

Дж. М.
ДЬЮКС

ПЕЧАТНЫЕ СХЕМЫ

ДЖ. М. ДЬЮКС

ПЕЧАТНЫЕ

СХЕМЫ



PRINTED CIRCUITS

Their Design and Application

J. M. C. DUKES

M. A., D. I. C., A. M. I. E. E.

THE PLESSEY CO.

(FORMERLY WITH STANDARD
TELEPHONES & CABLES, LTD.)

Macdonald : London

Дж. М. ДЬЮКС

ПЕЧАТНЫЕ СХЕМЫ

ИХ КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

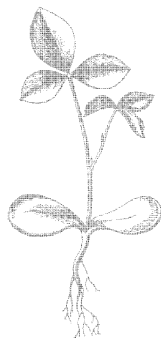
Перевод с английского

М. Г. КОСЕНКО,
М. И. КРОЛЛЬ,
Г. И. КУЗНЕЦОВОЙ

Под редакцией

Ю. М. ОВЧИННИКОВА
и И. С. ФАЙНБЕРГА

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1963



Scan AAW

Впервые публикуется на русском языке книга, содержащая подробное, систематизированное описание методов изготовления печатных схем с анализом их характеристик и пригодности для решения различных технических задач (от производства бытовых радиоприемников до сборки высокоскоростных счетно-решающих машин). Приводятся основы проектирования печатных схем, характеристики используемых материалов и оборудования. Описываются способы печати элементов электронных схем, таких, как конденсаторы, сопротивления, индуктивности и др., для работы в различных частотных диапазонах.

Особое внимание автор уделяет вопросам технико-экономической эффективности описываемых методов при ручных, конвейерных и полностью автоматизированных технологических процессах производства печатных схем.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся проектированием и изготовлением электронной аппаратуры с применением печатных схем.

Редакция литературы по вопросам техники

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Печатные схемы — продукт синтеза давно освоенных полиграфических методов печати с современной бурно развивающейся радиоэлектронной техникой на основе непрерывно создаваемых новых материалов и совершенствования технологии их изготовления.

Стимулирующим фактором развития этого нового вида техники является несовершенство и трудоемкость, низкая производительность и малая экономичность ручных операций при сборке, монтаже и наладке радиоэлектронных схем объемного типа. Анализ технологических процессов изготовления схем такого типа показал, что доля этих операций составляет до 60% при производстве широкоэмиттерной аппаратуры бытового назначения и от 30 до 80% для других специальных видов радиоаппаратуры. Объемный монтаж возник и внедрялся в практику предприятий тогда, когда возможная степень автоматизации не определяла рентабельности производства. Поиски путей автоматизации привели, в частности, к разработке схем плоскостного типа, практическое осуществление которых весьма рационально при использовании полиграфических методов печати. Однако это один из стимулов развития. Другим не менее важным фактором является тенденция в современном приборостроении к промышленному освоению малогабаритных полупроводниковых и других радиотехнических деталей, которое дает весьма эффективные результаты при создании сложных электронных устройств или крупносерийном производстве однотипных изделий.

Идеи создания печатных схем высказывались за рубежом еще задолго до второй мировой войны. Однако практическое осуществление этих идей стало возможным лишь после создания новых материалов и специально разработанной технологии с учетом радиотехнических требований к ним. Практически с 1944 г., когда впервые

в США при производстве радиовзрывателей зенитных снарядов и мин стали использовать печатный монтаж, эта новая техника стала внедряться в промышленность. В настоящее время печатные схемы находят широкое применение и в Советском Союзе.

Как следует из библиографии, приведенной в конце книги, за рубежом к настоящему времени издано большое количество монографий, посвященных проблемам проектирования, технологии изготовления и вопросам практического использования печатных схем. В отечественной литературе, кроме многочисленных статей или сборников, не издано ни одной монографии. Конечно, отсутствие в отечественной литературе монографий по печатным схемам нельзя компенсировать переводом зарубежной книги. Однако как один из первых этапов широкого освещения вопросов, связанных с технологией изготовления, основами проектирования и свойствами материалов, используемых при создании печатных схем, книга Дж. М. К. Дьюкса может принести большую пользу и способствовать популяризации новой техники.

Печатные работы, имеющиеся в отечественной литературе, за исключением переводных, в основном можно подразделить на работы обзорного характера, знакомящие читателя с новыми методами изготовления радиосхем, и работы, посвященные описанию конкретных разработок в этой области или опыта внедрения техники печатных схем в производство.

Так как автор не ссылается на эти литературные источники, отражающие состояние данного вопроса в СССР, нам кажется весьма целесообразным в предисловии указать на некоторые из них [1—8].

Наиболее полно технология печатного монтажа отражена в книге проф. Е. Н. Маслова [6], выпущенной Атомиздатом в 1961 г. Однако и в этих работах недостаточно представлен комплекс сведений, необходимых проектировщику при создании печатных схем.

В ряде брошюр далеко не полностью освещены возможности изготовления и конструирования печатных схем. Однако приведенные в них описания технологических процессов и фотографии узлов и блоков радио-

аппаратуры показывают, насколько широко и эффективно можно использовать этот новый вид техники в отечественной промышленности. И почти совершенно не освещен в литературе вопрос о целесообразности использования печатных схем в области сверхвысоких частот.

Специалистам, занимающимся разработкой технологии изготовления, конструированием и другими проблемами, связанными с печатными схемами, небезынтересно ознакомиться с такими полиграфическими процессами, как фотомеханические, изготовление печатных форм, а также с оборудованием, используемым в этих процессах. Для этой цели можно рекомендовать книги «Технология полиграфического производства» (книга вторая) под общей ред. Н. И. Синякова, изд-во «Искусство», 1952 г., и В. В. Попов «Общий курс полиграфии», изд-во «Искусство», 1952 г.

В данной книге автор пытался как можно более широко рассмотреть все аспекты проблемы. Однако из-за широты круга рассматриваемых вопросов в книге довольно небольшого объема не приводится исчерпывающих сведений по каждому отдельному вопросу и зачастую не вскрываются глубоко те или иные проблемы. Как это следует из предисловия автора, он не пытается решить эту непосильную задачу и дополняет краткое изложение обширной библиографией по каждому вопросу. Основное внимание автор уделяет материалам, представляющим интерес для инженеров, занимающихся проектированием печатных схем и оборудования, и лишь в общих чертах знакомит читателя со способами производства печатных схем.

После очень краткого исторического обзора и классификации способов изготовления печатных схем читатель может познакомиться с другими способами, которые имеют большое будущее, например микромодульная техника и др., и уже в ряде случаев конкурируют с излагаемыми в книге.

Не считая введения, в книге содержится девять глав, четыре из которых составляют первую часть книги («Производство»), остальные — вторую часть («Проектирование и применение»). Вторая часть по объему при-

мерно вдвое больше первой. Это, в частности, можно объяснить и тем, что если в первой части приведено сравнительно мало конкретного материала, то во второй части он занимает значительное место. Особенно это относится к описанию свойств новых синтетических материалов, используемых в качестве изоляционных оснований для печатных схем, сопровождающемуся многочисленными таблицами сравнительных данных и графиками, иллюстрирующими расчетные формулы.

Согласно приведенной во введении классификации, в первой части последовательно описываются различные способы изготовления печатных схем нанесением металла на поверхность оснований штамповкой, прессованием, напылением в вакууме или гальванизацией (гл. II); избирательным удалением металла с предварительно металлизированной поверхности (гл. III) с помощью механического гравирования, травления фольги и др., и, наконец, также способы, при которых проводники схемы и изоляционное основание изготавливаются одновременно (гл. IV). Замечание о широте охвата вопросов за счет некоторой поверхностности изложения относится в первую очередь именно к этим трем главам. Однако даже специалисту, хорошо знающему способы изготовления печатных схем, небезынтересно ознакомиться с кратким описанием, изложением преимуществ и недостатков примерно двух десятков способов.

Наибольший интерес с точки зрения автоматизации процесса производства и монтажа радиодеталей, вероятно, представляют введение и гл. V, посвященные краткому описанию некоторых автоматических сборочных машин и выявлению требований к печатным схемам.

Во второй части книги приводятся данные, необходимые для правильного проектирования печатных схем в зависимости от области применения.

Требования к оригиналам и способы их подготовки, начиная от обычного вычерчивания вручную и кончая использованием высокопроизводительных копировально-множительных машин, излагаются в гл. VI.

