с. 67—73.

3.31. **Кравченко С. И., Бахарев С. И.** Расчет матрицы рассеяния многопроводных полосковых линий и устройств на их основе. — Вопросы Радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1978, вып. 8, с. 45—53.

3.32. **Альтман Д.** Устройства СВЧ — М.: Мир, 1968. — 488 с.

3.33. **Фильтры** и цепи СВЧ: Пер. с англ. Л. В. Алексеева, А. Е. Знаменского, В. С. Полякова. — М.: Связь, 1976. — 246 с.

4.1. **Howe H.** Stripline is alive and well... — Microwave J. 1971, v. 14, № 7, p. 25—28, 52.

4.2. **Малорацкий Л. Г.** Микроминиатюризация элементов и узлов СВЧ. — М.: Сов. радио, 1976. — 216 с.

4.3. **Гофман Р., Туссен Х. Н.** Состояние и перспективы развития СВЧ интегральных схем. — Зарубежная электронная техника, 1971, № 10, с. 3—15.

4.4. **Алмазов В. Н., Калиничев Д. Д., Семенов В. М.** и др. Вопросы создания элементной базы СВЧ узлов на подложках из ситалла. — В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 133 — 144.

4.5. **Полосковые** платы и узлы. Проектирование и изготовление /Под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. — М.: Сов. радио, 1979. — 248 с.

4.6. **Бушминский И. П., Морозов Г. В.** Технология гибридных интегральных схем СВЧ. — М.: Высшая школа, 1980.— 285 с.

4.7. **Конструирование** и расчет полосковых устройств / В. И. Голубев, И. С. Ковалев, Е. Г. Кузнецов и др.; Под ред. И. С. Ковалева. — М.: Сов. радио, 1974.— 296 с.

4.8. **Антонова Л. Ф., Бахтин Ж. Д., Вернов В. М. и др.** Технологические приемы разработки тонкопленочных узлов СВЧ.— В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 4—13.

4.9. **Конструирование** микроэлектронной аппаратуры/ Б. Ф. Высоцкий, А. Н. Головин, В. В. Марков и др.; Под ред. Б. Ф. Высоцкого—М.: Сов. радио, 1974. — 120 с.

4.10. **Reizemann M.** Parley Analyses 3 paths to world of MIC'S. — Electronic Design., 1968, v. 16, № 23, p. 25—26, 28—30.

4.11. **Краткий** справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры/ Р. Х. Бальян, Н. А. Барканов, А. В. Борисов и др.; Под ред. Р. Г. Варламова,— М.: Сов. радио—1972. — 856 с.

4.12. См. [1.39].

4.13. **Семенов В. М., Царенков В. С.** О моделировании на ЭВМ процента выхода годных СВЧ устройств при серийном производстве. — В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32.

4.14. **Блейвас И. М., Голеницкий И. И., Сазонов В. П. и др.** Автоматизированная система комплексного машинного проектирования изделий СВЧ электронной техники. —Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1978, вып. 1, с. 93—117.

4.15. **Славинский О. К.** Сравнение конструктивных возможностей построения схем на сосредоточенных элементах и отрезках линий передачи. — В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 57—62.

4.16. См. [1.43].

4.17. **Пекелис М. А., Смирнов А. Е., Царенков В. С., Ширяев Д. Д.** Расчет частотных характеристик многоканальных делителей мощности на сосредоточенных элементах. — В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры.— Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 76 — 85.