Большой конкретный материал приведен в гл. VII, полученный американскими и английскими исследовате-

лями или фирмами, характеризующий электрические свойства материалов, используемых в качестве изоляционных оснований и проводящих покрытий. Наряду со сведениями о керамических, ферритовых и других материалах для оснований приводятся описания способов получения и электрические свойства материалов из полиэтилена, полистирола, из фторуглеродных и других смол. Рассматривается также влияние на электрические свойства изоляторов в различных диапазонах частот изменений температуры, влажности, механической обработки, пайки, химического загрязнения и других факторов.

В гл. VIII рассматриваются вопросы проектирования и расчета печатных деталей (конденсаторов, индуктивностей, переключателей и др.), предназначенных для работы в области низких и средних частот, нашедших в отечественной литературе весьма ограниченное освещение. Здесь приводится ряд формул, представляющих практический интерес для радиоинженеров, занимающихся проектированием электронных схем.

Созданию полосковых линий передачи, во многих случаях заменяющих дорогостоящие волноводные системы, и возможности использования для этой цели техники печатных схем посвящена гл. IX. В последней, X главе рассмотрены проблемы применения печатных схем в электронной аппаратуре, предназначенной для работы в сверхвысокочастотном диапазоне.

Читателю, интересующемуся этими вопросами, уже, вероятно, знаком сборник статей «Печатные схемы сантиметрового диапазона» под ред. В. И. Сушкевича, Издательство иностранной литературы, 1956 г., в котором приведены доклады, прочитанные на симпозиуме в колледже Тафта (США) в 1955 г. Главы IX и X данной книги можно рассматривать как систематизированное изложение теории и вопросов применения полосковых линий передачи, в основном предназначенных для сантиметрового диапазона. Следует отметить, что в книге нашли отражение и некоторые более поздние работы в этой области.

В приложения к книге включены методика испытаний и технические условия на печатные схемы и мате-

риалы, а также перечень организаций, занимающихся их составлением, и некоторые наиболее ранние иностранные патенты на печатные схемы.

Книга может быть рекомендована как пособие для радиоинженеров и других специалистов, занимающихся вопросами проектирования, изготовления и эксплуатации печатных схем, а также для студентов радиофакультетов высших учебных заведений.

Ю. Овчинников, И. Файнберг

ЛИТЕРАТУРА

1. Бортновский Т. А., Печатные схемы в радиолюбительских конструкциях, Госэнергоиздат, 1959.
2. Гуторов В. А., Коробков Н. И., «Некоторые способы техники печатных схем и их применение в приборостроении», Информационный бюллетень № 3, ЦТБ, Судпромгиз, 1957.
3. Жуков В. А., Печатные схемы, Л., 1958.
4. Жуков В. А., Новые способы изготовления печатных схем, Л., 1959.
5. Ильин В. А., Бобров И. И., Технология изготовления плат с печатными схемами в серийном производстве, Л., 1959.
6. Маслов Е. Н., Технология печатного монтажа, Атомиздат, 1961.
7. Сивай А. В., Печатные радиосхемы, 1958.
8. Фролов А. И., Клочков Е. В., Фотомеханический способ изготовления печатных схем, Судпромгиз, 1959.

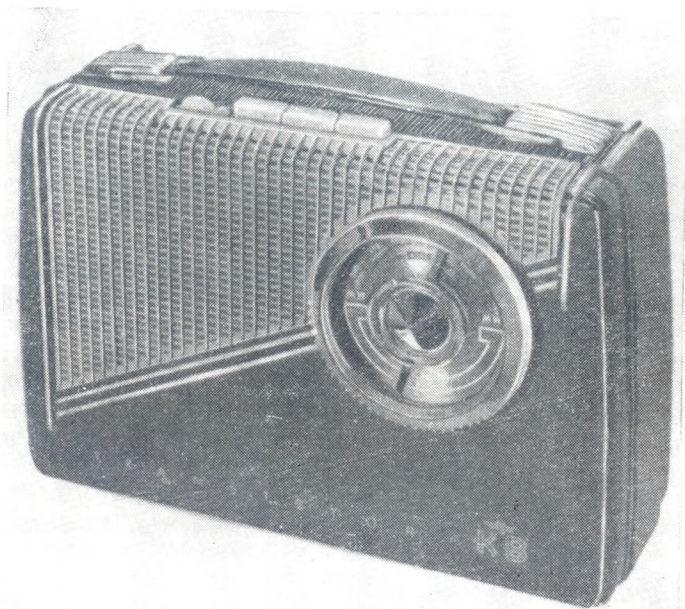
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Так называемая печатная схема является результатом многолетнего стремления механизировать процессы монтажа радиоэлектронного оборудования. Основные идеи были высказаны еще в 1923—1930 гг., но широкое применение печатных схем надолго задержалось, несмотря на стимул, который дала для развития этой отрасли вторая мировая война. Эту задержку можно объяснить тремя основными причинами. Во-первых, много усилий было затрачено на попытки «печатать» абсолютно все элементы печатной схемы (иногда несовместимые), включая и соединительную проводку, за одну операцию. Во-вторых, для получения приемлемого качества продукции потребовались значительные усовершенствования как в области материалов, так и технологии. И третьей, возможно наиболее важной причиной была неэкономичность процессов. В этой связи нужно заметить, что иногда неправильно представляют себе, что стоимость монтажа навесных элементов¹⁾ и соединений составляет лишь небольшую часть общей производственной стоимости.

Было испытано большое количество способов, из которых практическое значение имеют, по всей вероятности, лишь три или четыре. Некоторые способы были заимствованы из полиграфии, и в этих случаях схемы действительно печатаются. Способ травления фольги, который совсем незначительно отличается от обычного цинкографского способа изготовления печатных форм, ис-

¹⁾ В дальнейшем навесные элементы будем называть просто «элементы схемы». — *Прим. ред.*

пользуется для изготовления печатных схем наиболее широко, но имеются и другие способы, среди которых особенно известен способ электролитического осаждения. Кроме соединительной проводки, можно «печатать»



Батарейный переносный радиоприемник с шестью транзисторами, модель ОР.21 фирмы «Колстер — Брэндз» для диапазона длинных и средних волн.

Он оборудован антенной из ферритового стержня и весит всего 1,9 кг, включая батареи (внутренний вид приемника с панелью печатной схемы показан на фиг. 1.1).

и другие элементы схемы, электрические параметры которых определяются формой или количеством витков металлического проводника, например конденсаторы, катушки, высокочастотные трансформаторы, низкоомные сопротивления и элементы типа передающей линии

для сверхвысоких частот. К сожалению, диапазон электрических величин, получаемых при помощи этих элементов, очень невелик, что в значительной мере ограничивает их применение. Для преодоления этого было предпринято много попыток создать специальные типы сопротивлений, однако эти попытки не увенчались успехом. Несмотря на эти трудности, в настоящее время печатные схемы широко применяются в некоторых областях промышленности, особенно при производстве бытовых радиоприемников и высокоскоростных цифровых счетно-решающих машин.

Печатные схемы, а также механизированные способы монтажа проводки постепенно внедряются во все области промышленности. Значение, которое имеют новые способы, можно оценить, исходя из общего объема электронного оборудования, выпущенного в Великобритании в 1957 г., стоимостью 260 млн. ф. ст. Из этого общего объема по меньшей мере половину составляет оборудование, в котором могут быть применены эти новые способы.

В такой небольшой книге невозможно дать всесторонний исчерпывающий материал по печатным схемам. Основное усилие было направлено на отбор такого материала, который представляет интерес для инженеров, работающих в области проектирования схем и оборудования, а не для производственников. Поэтому описание производственных процессов дано в сокращенном виде. Однако автор надеется, что в книге все же достаточно материала для получения общего представления о способах производства печатных схем.

Печатные схемы и в основном возможности автоматизации производства представляют больший интерес для конструктора, чем обычные способы монтажа проводки и деталей. Инженер, которому предстоит практически организовать производство схем, должен быть знаком с особенностями и ограничениями производственного процесса и материалами, которые можно использовать. Он должен знать, какие способы монтажа элементов целесообразнее использовать на практике, а также шаг и толщину проводников и другие основные

дающие. Если изготавливаемое оборудование предназначено для работы в тяжелых условиях, инженер должен произвести особый подбор материалов и способов обработки, чтобы устранить или иметь возможность контролировать такие явления, как коррозия проводников, загрязнение изоляционного основания, миграция серебра и т. д., которым особенно подвержены печатные схемы.