4.18. **Славинский О. К., Царенков В. С., Эйдинов Ю. М.** Конструкция толстопленочных и тонкопленочных устройств СВЧ. — В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 40—47.
4.19. **Алексанян И. Т., Бондаренко О. Е., Орлов Б. М. и др.** Получение и исследование толстых пленок меди. — В кн.: Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники. Сер. физ-мат. МИЭТ, 1973; вып. 14, с. 41—49.
4.20. **Оборудование** для производства толстопленочных ГИС (обзор). — Информационный бюлл. — Радиоэлектроника за рубежом, 1977, вып. 22 (838), с. 10—36.
4.21. **Sobol H., Caulton M.** The technology of microwave integrated Circuits. — Advances in microwaves, 1974, v. 8, p. 12—66.
4.22. **Caulton M.** Lumped elements in microwave integrated circuits. — Advances in microwaves, 1974, v. 8, p. 144—202.
4.23. **Horton R., Easter B., Gopinath A.** Variation on microstrip losses with thickness of strip. — Electronics Letters, 1971, v. 7, № 17, p. 490—491.
4.24. **Бушминский И. П.** Изготовление элементов конструкций СВЧ. — М.: Сов. радио, 1974. — 304 с.
4.25. **Butlin R. S., Michie D. F., McPhun M. K.** Measurement of overlay capacitors at X — Band with independent asessment of thin film conductors losses. — European Microwave Conference Proceedings, 1973, v. 1, B. 14, p. 5.
4.26. **Patel R. N.** Microwave conductivity of thick film Conductors. — Electronics Letters, 1970, v. 6, № 15, p. 455—456.
4.27. **Meinel H., Rembold B., Weisbeck W.** Optimisation of thin thick film technology for hybrid microwave circuits. — Electrocomponent Science and Technology, 1977, v. 4, p. 143—146.
4.28. **Lake B., O'Donele E. R.** Thick-film components. — European Microwave conference Proceedings, 1973 v. 1, B. 6, p. 5.
4.29. **Кузьменко В. А., Славинский О. К., Смирнов А. Е. и др.** Некоторые вопросы изготовления ГИС СВЧ методами технологии «толстых» пленок. — В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 182—190.
4.30. См. [2.18].
4.31. **Wolff J., Knoppik N.** Rectangular and circular microstrip disk capacitors and resonators. — IEEE Trans., 1974, v. MTT-22, № 10, p. 857—864.
4.32 **Wolff J.** Statishe Kapazitaten von Rechteckigen and Kreisformigen Microstrip — Scheibenkondensatoren. — AEÜ, 1973, B. 27, № 1, S. 44—47.
4.33. **Полосковые** линии и устройства сверхвысоких частот./Д. С. Денисов, Б. В. Кондратьев, Н. И. Лесик, Н. В. Ляпунов, И. И. Сапрыкин, В. М. Седых./ Под ред. В. М. Седых. — Харьков: Вища школа, 1974. — 275 с.
4.34. **Готра З. Ю.** Тонкопленочные резисторы микросхем. — Львов: Каменяр, 1976. — 180 с.
4.35. **Семенов В. М., Славинский О. К., Смирнов А. Е.** Расчет и конструирование сосредоточенных элементов тонкопленочных гибридных интегральных схем СВЧ. — В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 155—161.
4.36. **Сыромятников В. П., Платонов В. Д., Кожевников С. А.** Исследование методов подстройки СВЧ микросхем. — Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства, 1977, вып. 2, с. 29—36.
4.37. **Вернов В. М., Славинский О. К., Чириков И. В.** Экспериментальное исследование резисторов в интегральных схемах дециметрового диапазона. — В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 48 — 56.
4.38. **Серия** бескорпусных резисторов и катушек индуктивности. — Электроника, 1969, т. 42, № 18, с. 61.
4.39. **Minicomponents** — building blocks for hybrids. — EDN, 1970, v. 15, N 17, p. 33—44.
4.40. **Miley J. E.** Try impact extrusion for lowcost Mic Packaging. — Microwave, 1976, v. 15, № 6, p. 62, 66, 68.
4.41. **Славинский О. К., Эйдинов Ю. М.** Корпуса и разъемы для малогабаритных схем СВЧ.— В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 171—175.

4.42. **Минскова Л. В., Сендерук Ю. С., Толдов А. П. и др.** Контактное устройство для измерения параметров СВЧ микросхем. — Электронная промышленность, 1976, № 6, с. 60, 61.

4.43. **Акиничева А. С.** Коаксиально-полосковые переходы (реферативный обзор). — Обзоры по электронной технике. Сер. Контрольно-измерительная аппаратура. Вып. 8. — М.: ЦНИИ Электроника, 1971.— 29 с.

4.44. **Ajose S. O., Mathews N. A.** Equivalent Cirquits of coaxial-to-microstrip connector over the 8—12 GHz range. — Electronics Letters, 1977, v. 13, № 16, p. 465—466.

4.45. **Bahl J. J.** Coaxial — to — microstrip Launchers for Microwave Integrated Circuits. — J. Inst. Electron. and Telecommunications Eng., 1977, v. 23, № 8, p. 504—505.

4.46. **Суворов В. Н., Акифьев А. А.** Коаксиально-полосковый переход для интегральных схем СВЧ. — Вопросы радиоэлектроники, Сер. Радиоизмерительная техника, 1972, вып. 1, с. 49—53.

4.47. **Сыпчук П. П., Талалай А. М.** Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. — М.: Сов. радио, 1979, 168 с. — (Б-ка радиоконструктора).