Необходимость ознакомления со сведениями о печатных схемах кажется не столь обязательной для инженеров, проектирующих схемы, потому что в большинстве случаев они работают независимо от инженеров, создающих вспомогательное оборудование, и в результате их работы составляется лишь принципиальная схема. В большинстве случаев печатается только соединительная проводка, поэтому на первый взгляд кажется, что новые способы изготовления проводки не должны интересовать инженеров-проектировщиков. Однако из практики хорошо известно, что если имеются два усилителя, которые на схемах изображаются идентично и отличаются лишь расположением элементов, то они могут быть изготовлены разными способами. Инженер-проектировщик должен изучать электрические свойства печатной проводки и тем внимательнее, чем с более высокой частотой ему приходится иметь дело.

В определенной области частот более экономичным становится печатный способ изготовления некоторых элементов, например катушек и конденсаторов. Определение целесообразности того или иного способа выполнения этих элементов является скорее делом лаборатории, проектирующей схемы, а не инженера, выполняющего рабочий проект оборудования. При использовании сверхвысоких частот инженер-проектировщик должен дать спецификацию на каждый участок схемы проводников, на качество и толщину изоляционного основания и на основные размеры всей вспомогательной арматуры. В таких случаях инженер-машиностроитель играет несколько второстепенную роль. Автор пытался изложить в книге все основные сведения о конструкциях для всех частот от 0 до 10 000 Мгц. Естественно, что при этом

пришлось собрать имеющуюся информацию и выбрать из нее соответствующие сведения, что до некоторой степени является, конечно, субъективным подходом. Автор попытался уделить внимание каждому способу в соответствии с его важностью, широтой его распространения, его связью с излагаемой темой, а также со степенью полноты доступной информации о нем. Поэтому в книге много места занимает изложение основных электрических данных, так как они всегда представляют интерес, но беспорядочно разбросаны по разным изданиям. И наоборот, относительно мало освещена конструкция микроволновых элементов, о которых можно написать целую книгу. Эти элементы имеют незначительное применение; обычно они изготавливаются по специальным требованиям, и поэтому большинство требований не является характерным для плоскостных схем, хотя обязательно для всех микроволновых систем. Мало приведено сведений и об испытаниях материалов; это — специальный вопрос и более полную информацию о нем можно найти в спецификациях Британского института стандартов или других подобных организаций. В приложении упоминается об этих спецификациях и кратко излагается их содержание.

Данная книга была подготовлена автором, когда он был сотрудником фирмы «Стандарт телефонз энд кейблз», изготавливающей в широком ассортименте оборудование дальней связи и внимательно следившей за развитием производственных способов. Здесь в соответствии со спецификой отдельных видов продукции и с учетом условий работы для них выбирались наиболее подходящие способы изготовления. Так, например, в некоторых случаях применялись обычные печатные схемы (с вариациями), в других — механизированный способ проводки, например использование ленточной проводки и способа соединения концов не пайкой, а намоткой проводников.

Получение информации по таким разнообразным способам позволило, как считает автор, дать более объективную оценку этим способам без выделения одного способа в ущерб другим. Автор выражает благодар-

ность всем, кто предоставил ему информацию или помогал в редактировании текста.

Возможно, что некоторые читатели найдут стиль изложения очень кратким, без элементарных пояснительных описаний. Этим читателям автор приносит свои извинения. Целью автора было создание компактной книги для инженеров-профессионалов, имеющих уже опыт работы в промышленности.

Дж. М. Дьюкс

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ПЕЧАТНАЯ СХЕМА»

В данной книге термин «печатная схема» употребляется для обозначения разновидности электрической проводки, в которой проводники представляют собой плоские металлические полоски, прикрепленные к гибкой или жесткой изоляционной поверхности. При этом процесс воспроизведения каждой печатной схемы должен обеспечивать идентичность ее по отношению к оригиналу в пределах производственных допусков. Внешний вид такого типа проводки, а также способ ее воспроизведения дают достаточно оснований для употребления термина «печатная схема», но в большинстве случаев единственной аналогией является лишь внешнее сходство.

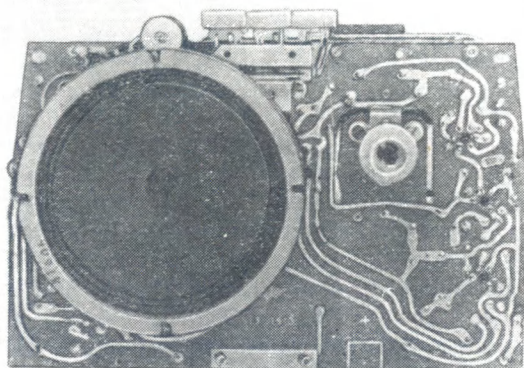
Действительно, существует несколько способов изготовления электросхем путем печатания проводников схемы электропроводной краской, но в настоящее время они не имеют широкого применения. Кроме того, при изготовлении электрических схем подобного типа часто используют способы, применяемые в полиграфии в качестве промежуточных или подготовительных операций, не включающих сам процесс печати. Так, например, при изготовлении печатных схем применяется способ травления фольги, который, однако, не имеет почти ничего общего с печатью. Употребление слова «схема» также не очень удачно, так как в большинстве случаев имеется в виду всего лишь соединительная проводка. Поэтому многие инженеры предпочитают употреблять термин «печатная проводка», за исключением, конечно, тех редких случаев, когда элементы схемы действительно напечатаны.

2 ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

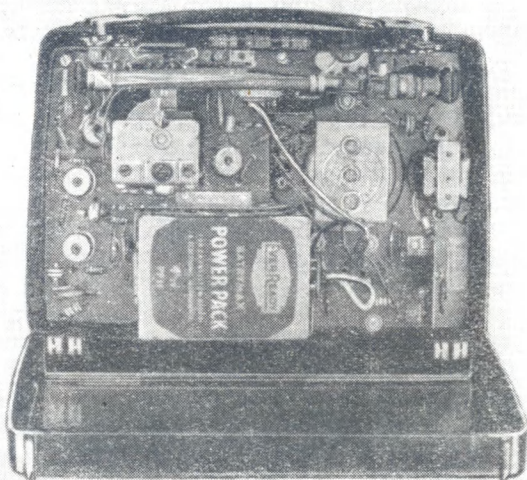
Искусство печати имеет очень древнее и, следовательно, несколько неясное происхождение. Самые ранние и достоверные сведения о применении печати пришли из Китая. Известно, что деревянные формы применялись в Китае уже в VII в., а самая первая книга датируется 11 мая 868 г. Но китайский способ печати из-за большого количества знаков в китайском алфавите не получил широкого распространения. В Китае была изобретена и бумага.

Трафаретную (шелкотрафаретную) печать изобрели японцы, которые научились делать сложные трафареты путем приклеивания вырезанного рисунка к волосистой сетке.

Способ печати с деревянных форм постепенно стал распространяться в странах, через которые проходил караванный путь из Китая, и в XV в. или ранее, несомненно, был известен в Западной Европе. Примерно в 1440 г. Иоганн Геннсфляйш Гутенберг, ювелир из Майнца, изобрел тот самый способ печати, который впоследствии был принят повсеместно. Гутенберг ввел несколько таких новшеств, которые дали основание историкам называть его «изобретателем печати» и которые в силу лучших традиций изобретателей разорили его. Основным его изобретением являлось введение подвижных литер, представлявших собой отлитые точные копии отдельных знаков, и введение новой печатной краски, которая обладала способностью смачивать металлические литеры и по своему химическому составу отличалась от краски, применявшейся при печатании с деревянных форм. В течение последующих 350 лет в области печати не произошло никаких существенных изменений. Благодаря промышленной революции вновь повысился интерес к печати и многие изобретения XIX в. относились, в частности, и к полиграфии — например механизация бумагоделательного производства, изобретение ротационной печатной машины и машин для механизированного набора. Однако эти изобретения не способствовали развитию печатных схем. И только разработка



а



б

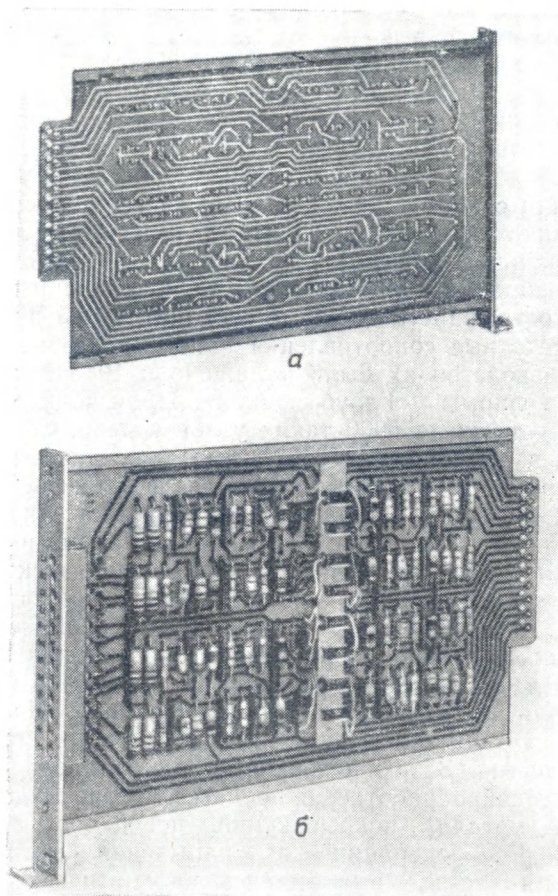
Фиг. 1.1. Внешний вид переносного радиоприемника фирмы «Колстер — Брэндз», модель ОР.21, с шестью кристаллическими триодами.