4.48. **Пекелис М. А., Славинский О. К.** Оценка влияния случайных факторов на воспроизводимость микрополосковых линий. — В кн.: Современные методы разработки радиоэлектронной аппаратуры. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 145—151.

4.49. **Глудкин О. П., Обичкин О. Г., Блохин В. Г.** Статистические методы в технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1977.— 296 с.

4.50. **Семенов В. М., Царенков В. С., Ширяев Д. Д.** Статистический анализ СВЧ устройств с учетом их настройки.— В кн.: Проектирование и исследование радиоустройств.— Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 147—154.

4.51. **Дьюкс Дж. М.** Печатные схемы: Пер. с англ. / Под ред. Ю. М. Овчинникова и И. С. Файнберга. — М.: ИЛ, 1963. — 304 с.

4.52. **Burkett F. S.** Improved design for thin film inductors — Proc. of the 21-th Electronic Components Conference, Washington, 1971, p. 184—194.

4.53. **Maeda M.** Square Spiral Inductors for Microwave Integrated Circuits. — Trans. Inst. Electronics Communications. Japan, 1972, v. 55-B, № 3, p. 114.

4.54. **Сакала О., Лукаш В.** Изоляторы для СВЧ интегральных схем. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 5, с. 104—106.

4.55. **Черкин В. И., Пивоваров И. И., Клименков А. С.** Расчет пленочных СВЧ нагрузок.—Электронная техника. Сер. 11. Комплексная миниатюризация радиоэлектронных устройств и систем, 1976, вып. 1, с. 15—18.

4.56. **Аренков А. Б.** Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры.— Л.: Энергия, 1971. — 320 с.

4.57. **Белоус Ю. Т., Мунин П. И., Шитулин В. А., Шер Ю. А.** — Расчет параметров пленочных *LC*-элементов радиоэлектронных устройств. — Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства, 1977, вып. 2, с. 37—51.

4.58. **Гонский Н. Г., Клименков А. С., Пивоваров И. И.** Согласованная нагрузка для гибридных интегральных схем СВЧ диапазона. — Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства, 1980, вып. 3, с. 31—34.

5.1. **Сушкевич В. И.** Линейные волноводные системы. — М.: Сов. радио, 1967. — 295 с.

5.2. **Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р.** Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. М.: Связь, 1971. — 388 с.

5.3. **Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р.** Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях.— М.: Сов. радио, 1972, — 232 с.

5.4. **Силаев М. А., Брянцев С. Ф.** Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. — М.: Сов. радио, 1970.— 248 с.

5.5. См. [2.71].

5.6. См. [3.32].

5.7. См. [2.18].

5.8. **Никольский В. В.** Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. — М.: Наука, 1967. — 460 с.