а — вид со стороны печатной схемы (панель изготовлена способом травления фольги; кислотоупорный слой нанесен способом трафаретной печати); б — вид панели со стороны элементов (более мелкие элементы монтировались на автоматической сборочной машине «Динасерт»).

способов воспроизведения иллюстраций, а не текста, и возникновение примерно в 1860 г. фотоцинкографии позволили создать ту основную технологию, которая используется в настоящее время для изготовления печатных схем способом травления фольги. Первое практическое применение способа трафаретной печати относится ко времени перед началом первой мировой войны. Сначала этот способ применялся главным образом для изготовления вывесок, при этом трафареты вырезали из бумаги и прикрепляли их к сетке. Впоследствии этот способ печати был значительно усовершенствован как в отношении самой сетки, так и способов переноса трафарета на сетку. С тех пор этот способ приобрел большое значение и в настоящее время завоевал право называться одним из способов печати. Трафаретная печать широко используется при изготовлении вывесок и реклам, а также для печати на текстиле, стекле и других материалах.

«Печатные схемы», как мы их понимаем в настоящее время, имеют гораздо более раннее происхождение, чем обычно полагают. Так, в английском патенте, выданном в 1903 г. на имя Хенсона, описывается ленточная проводка и утверждается, что электропроводники можно получать способом электролитического осаждения или механическим способом, а также путем нанесения линий из металлического порошка в подходящей среде на слой изоляционного материала. За период с 1923 по 1939 г. было выдано много патентов на различные способы получения электросхем на изоляционном основании (см. Приложение 2). К этим способам относятся: штамповка металлической фольги, заливка металла с низкой температурой плавления в пазы изоляционного основания, нанесение металла распылением, отливка в формы, осаждение электролитическим способом и химическое травление металлической фольги. Наиболее интересным применением печатных схем в эти годы было создание электрически нагреваемых стекол в очках. Способами травления фольги в 1940 г. занимался П. Эйслер, работавший для английской фирмы «Гендерсон энд Споулдинг». Несмотря на то что

было выдано большое количество патентов, практическое применение эти способы нашли только после второй мировой войны. В этот период Национальное бюро стандартов США с помощью некоторых индустриальных концернов провело интенсивное исследование способов изготовления печатных схем. Эта работа, финансируемая Управлением артиллерийско-технического снабжения сухопутных войск США, завершилась созданием миниатюрного бесконтактного взрывателя для снарядов окопных минометов. Схемы взрывателей печатались серебром на керамическом основании при помощи сетчатого трафарета и, кроме соединительной проводки, имели печатные сопротивления и конденсаторы. Массовое производство их было налажено в 1945 г. на двух заводах фирмы «Глоуб юнион». Производительность при этом достигла 5000 таких узлов в день. Сообщение об этом изобретении в 1946 г. вызвало огромный интерес американских промышленников, и в течение последующих лет было опубликовано много материалов по этому вопросу. Приблизительно в то же время в Англии Дж. Саргров сообщил о способе изготовления электросхем [1], с помощью которого можно получать полностью собранные пластмассовые панели для радиоприемников за 20 сек. В каждой панели имеются пазы для проводников и катушек и углубления различных форм и размеров для сопротивлений и конденсаторов. На такую панель способом напыления наносятся металл и защитное покрытие. Затем поверхность панели подвергается механической обработке, в процессе которой удаляется лишний металл, покрывающий поверхность между пазами. Все операции — от напыления металла до испытания схемы — выполнялись автоматически в машине. Создание экспериментальной модели машины-автомата было настоящим прогрессом. К тому же на этой модели было действительно изготовлено большое количество схем для радиоприемников. Однако этот способ не оправдал себя с экономической точки зрения и, кроме того, имел несколько серьезных технических недостатков. С 1947 г. американцы заинтересовались способом травления фольги. Однако практическое применение



Ф и г. 1.2. Триггерная панель для электронной системы телефонного коммутирования.

Четыре триггерных устройства могут испытываться отдельно при помощи предусмотренных на передней стороне панели контрольных точек (а). Печатная схема и номера элементов напечатаны черной краской на оборотной стороне панели для облегчения сборки и ухода (б).

ние этот способ нашел только после разработки удовлетворительной производственной технологии скрепления больших участков тонкой медной фольги с основанием из бумаги, пропитанной синтетической смолой. С тех пор применение способа травления фольги непрерывно и стремительно возрастало, и в настоящее время он является одним из основных способов изготовления печатных схем. При изготовлении небольших по размеру узлов применяется способ вжигания серебра в керамические основания. За последние годы возрос интерес также и к некоторым другим способам, особенно к способу электролитического осаждения и некоторым механизированным способам монтажа. Было бы неразумно пытаться предсказать возможный исход этой конкуренции. Самое большее, что можно сказать, это то, что в конце концов останутся несколько способов, которые будут применять в зависимости от специфики изготавливаемой продукции.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ СХЕМ

Способы изготовления печатных схем можно классифицировать по различным принципам. Но так как ряд процессов является результатом сочетания других, то ни одна система классификации не может быть полностью удовлетворительной. В данной книге выделяется три категории процессов:

1) способы непосредственного нанесения металлического рисунка схемы на чистую поверхность изоляционного основания (гл. II);

2) способы выборочного удаления металла с предварительно металлизированной поверхности (гл. III);

3) способы совместного изготовления печатной схемы и изоляционного основания (гл. IV).

В гл. II приводится описание таких способов, как штамповка фольги, окрашивание серебряной краской, напыление в вакууме и электролитическое осаждение.

Глава III почти полностью посвящена способам травления фольги. Используется также механическое гра-

вирование, но в очень ограниченном масштабе, поэтому здесь приводится лишь краткое описание этого способа.

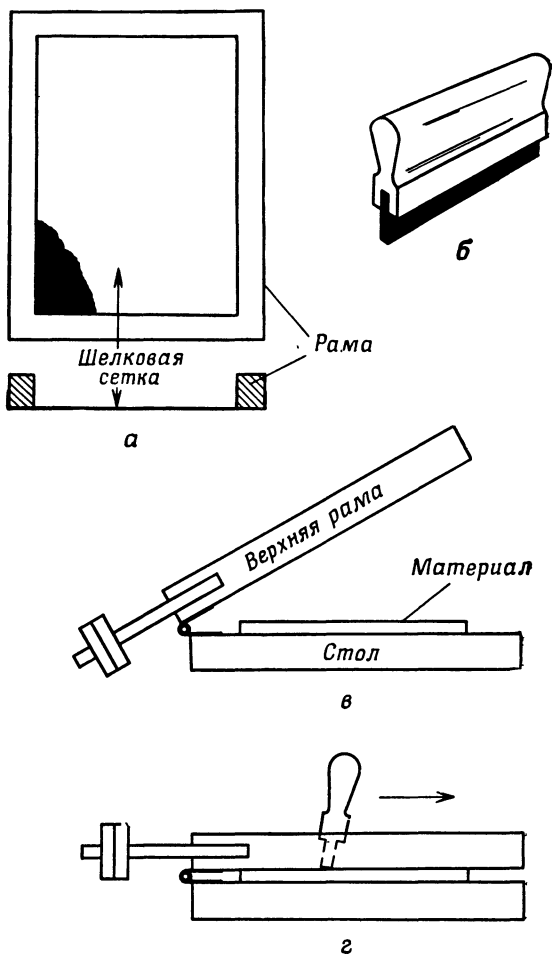
В гл. IV излагается несколько различных способов, в том числе и способ Дж. Саргрова, упомянутый выше. Одним из интересных является способ нанесения серебряной краской (через трафарет) рисунка печатной схемы на один или несколько листов органди, которые затем складывают в одну стопу с прокладками из бумаги, пропитанной смолой, и подвергают горячему прессованию и вулканизации, в результате чего образуется жесткая однородная панель. При такой системе слои проводников могут находиться как внутри панели, так и на ее поверхности. Ни один из способов, описанных в гл. IV, не имеет широкого применения, но для более полного освещения вопроса приводится их краткое описание.

В книге небольшого объема, конечно, невозможно рассказать о всех предложенных способах и их вариантах. Поэтому были отобраны только наиболее характерные способы, которые имели когда-либо применение.

4. СПОСОБ ТРАФАРЕТНОЙ ПЕЧАТИ

Трафаретная печать находит широкое применение при различных способах изготовления печатных схем. Поэтому целесообразно привести описание технологии печати в данной главе, чтобы не повторяться в каждой последующей. Обычно трафаретная печать используется для нанесения схемы на изоляционное основание электропроводной или кислотопорной краской. Другие способы, например печать с деревянной формы или офсетная печать, при испытаниях показали худшие результаты. Преимущество трафаретной печати заключается в основном в возможности наносить слой краски требуемой толщины.

Станок, на котором производится печать трафаретным способом, состоит из деревянной рамы с натянутой на нее сеткой из специального шелка (фиг. 1.3) и стола. На поверхность этой сетки фотомеханическим или каким-либо другим способом наносят изображение



Фиг. 1.3. Способ трафаретной печати.

а — деревянная рама с натянутой сеткой из специального шелка, к которой прикрепляется трафарет; б — резиновый ракель, используемый для выдавливания краски через сетку; в — внутренняя рама с трафаретом, закрепленная во внешней раме, шарнирно прикрепленной к основанию станка; перед опусканием рамы на нижней край сетки наливают краску; г — станок в рабочем положении. Печатник, перемещая ракель в указанном стрелкой направлении, выдавливает краску через незакрытые трафаретом участки сетки на материал.

схемы. После этого шелковый трафарет с нанесенным на него рисунком закрепляют в раме, которая в свою очередь шарнирно прикрепляется к одной стороне плоского стола. Материал, на котором должна быть отпечатана схема, укладывают на столе в требуемом положении при помощи направляющих. Раму с сеткой опускают до соприкосновения с материалом. Краска выливается в одном углу трафарета и затем распределяется по всей сетке и выдавливается через незакрытые участки сетки на материал при помощи резинового ракля. Затем раму с трафаретом поднимают и оттиск вынимают из стакана. Этот процесс повторяется столько раз, сколько требуется для изготовления данной партии схем, после чего трафарет вынимают из рамы станка и очищают от краски.

Для сеток обычно используют шелковую ткань фирмы «Миллерз», которая имеется в продаже в большом ассортименте (до 80 *лин/см*). Этот материал прочен, износоустойчив и не спускает петель при разрыве или разрезке. В большинстве случаев при изготовлении печатных схем он обеспечивает вполне удовлетворительные результаты, однако при печатании больших тиражей в связи с возможным значительным износом предпочитают использовать металлические сетки, обычно из фосфористой бронзы или нержавеющей стали. Преимущества металлических сеток заключаются в большей износоустойчивости, лучшем сохранении размеров изображения, большей устойчивости к нагреву и воздействию различных растворов и относительной легкости подготовки для повторного использования.

Существуют два способа изготовления трафаретов — фотомеханический и ручной. Для изготовления трафаретов вручную используется бумага. Фирма «Селектазин силк скринз» поставляет вошеную бумагу «Профилм», покрытую шеллаком. Эта бумага достаточно прозрачная и позволяет легко рассмотреть через нее очертания черно-белого оригинала. Для вырезания трафарета бумагу помещают вошеной стороной вниз и по стороне, покрытой шеллаком, легко вырезают специальным ножом контуры рисунка. Затем трафарет стороной,

покрытой шеллаком, укладывают на шелковую сетку с обратной стороны рамы, а по лицевой стороне сетки аккуратно проглаживают обычным электрическим утюгом. После этого вощеную бумагу снимают, а на сетке остается слой шеллака. Трафареты, изготовленные вручную, используются на практике довольно редко, обычно в случаях, когда рисунок схемы очень прост (например, при изготовлении узла сверхвысоких частот).

Существует несколько способов изготовления печатных форм для трафаретной печати фотомеханическим путем. Так, например, сетку делают светочувствительной, пропитывая ее раствором желатины, альбумина или клея с добавлением солей, например двуххромовокислого калия. Участки, подвергшиеся действию света, задерживаются, а неэкспонированные участки легко смываются горячей водой. Таким образом на трафарете образуются участки, через которые проходит краска. Другой способ заключается в том, что сначала изготавливают трафарет на временной подложке, а затем переносят его на сетку. Этот способ обеспечивает получение более четкого изображения проводников; при изготовлении трафарета непосредственно на сетке на рисунке схемы отражается фактура сетки.

Формы на металлических сетках изготавливают такими же способами. Правда, фирма «Ротшильд энд санз» разработала специальный способ применительно к выпускаемым фирмой металлическим сеткам типа «Дюрамет». Этот способ заключается в том, что на пластину из нержавеющей стали наносят фотографическую эмульсию, затем пластину экспонируют, проявляют и промывают. На незащищенные участки пластины электролитическим способом осаждают медь, а затем покрывают сплавом олова и свинца. После этого на пластину накладывают сетку из фосфористой бронзы, также предварительно покрытую сплавом олова и свинца, и весь комплект помещают в нагретый пресс. Здесь медный трафарет пристаёт к сетке, а стальная пластина отделяется. После очистки такой трафарет вновь покрывается оловом. Этот способ обеспечивает получение высокопрочной формы, но сомнительно, что он найдет широ-

кое применение из-за высокой стоимости изготовления.

Качество трафаретной печати во многом зависит также и от квалификации печатника. Кроме того, перед печатью требуется тщательное проведение некоторых подготовительных операций, например приготовления краски нужной консистенции и др.¹⁾.

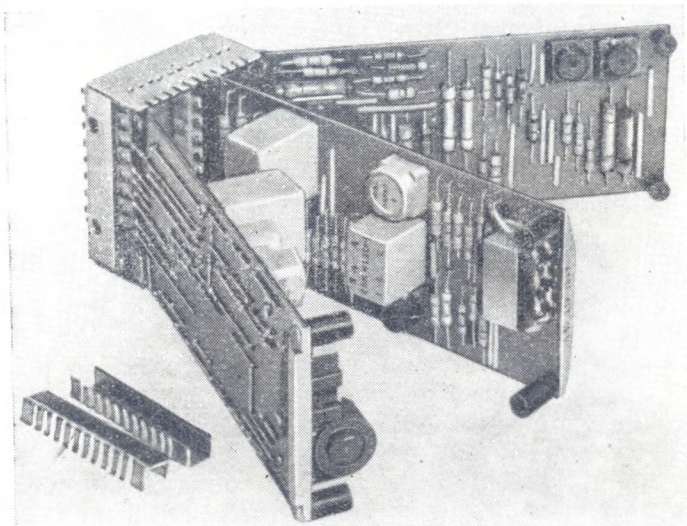
5. ДРУГИЕ СПОСОБЫ МОНТАЖА

Определение понятия «печатная схема», приведенное выше, включает только те способы, которые дают возможность получать схемы из плоских проводников, прочно прикрепленных к изоляционному основанию. Но существуют способы, заключающиеся в механическом соединении контактных выводов элементов схем при помощи свободных кусков провода или металлических лент. С целью упрощения процесса обычно используют плоскостной тип монтажа, так что по внешнему виду собранная панель похожа на обычную печатную схему. На фиг. 1.4 показана панель с так называемой ленточной проводкой. Для этой проводки используется специальная штампованная металлическая лента с загнутыми концами, которыми она крепится в отверстиях изоляционного основания. После установки элементов схемы, контактные выводы которых загибаются поверх лент, панель подвергается пайке в ванне. Этот способ имеет следующие преимущества: имеется возможность применения изоляционного основания любого типа; устраняется возможность химического загрязнения; на основе этого способа легко создать поточную монтажную линию с последовательной установкой элементов; в случае применения программного управления от перфорированной карты этот способ вполне экономичен при изготовлении небольших партий продукции. И, наконец, ограничив монтаж определенным модулем, можно подго-

¹⁾ Более подробно об этом способе см. Middleton H. K., Practical Silk Screening, Lnd., 1947; Biegeleisen J. I., Busenbark E. J., The Silk Screen Printing Process, N. Y., 1941.

товить информацию об изготовляемой схеме в виде таблиц, что в значительной степени сокращает дорогостоящую операцию по изготовлению очень точного эталонного чертежа схемы.