5.9. **Коган Н. Л., Машковцев Б. М., Цибизов К. Н.** Сложные волноводные системы. — Ленинград: Судпромгиз, 1963. — 356 с.
5.10. **Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. — М.: Физматгиз, 1963. — 734 с.
5.11. **Тьюарсон Р.** Разреженные матрицы: Пер. с англ./Под ред. Х. И. Икрамова. — М.: Мир, 1977. — 192 с.
5.12. **Berry R. D.** An optimal ordering of electronic circuit equations for a sparse matrix solution. — IEEE Trans., 1971, v. CT-18, № 1, p. 40—50.
5.13. **Pooch U. W., Nieder A.** A. survey of indexing techniques for sparse matrices. — Computing Surveys, 1973, v. 5, № 2, p. 109—133.
5.14. **Bonfatti F., Monaco V. A., Tiberio P.** Microwave circuit analysis by sparse — matrix techniques. — IEEE Trans., 1974, v. MTT-22, № 3, p. 264—269.
5.15. **Tinney W. F., Walker J. W.** Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered trianqular factorication. — Proc. IEEE, 1967, v. 55, № 11, p. 1801—1809.
5.16. **Dembart B., Erisman A. M.** Hybrid sparse-matrix methods. — IEEE Trans., 1973, v. CT-20, № 11, p. 641—649.
5.17. **Bonfatti F., de Lotto I., Tiberio P.** Statistical analysis of ordering algorithms for sparse matrices. — Alta Frequenza, 1975, v. 64, № 5, p. 271—276.
5.18 **Hsiey H. J., Ghausi M. S.** A probabilistic approach to optimal pivoting and prediction of fill — in for random sparse matrices. — IEEE Trans., 1972, v. CT-19, № 4, p. 329—336.
5.19. **Черне Х. И.** Матрица рассеяния соединения $2n$-полюсников. — Труды научно-технической конференции ЛЭИС. Ленинград, 1964, вып. 3, с. 37—54.
5.20. **Заенцев В. В., Минкин М. А.** Расчет параметров рассеяния соединения произвольных СВЧ-многополюсников. — Радиотехника и электроника, 1975, т. 20, № 3, с. 655—657.
5.21. **Ширяев Д. Д.** Матрица рассеяния соединения двух СВЧ-многополюсников. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 120—128.
5.22. **Monaco V. A., Tiberio P.** Automatic scattering matrix computation of microwave circuits. — Alta Frequenza. 1970, v. 39, № 2, p. 59—64.
5.23. **Bodharamic B., Besser L., Newcomb R. W.** Two scattering matrix programs for active circuit analysis.— IEEE Trans. 1971, v. CT-18, № 6, p. 610—619.
5.24. **Ширяев Д. Д.** Программа анализа произвольного соединения СВЧ-многополюсников. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 129 — 146.
5.25. **Козлов В. И., Юфит Г. А.** Проектирование СВЧ устройств с помощью ЭВМ.— М.: Сов. радио, 1975. — 176 с.
5.26. **Воеводин В. В.** Численные методы алгебры. Теория и алгорифмы. — М.: Наука, 1966. — 248 с.
5.27. **Численные** методы условной оптимизации/Под ред. Ф. Гилла, У. Мюррея: Пер. с англ. / Под ред. А. А. Петрова. — М.: Мир, 1977. — 296 с.
5.28. **Заикин Б. М., Конин В. В., Платонова Ж. К.** Метод определения параметров рассеяния фазированных решеток. — Кибернетика и вычислительная техника, 1974, вып. 26. с. 53—58.
5.29. **Калахан Д.** Методы машинного расчета электронных схем.— Пер. с англ./Под ред. С. И. Сирвидаса.— М.: Мир, 1970, — 344 с.
5.30. **Director S., Rohrer R.** The generalized adjoint network and sensitivities. — IEEE Trans., 1969, v. CT-16, № 3, p. 330—336.
5.31. **Monaco V. A., Tiberio P.** On linear network scattering matrix sensitivity. — Alta Frequenza, 1970, v. 34, № 2, p. 87—88.
5.32. **Iuculiano C., Monaco V. A., Tiberio P.** Network sensitivities in terms of scattering parameters.— El. Letters., 1971, v. 7, № 2, p. 53—55.
5.33. **Либ Ю. Н., Царенков В. С.** О применении ЭВМ при разработке СВЧ устройств. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 6—11.
5.34. **Либ Ю. Н.** Синтез и оптимизация широкополосных распределенных трансформирующе-согласующих цепей с помощью ЭВМ. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, р. 23—36.
5.35. **Bandler J. W.** Optimization methods for computer-aided design — IEEE Trans., 1969, v. MTT-17, № 8, p. 533—545.
5.36. **Фиакко А., Мак-Кормик Г.** Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации: Пер. с англ.—М.: Мир, 1972.—238 с.

5.37. **Гехер К.** Теория чувствительности и допусков электронных цепей: Пер. с англ./Под ред. Ю. Л. Хотунцева. — М.: Сов. радио, 1973.— 197 с.

5.38. **Либ Ю. Н.** Об одном способе минимизации чувствительностей при параметрическом синтезе СВЧ устройств. —Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 188—190.

5.39. **Полляк Ю. Г.** Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. — М.: Сов. радио, 1971. — 312 с.

5.40. **Семенов В. М., Царенков В. С.** О моделировании на ЭВМ процента выхода годных СВЧ устройств при серийном производстве. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 155—159.

5.41. **Либ Ю. Н.** О поверхностях целевых функций в задачах параметрического синтеза СВЧ устройств. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32.

5.42. **Rosenbrock H. H.** Automatic method for finding the qreatest or least value of a function. — Computer J., 1960, v. 3, p. 175—185.

5.43. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование: Пер. англ./Под ред. М. Л. Быховского. — М.: Мир, 1975. — 534 с.

5.44. **Расстригин Л. А.** Системы экстремального управления. — М.: Наука, 1974. — 632 с.

5.45. **Уайлд Д. Дж.** Методы поиска экстремума: Пер. с англ./Под ред. А. А. Фельдбаума.— М.: Наука, 1967. — 267 с.