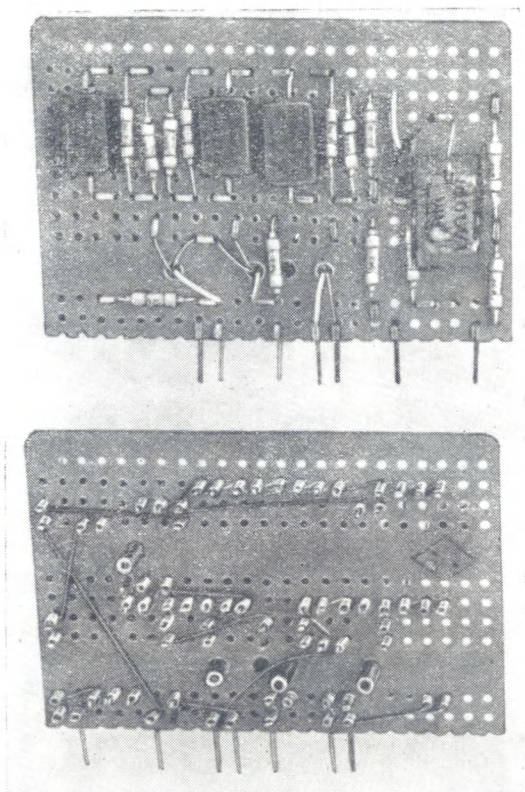
Другой, довольно успешно применяющийся способ соединения проводки с элементами схемы путем скручивания проводов показан на фиг. 1.5. На фиг. 1.6 показаны две разновидности этого способа. «Первичным



Фиг. 1.4. Типовой блок передатчика с ленточной проводкой.

скручиванием» называют способ, при котором контактный вывод элемента схемы наматывается на соединительный штифт. Однако этот способ требует до некоторой степени стандартизации конструкции элементов схемы, которая пока еще не полностью разработана. Способ «вторичного скручивания» показан на фиг. 1.5. Конец навесного элемента помещается рядом с соединительным штифтом, и соединительный провод наматывается на эту пару, скрепляя ее. Для изготовления

схем этим способом требуются изогнутые по определенной форме соединительные штифты, инструмент для

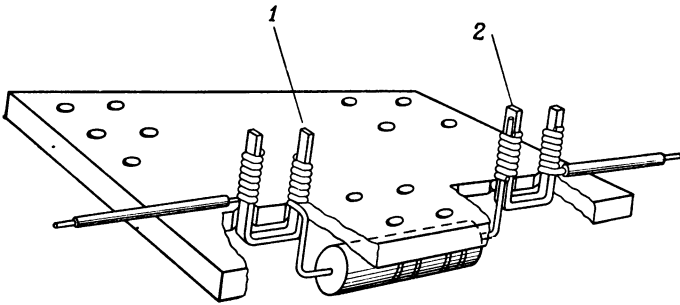


Фиг. 1.5. Малогабаритная транзисторная схема, применяемая в электронной системе коммутирования.

Все соединения выполнены без применения пайки, способом вторичного скручивания проводов (см. также фиг. 1.6).

зачистки концов провода на заданную длину и специальный инструмент для намотки, который приводится в действие вручную или от механического привода. Этот способ не только быстрее способа ручной пайки, но так-

же обеспечивает более прочное соединение. Так, на оборудовании, недавно установленном в Англии фирмой «Стандард телефонз энд кейблз», способом вторичной намотки было выполнено свыше миллиона соединений, при этом ни в процессе изготовления схем, ни впоследствии брака не наблюдалось. Брак при соединении пайкой в условиях тщательного контроля составляет один случай на 30 000 соединений. На больших цифровых



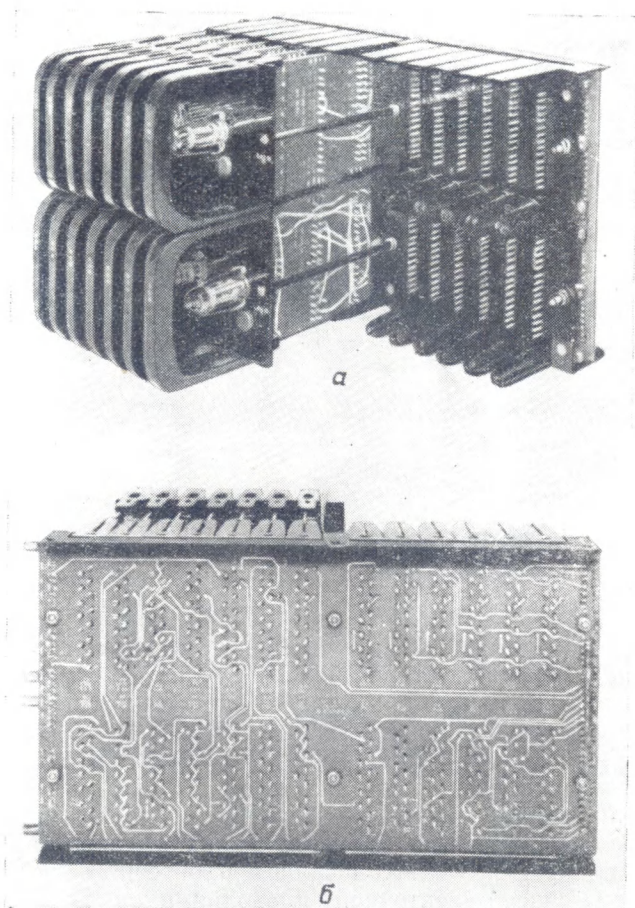
Фиг. 1.6. Соединения без пайки, скручиванием проводов.

1—первичное скручивание, 2—вторичное скручивание.

счетно-решающих устройствах, о которых упоминалось выше, этот процент брака настолько велик, что создает серьезные затруднения.

В блоке, показанном на фиг. 1.5, проводка была выполнена вручную при помощи инструмента для намотки с механическим приводом. В будущем предполагается механизировать весь процесс. Машина, сконструированная для этой цели, описана в работе [59].

Если способ ленточной проводки в какой-то мере конкурирует со способом печати проводки, то способ скручивания проводки может быть использован совместно с последним. Пример такого совместного использования показан на фиг. 1.7. Отдельные сменные модули со скрученными проводами соединены между собой в группы по 28 шт. на панелях с печатными схемами. Эти панели в свою очередь соединены скрученными прово-



Ф и г. 1.7. Стойка счетно-решающего устройства.

а — вид спереди с ламповыми панелями и установленными блоками. В блоках применено соединение скручиванием; *б* — вид сзади. Видна панель с печатной схемой, выполненной способом травления фольги, и проходящие через отверстия основания соединительные штифты.

дами между собой. На панели печатной схемы видны соединительные штифты, выведенные в отверстия с задней стороны панели.

6. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

Как уже говорилось выше, первые создатели печатных схем полагали, что в конечном счете будет создана машина, в которую с одной стороны будут загружать материал, а с другой — получать полностью готовое электронное оборудование. Это, несомненно, является преувеличением, и в настоящее время печатную проводку рассматривают скорее как важное вспомогательное средство к автоматической линии для монтажа обычных (электрических) элементов. Сведение задачи к плоскостному монтажу значительно упрощает требования к конструкции машин, предназначенных для установки элементов и пайки контактов.

Экономический эффект использования техники печатных схем зависит от того, в какой степени она влияет на другие производственные операции. Так, например, способ изготовления печатных схем электролитическим осаждением металла не имеет почти никаких преимуществ по сравнению со способом травления фольги. Но благодаря тому, что он обеспечивает получение металлизированных сквозных отверстий без дополнительных затрат, он облегчает операцию пайки и способствует получению более прочных соединений с лучшими электрическими свойствами.

Важным фактором при создании механизированной поточной линии является скорость, с которой может быть выполнена каждая производственная операция. Идеальная поточная линия состоит из некоторого числа монтажных или обрабатывающих станций, соединенных между собой конвейером. На каждой станции продукция снимается с конвейера, обрабатывается и вновь поступает на конвейер. Существуют системы, в которых конвейер перемещается с выстоем и обработка продукции происходит без съема с конвейера. Так как опера-

ции выполняются последовательно, время выстоя на каждой станции должно быть одинаковым. В этом случае производительность поточной линии определяется операцией с наибольшим временем обработки. Поэтому необходимо провести сравнение продолжительности различных операций по изготовлению печатной схемы с продолжительностью таких операций, как пробивание отверстий, установка элементов и пайка в ванне. Если при этом выявится большая разница, то это означает, что операции с наименьшим временем обработки не могут быть использованы с должным эффектом. Такое положение не исключает возможности автоматизации, но требует отказа от идеи создания полностью автоматической линии; в таком случае все операции технологического процесса разбиваются на отдельные группы и создаются межгрупповые заделы.