5.46. **Дафф И. С.** Обзор исследований по разреженным матрицам. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 4, с. 5—46.

5.47. **Карасев А. Ф., Кузнецов Н. И., Соколов А. Г.** Анализ линейных схем. — Зарубежная радиоэлектроника, 1979, № 5, с. 3 — 10.

5.48. **Семенов В. М., Царенков В. С.** Программа расчета и оптимизации параметров каскадного соединения четырехполюсников CASCAD. — Труды РТИ АН СССР, 1975, вып. 21, с. 12—22.

5.49. **Либ Ю. Н., Семенов В. М., Царенков В. С.** Исследование многоразрядных диодных фазовращателей СВЧ с помощью ЭВМ. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 160—182.

5.50. **Вольман В. И.** Матрица передачи разветвляющейся цепи. — Радиотехника, 1980, т. 35, № 5, с. 81—83.

6.1. **Федулова А. А., Котов Е. П., Явич Э. Р.** Многослойные печатные платы/ Под ред. Е. П. Котова, — М.: Сов. радио, 1977. — 247 с.

6.2. **Лаймен И.** Гибкие схемы — новое средство конструирования аппаратуры. — Электроника, 1977, т. 50, № 19, с. 24 — 36.

6.3. **Ройх И. Л., Колтунова Л. Н., Федосов С. Н.** Нанесение защитных покрытий в вакууме. — М.: Машиностроение, 1976. — 367 с.

6.4. **Martin W.** Polymer Thick film extends options for hybrid and P. C. fabrication. — Circuits Manufacturing, 1977, v. 17, p. 72—77.

6.5. **Основы** проектирования микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1977.—351 с.

6.6. **Обозрение** электронной техники. Реализация почти всего ВЧ приемника на одной кремниевой БИС. — Электроника, 1978, т. 51, № 16, с. 3—7.

6.7. **Барыбин А. А., Вендик И. Б., Вендик О. Г. и др.** Перспективы интегральной электроники СВЧ. — Микроэлектроника, 1979, т. 8, вып. 1, с. 3—19.

6.8. **Маркович М. И., Вологдин Э. Н.** Протонное облучение в технологии полупроводниковых приборов. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1978, вып. 5, 6, с. 136—151.

6.9. **Топфер М.,** Микроэлектроника толстых пленок: Пер. с англ./Под ред. Т. Д. Шермергора. — М.: Мир, 1973.—260 с.

6.10. **Moody B. O., Schreiber D., Neaver R.** Photosensitive thick film pastes. — Prosp. Techn. Programme Int. Microelectron and Electron Package and Prod. Conf. Brighton, 1973, p. 69—75.

6.11. **Крутко П. С., Шутилин В. Н.** Методы и оборудование для разделения полупроводниковых пластин и ситалловых подложек. — Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1973, вып.5, с. 24—28.

6.12. **Бочкин О. И., Евдокимов В. Д., Никифорова С. Н.** Исследование параметров лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин. — Электрон-

ная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1978, вып. 3, с. 21—28.

6.13. **Степовой В. А., Борисов К. А.** Высокоскоростное сверление отверстий в труднообрабатываемых материалах. — Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1975, вып. 3, с. 125—128.

6.14. **Антонова Л. Ф., Бахтин Ж. Д., Вернов В. М. и др.** Технологические приемы разработки тонкопленочных узлов СВЧ. — В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 4—13.

6.15. **Ронская Л. Ф., Бродянский Е. А., Скубриев В. Д.** Очистка поверхности полупроводниковых пластин в производстве интегральных схем. — Обзоры по электронной технике. Сер. микроэлектроника./ЦНИИ Электроника. — М., 1971, вып. 3. — 125 с.

6.16. **Брайнес А. С., Кадосова Л. И., Кандыба П. Е. и др.** Быстрый эффективный способ очистки ситалловых подложек. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1974, вып. 4, с. 73—76.

6.17. **Зимон А. Д.** Адгезия пленок и покрытий.— М.: Химия, 1977.—352 с.

6.18. **Технология** тонких пленок: Справочник в 2-х т/ Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; Пер. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко, — М.: Сов. радио, 1977, т. 1 — 664 с.; т. 2 — 768 с.

6.19. **Данилин Б. С.** Вакуумная техника в производстве интегральных схем/ Под ред. Р. А. Нилендера. — М.: Энергия, 1972. — 250 с.

6.20. **Ройх И. Л., Жаров В. А., Зайцева П. П. и др.** Влияние нагрева и обработки тлеющим разрядом ситалловых подложек на адгезию алюминия, осажденного в вакууме. — Электронная техника, Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1975, вып. 6, с. 35—40.

6.21. **Рахманин Н. М., Писаревский А. Н.** Методы изготовления резистивных слоев при повышенных требованиях к стабильности и точности. — Обзоры по электронной технике. Сер. Электронные и газоразрядные приборы /ЦНИИ Электроника. — М., 1974, вып. 10. — 35 с.

6.22. **Готра З. Ю., Мушкарден Э. М., Смеркло Л. М.** Технологические основы гибридных интегральных схем/ Под ред. З. Ю. Готры. — Львов: Вища школа, 1977. — 178 с.

6.23. **Данилин Б. С., Мотузенко В. П.** Получение пленок методом ионного покрытия. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 2, с. 37—55.

6.24. **Данилин Б. С.** Получение тонкопленочных слоев с помощью магнетронной системы ионного распыления. — Зарубежная радиоэлектроника, 1978, № 4, с. 87—105.

6.25. **Петракова А. Я.** Получение окисных пленок методом реактивного плазменного распыления. — Обзоры по электронной технике/ЦНИИ Электроника. — М., 1974, вып. 39. — 38 с.

6.26. **Корзо В. Ф., Курочкин В. А., Демин В. П.** Пленки из элементоорганических соединений в радиоэлектронике — М.: Энергия, 1973.— 193 с.

6.27. **Осаждение** из газовой фазы /Под ред. К. Пауэлла, Дж. Оксли, Дж. Блогера: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1970. — 471 с.

6.28. **Черняев В. Н.** Технология производства интегральных микросхем/ Под ред. А. А. Васенкова. — М.: Энергия, 1977.—375 с.

6.29. **Суйковская Н. В.** Химические методы получения тонких прозрачных пленок. — Ленинград: Химия, 1974.— 199 с.

6.30. **Абрамов А. А., Ковтонюк Н. Ф., Лебедев Е. Н. и др.** Методы получения и свойства пленок двуокиси титана. — Обзоры по электронной технике /ЦНИИ Электроника.— М., 1974, вып. 14.—55 с.

6.31. **Борисенко А. И., Николаева Л. В.** Тонкослойные стеклоэмалевые и стеклокерамические покрытия. — Ленинград: Наука, 1970.— 69 с.

6.32. **Китаев Г. А., Большакова Т. П., Пушкина Л. Н. и др.** Опыт металлизации органических диэлектриков с использованием пленок халькогенидов металлов. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1976, вып. 3, с. 72—78

6.33. **Шалкаускас М., Вашкялис А.** Химическая металлизация пластмасс. — Ленинград: Химия, 1977. — 169 с.

6.34. **Вишенков С. А.** Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. — М.: Машиностроение, 1975. — 312 с.

6.35. **Болтовский В. В., Вебер А. В., Фридман Е. С.** Химическое никелирование кремния с применением гидразина в качестве восстановителя. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1975, с. 119—122.

6.36. **Кобина Н. А., Мамонова Н. М., Антонова Л. Ф.** Защитные покрытия полосковых элементов в производстве СВЧ микросхем.— В кн.: Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 94—98.

6.37. **Ямпольский А. М.** Меднение и никелирование. Ленинград: Машиностроение, 1977.— 112 с. — (Биб-ка гальванотехника).

6.38. **Соколова Г. П., Чумакова Л. В., Чеботарева Л. М.** Процессы микроосаждения металлов при изготовлении балочных выводов. — Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1974, вып. 8, с. 105—110.

6.39. **Курносов А. И., Мозгалев В. А., Сибитева Е. В.** Гальванические покрытия золотом и сплавами элементов полупроводниковых приборов. — Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы/ЦНИИ Электроника.— М., 1974, вып. 1.—28 с.

6.40. **Закгейм Л. Н.** Электролитические конденсаторы — М.— Л: Госэнергоиздат, 1963. — 284 с.

6.41. **Семенкова Е. В., Хамаева Т. Е.** Применение анодооксидных пленок в технологии гибридных интегральных схем. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1976, вып. 5, с. 76—80.

6.42. **Фотолитография** и оптика/Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля.— М.: Сов. радио, 1974. — 392 с.

6.43. **Введение** в фотолитографию/Под ред. В. П. Лаврищева. — М.: Энергия, 1977. — 400 с.

6.44. **Малин Б. В.** Техника изготовления фотошаблонов — трафаретов для производства кремниевых интегральных схем. — Обзоры по электронной технике/ ЦНИИ Электроника. — М., 1972, вып. 4.—160 с.

6.45. **ПрессФ. П.** Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — Массовая библиотека радиоинженера. — М.: Сов. радио, 1978. — 95 с.

6.46. **Мамонова Н. М., Антонова Л. Ф., Кобина Н. А. и др.** Применение новых фоторезистов в изготовлении гибридных интегральных схем СВЧ. — В кн. Проектирование и исследование радиоэлементов. — Труды РТИ АН СССР, 1978, вып. 32, с. 110—119.

6.47. **Кривда Т. Н., Сомова Т. А., Залялиева Ф. В. и др.** Особенности технологии изготовления печатных плат с применением сухого пленочного фоторезиста. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронно-вычислительная техника, 1976, № 11, с. 21 — 27.

6.48. **Голышев В. И., Иванов В. И., Неустроев С. А. и др.** Плазмохимическое удаление фоторезиста. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1973, вып. 2, с. 88—92.

6.49. **Белов Н. И., Мозжухин Д. Д., Рубцов Н. Н.** Позитивный фоторезист ФП-617. — Электронная промышленность, 1975, № 8, с. 65, 66.

6.50. **Шервувене В. К., Янушонис С. С.** Изменение геометрии поверхности в процессе травления. — Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1976, вып. 3., с. 64—72.

6.51. **Максимов Л. И., Котова Н. В., Нанаева Н. М. и др.** Использование методов взрывной фотолитографии при изготовлении структур полупроводниковых приборов. — Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование, 1976, вып. 2, с. 16—20.

6.52. **Дикарев Ю. М., Сыноров Н. Ф., Толстых Б. Л.** Плазмохимическое травление в технологии ИС.— Зарубежная электронная техника/ЦНИИ Электроника. — М., 1978, № 2, 50 с., № 3, 52 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . . 3

Глава 1

**Материалы, используемые в технике полосковых устройств СВЧ**

1.1. Терминология и определения . . . . . 5
Электрические характеристики (5). Механические характеристики (5). Тепловые характеристики (8). Эксплуатационные характеристики (8).

1.2. Диэлектрики . . . . . 10
Органические диэлектрики (10). Неорганические диэлектрики (16).

1.3. Проводниковые, резистивные и диэлектрические пленочные материалы . . . . . 22
Проводниковые материалы (22). Резистивные материалы (25). Пленочные диэлектрики (28).

Глава 2

**Одиночные и связанные полосковые линии**

2.1. Терминология. Классификация волн . . . . . 30
Терминология и определения (30). Волны в полосковых линиях (32).

2.2. Однородная симметричная полосковая линия . . . . . 39
Волновое сопротивление (39). Структура электромагнитного поля (49). Потери (50). Предельная мощность (52). Волны высшего типа (57).

2.3. Несимметричная полосковая линия . . . . . 58
Волновое сопротивление (58). Дисперсия основной волны (66). Структура электромагнитного поля (68). Потери (71). Предельная мощность (72). Волны высшего типа (75).

2.4. Щелевая полосковая линия . . . . . 77

2.5. Копланарная полосковая линия . . . . . 81

2.6. Связанные полосковые линии . . . . . 84
Общие соотношения (84). Симметричная связанная полосковая линия ССПЛ1 (92). Симметричная связанная полосковая линия ССПЛ2 (96). Связанные микрополосковые линии (СМПЛ) (97). Микрополосковые линии, связанные через щель (102). Высокодобротная линия (103).

Глава 3

**Неоднородности и простейшие элементы полосковых линий**

3.1. Эффективная ширина полоски . . . . . 104

3.2. Неоднородности в симметричной полосковой линии . . . . . 107
Разомкнутый на конце отрезок (107). Поворот полоски (107). Скачок ширины полоски (111). Центральный индуктивный штырь (112). Отверстие в полоске (113). Т-сочленение (114). Y-сочленение (115). X-сочленение (119). Зазор в полоске (121).

3.3. Неоднородности в несимметричной полосковой линии . . . . . 122
Разомкнутая на конце полоска (122). Торцевой зазор между полосками (125). Поворот полоски в виде излома (126). Скачок ширины полоски (130). Центральный индуктивный штырь (130). Т-сочленение (135). Y-сочленение (139). X-сочленение (140).

3.4. Простейшие элементы микрополосковой линии . . . . . 140
Плоские прямоугольные резонаторы (140). Плоские круглые резонаторы (145). Плоские кольцевые резонаторы (148). Плоские эллиптические резонаторы (149). Объемный полосковый прямоугольный резонатор (152).

Глава 4

**Конструирование полосковых устройств**

4.1. Общие вопросы конструирования . . . . . 157
Требования, предъявляемые к полосковым устройствам. Конструктивные особенности полосковых узлов (157). Конструирование полоскового СВЧ узла (159). Сравнение различных технологических методов изготовления полосковых узлов (161).

4.2. Элементы конструкции полосковых узлов . . . . . 164
Выбор подложки полосковой платы (164). Полосковые проводники и контактные площадки (166). Пленочные элементы полосковых схем с сосредоточенными параметрами (174). Навесные компоненты (186).
4.3. Корпуса . . . . . 202
Общая характеристика корпусов (202). Основные типы корпусов (203).
4.4. Коаксиально-полосковые соединители (переходы). . . . . 207
4.5. Конструктивно-технологические погрешности при изготовлении полосковых плат . . . . . 214
Классификация конструктивно-технологических погрешностей и дефектов (214). Влияние конструктивно-технологических погрешностей на характеристики полосковых линий и узлов (216).

## Глава 5

## Элементы автоматизированного проектирования СВЧ полосковых устройств

5.1. Матричное описание СВЧ цепей . . . . . 218
*S*-матрица (218). *Z*, *Y* и *T*-матрицы (220).
5.2. Матрицы рассеяния базовых элементов . . . . . 222
5.3. Алгоритмы вычисления электрических характеристик многоэлементных СВЧ устройств . . . . . 227
Формирование исходной системы уравнений (227). Универсальные алгоритмы (231). Декомпозиционные алгоритмы (237). Декомпозиционные алгоритмы с группированием элементов (246). Чувствительность характеристик многоэлементных СВЧ устройств (247).
5.4. Параметрический синтез СВЧ устройств . . . . . 250
Этапы автоматизированного проектирования (250). Формулировка задачи параметрического синтеза (251). Анализ допусков и чувствительности характеристик (255).

## Глава 6

## Технология изготовления полосковых устройств

6.1. Терминология и определения . . . . . 259
6.2. Технология изготовления полосковых СВЧ плат на подложках из органических диэлектриков . . . . . 260
Субтрактивная технология (рис. 6.1, *а, б*) (262). Аддитивная технология (рис. 6.1, *в, г*) (263). Полуаддитивная технология (рис. 6.1, *д*) (263). Фотоаддитивная технология (рис. 6 1, *е*) (264).
6.3. Тонкопленочная технология изготовления микрополосковых СВЧ плат 264
6.4. Толстопленочная технология изготовления микрополосковых СВЧ плат . . . . . 268
6.5. Подготовительные технологические операции . . . . . 271
6.6. Изготовление пленок методом вакуумного испарения . . . . . 273
Испарение из резистивных испарителей — прямое термическое испарение (274). Испарение с косвенным нагревом (индукционное) (274). Электронная бомбардировка (274). Термический взрыв (вибродозирование) (275).
6.7. Изготовление пленок методами ионно-плазменного распыления 275
Катодное распыление в диодной системе (275). Ионно-плазменное распыление в триодной системе (276). Магнетронное распыление (277). Высокочастотное распыление (277). Реактивное распыление (277). Распыление с помощью автономного источника ионов — ионное распыление (278).
6.8. Осаждение пленок из газовой фазы . . . . . 278
Пиролиз (278). Транспортные реакции (279). Пирогидролиз (279).
6.9. Осаждение пленок из растворов . . . . . 280
Гидролиз (280) Получение пленок халькогенидов металлов (281). Осаждение металлических пленок методом химического восстановления (282). Иммерсионное и контактное осаждение металлов в растворах (284). Осаждение пленок органических полимеров (284).
6.10. Формирование пленок в растворе под действием электрического тока . . . . . 284
Электролитическое (гальваническое) осаждение металлов (284). Анодное окисление (анодирование) (286).
6.11. Фотолитография . . . . . 287
Фоторезисты (288). Нанесение фоторезистов на подложку (289). Сушка фотослоя (первая сушка) (292). Экспонирование фотослоя (293). Проявление фотослоя (294). Термообработка фотослоя (задубливание — вторая сушка) (295). Удаление фотослоя (295). Технологические особенности некоторых марок фоторезистов (296).
6.12. Травление . . . . . 297
Приложение . . . . . 300
Список литературы . . . . . 314