В качестве примера может служить предполагаемая схема поточной линии, показанная на стр. 35. Наиболее короткие по времени операции в этой линии — вырубка, пробивание отверстий и установка элементов, причем ограничением скорости здесь служит скорее инерционность конвейера, чем сам процесс обработки. Производительность этого участка поточной линии составляет 10—20 изделий в 1 мин, что соответствует времени выстоя и транспортировки, равному $3 \div 6$ сек. А время промывки основания после травления может занять до 30 мин, в особенности если требуется особая гарантия в отношении химической чистоты основания. Понятно, что всю операцию промывки можно разбить на отдельные операции, производимые на нескольких станциях. В этом случае ограничивающей становится операция травления, продолжающаяся обычно $5 \div 8$ мин. Эту проблему можно решить путем одновременного печатания одинаковых схем (например, 10—20 копий) на большом листе материала, покрытого слоем меди. Это приведет к созданию задела перед операцией вырубки по формату или после нее и к делению поточной линии на два параллельных участка, работающих с разной производительностью. При определенных благоприятных условиях можно достигнуть относительного

**Схема автоматической поточной линии, в которой
используется фотомеханический способ травления
и многостанционный монтаж элементов**

1. Обрезка слоистого материала до
необходимых размеров
- ↓
2. Обезжиривание
- ↓
3. Очистка от окислов
- ↓
4. Промывка
- ↓
5. Сушка (горячим воздухом)

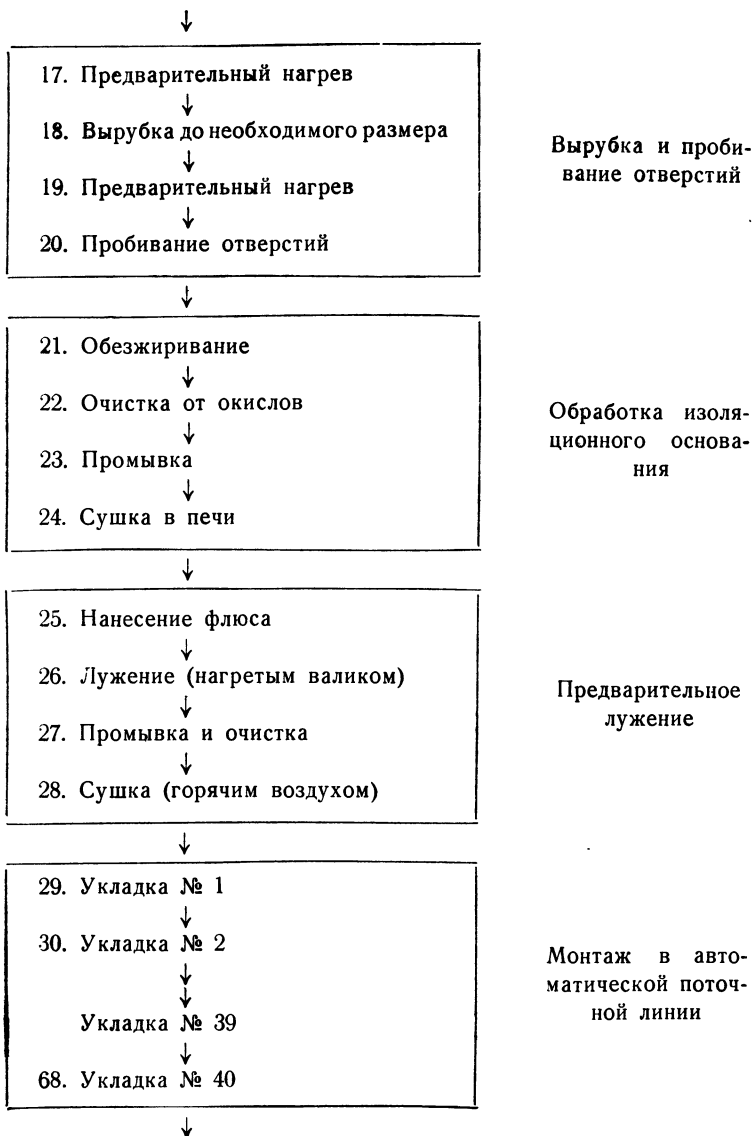
Подготовка сло-
истого материала

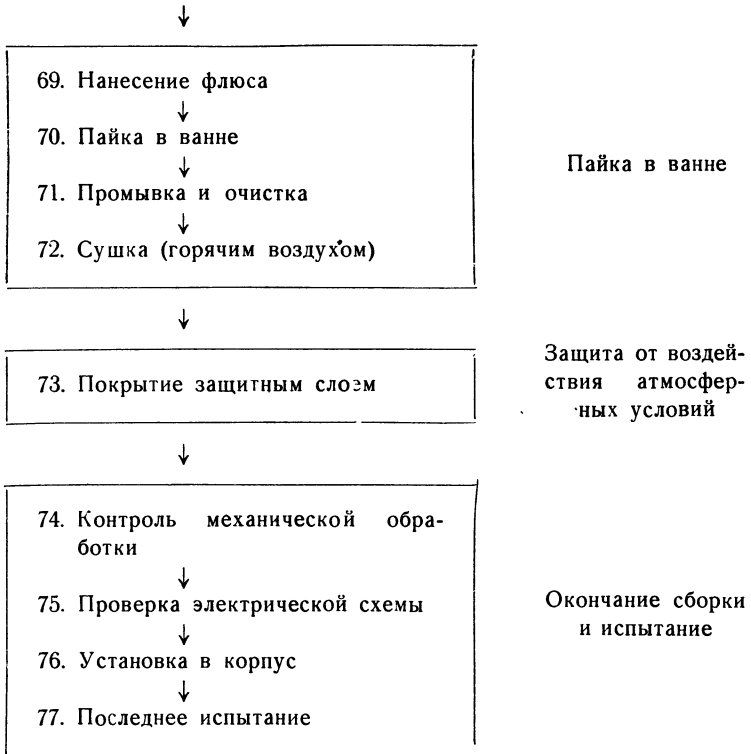


6. Очувствление
- ↓
7. Сушка (инфракрасное облучение)
- ↓
8. Экспозиция негатива
- ↓
9. Проявление
- ↓
10. Смывка незадубленной эмульсии
- ↓
11. Химическое травление
- ↓
12. Промывка (водой)
- ↓
13. Сушка (горячим воздухом)
- ↓
14. Растворение задубленной эмуль-
сии
- ↓
15. Промывка
- ↓
16. Сушка (горячим воздухом)

Печать схемы (с
применением цин-
кографского тра-
вления







соответствия в производительности этих двух участков.

Предположим, что такое решение обеспечило эффективное использование автоматической линии завода; тогда следует подсчитать общую производительность. При 44-часовой рабочей неделе предполагаемая перестроенная производственная линия обеспечит максимальную производительность в 5000 готовых электроблоков в неделю. В связи с этим необходимо ответить на следующие вопросы:

1) какова фактическая производительность линии с учетом времени на профилактический осмотр, наладку и другие операции;

2) можно ли обеспечить сбыт продукции, изготавливаемой с такой большой скоростью;

3) даст ли оборудование, работающее с такой скоростью, прибыль.

Ответить на последний вопрос очень трудно. Для этого необходимо знать капитальные затраты, амортизацию оборудования, стоимость профилактического ремонта и технического надзора, стоимость аренды помещения, предполагаемый процент брака и стоимость сырья (которая выше, чем при обычных способах изготовления). Единственным способом правильно ответить на этот вопрос — построить поточную линию и эксплуатировать ее в течение некоторого времени. И даже тогда трудно будет дать окончательную оценку.

В действительности большинство машиностроителей не идет дальше ответа на второй вопрос, так как максимальная производительность поточных линий значительно превышает спрос рынка. Потребовались бы большие капиталовложения не только на постройку машины, но также и на расширение рынка, а возможно и ассортимента продукции. Эта проблема может быть решена двумя путями. Первый путь заключается в том, что некоторые фирмы нашли экономически выгодным изготавливать печатные схемы полумеханизированным или даже ручным способом. В этих условиях исчезают многие возражения против способа травления фольги, выдвинутые во время обсуждения предполагаемой автоматической поточной линии. Более того, приспособив обычное оборудование, использовавшееся в цинкографии в течение многих лет, можно очень быстро создать поточную линию при сравнительно малых затратах на капиталовложения. Другой путь состоит в тенденции к созданию специализированных фирм, которые изготавливали бы печатные схемы по договору с фирмами, выпускающими аппаратуру с применением печатных схем. Эти фирмы покупают у специализированной фирмы панели с печатными схемами, так же как обычно поку-

пают другие детали. Кроме того, специализированная фирма продает аналогичные узлы многим заводам-изготовителям аппаратуры, поэтому ее рынок довольно обширен и она может позволить себе более высокую механизацию производства.

7. МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ [39—41]

Недавно появился новый способ, известный как способ «микроминиатюризации». Целью этого способа является получение электронных блоков, значительно более мелких, чем это возможно при нормальном производстве. Считают, что этот способ приведет к созданию очень надежного оборудования, но в настоящее время это еще требует доказательства на практике. Сейчас разрабатываются три типа модульных конструкций.

Микромодульная система фирмы «Рэйдио корпорейшн оф Америка». В этой системе ряд элементов выполнен в виде одинаковых по форме квадратных пластинок размерами примерно 8×8 мм. Эти пластинки отличаются только по толщине. Вся цепь собирается путем укладки элементов друг на друга и соединения их посредством вертикальных проводов. Общий вид такой схемы аналогичен блоку, изготовленному по способу Тинкертой и показанному на фиг. 2.3. Преимущество этой системы заключается в ее гибкости и возможности полезного, хотя и ограниченного, повышения плотности монтажа (см. таблицу на стр. 40). Основным недостатком этого способа является большое количество паяных контактов.

Однослойная печатная схема Института исследований в области радиолокации (Англия). Здесь вся схема, включая индуктивности, конденсаторы и сопротивления, за исключением активных элементов, таких, как транзисторы, печатается на стекле или каком-либо керамическом материале, обычно имеющем форму квадрата размерами примерно 13×13 мм. При этом способе широко применяется электролитическое осаждение, металлизация напылением и химическое травление. Плоские транзисторы и диоды могут быть вмонтиро-

ваны в основание перед нанесением схемы. При этой системе получают блоки еще меньшие по размеру, чем микромодульные, а большая часть паяных соединений устраняется. Однако эта система менее гибкая, и в настоящее время ее применение ограничено из-за небольшого ассортимента выпускаемых элементов.

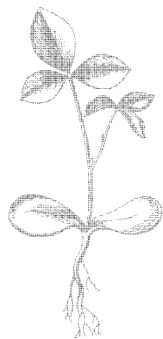
Плотность монтажа элементов

Элемент	Число элементов на 1 д.м. ²
Миниатюрная электронная лампа	35—166
Субминиатюрная электронная лампа	165—529
Обычная транзисторная конструкция	1 059—1 422
Транзисторы с субминиатюрными элементами (самая плотная пакетная конструкция)	1 765—2 118
Микромодульная конструкция	17 650—21 180
Однослойная схема (плоская пластина)	70 600—176 500
Печатная схема на монокристалле	1 059 000—1 765 000

Печатная схема на кристалле фирмы «Тексас инструментс». Эта система является наиболее интересной и обещает значительную экономию объема схемы. Схема выполняется способом диффузии, маскирования и химического травления на монокристалле германия или кремния, с тем чтобы получить как активные, так и пассивные элементы схемы и обеспечить все внутренние соединения без какой-либо подложки. Известно, что уже изготовлены и удовлетворительно работают герметически закрытые мультивибраторы размером всего $3 \times 0,8$ мм. Этот способ только еще начинает развиваться и требует дальнейшего серьезного исследования.

Несомненно, что все эти способы найдут успешное применение при монтаже транспортного и авиационного оборудования. Возможно, что такая же потребность появится и для высокоскоростных цифровых счетно-решающих устройств, где запаздывание по времени из-за

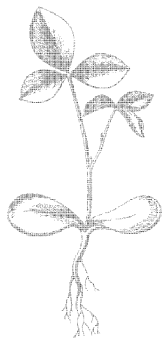
больших линейных размеров схемы может представить значительные трудности. Тем не менее следует подчеркнуть, что микроминиатюризация может вызвать ряд дополнительных трудностей, кроме тех, которые встречаются при изготовлении и сборке. В частности, большая мощность, приходящаяся на единицу объема, может вызвать необходимость в специальной системе охлаждения, которая должна гарантировать всем элементам, и в особенности полупроводниковым, необходимый температурный режим.



Scan AAW

ЧАСТЬ I

ПРОИЗВОДСТВО



Scan AAW

Глава II

НАНЕСЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ПОВЕРХНОСТЬ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Как уже говорилось в гл. I, существуют три основных способа изготовления печатных электросхем: прямое нанесение металлической цепи на поверхность изоляционного материала, избирательное удаление металла с предварительно металлизированной поверхности и совместное изготовление изоляционной панели и металлической цепи за одну или за две операции. В данной главе будет рассмотрен первый из этих способов, который допускает применение различных технологических процессов, причем некоторые из них общеприняты и используются в течение многих лет. Эти технологические процессы можно разделить следующим образом: 1) штампование контура цепи из металлической фольги; 2) применение металлических покрытий или красок; 3) применение металлических порошков; 4) напыление жидкого металла; 5) использование вакуумных процессов — распыления катода или испарения металла; 6) электролитическое осаждение.

Вырезку контуров проводки из металлической фольги можно производить в процессе нанесения цепи на основание, как это имеет место при штамповании электросхем. Нанесение проводки из фольги может быть выполнено и другим способом, когда заранее вырезанная из фольги схема переносится на основание при помощи подложки, которая затем удаляется. Серебряную краску наносят обычно при помощи шелкового трафарета или напылением. В настоящее время существует большой ассортимент металлических красок, начиная с таких, которые затвердевают при температуре 600°С,

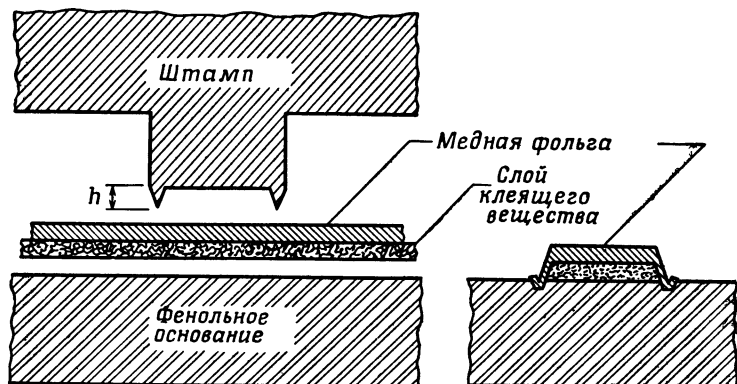
и кончая такими, которые затвердевают при комнатной температуре. Вообще, чем выше температура затвердевания краски, тем лучше электропроводность и прочность сцепления. Уплотнение металлических порошков также производят нагревом и под давлением. Способ напыления жидкого металла довольно прост, но не всегда экономичен из-за больших потерь металла. Способы катодного распыления или испарения металла обычно используют как вспомогательные, так как необходимость работы в условиях вакуума препятствует внедрению их в массовое производство.

До настоящего времени наиболее распространенным способом изготовления печатных схем был способ вжигания серебра в керамическое основание. Однако сейчас повысился интерес к способу изготовления печатных схем электролитическим осаждением. В этом случае вся поверхность изоляционного основания, включая внутреннюю поверхность сквозных отверстий, покрывается тонким электропроводящим слоем (например, путем напыления в вакууме). Затем на обе стороны основания защитной краской наносят негативное изображение схемы таким образом, чтобы во время электролитического покрытия электропроводящие слои наращивались только на незащищенные краской участки основания. Затем защитная краска и первоначально нанесенный металлический слой удаляются. Электросхемы, изготовленные таким способом, обладают рядом преимуществ. Они дают четкое изображение схемы и позволяют производить покрытие металлическим слоем внутренних поверхностей сквозных отверстий без каких-либо дополнительных затрат. Медленное внедрение этого способа объясняется трудностью получения прочного сцепления электропроводящих слоев с основанием. Более подробно эти способы будут рассматриваться ниже.

1. ШТАМПОВАНИЕ СХЕМ [4, 5, 21, 26]

При этом способе медную фольгу толщиной 0,13 мм сматывают с ролей, покрывают соответствующим клеящим веществом и подают в автоматический штампо-

важный пресс, как показано на фиг. 2.1. Фольга вырубается и впрессовывается в изоляционный материал штампом с заостренными краями. Нагретый штамп не только впрессовывает края фольги в изоляционный материал, но и расплавляет склеивающее вещество, благодаря чему обеспечивается сцепление, равноценное механическому. Температура нагрева штампа зависит



Фиг. 2.1. Штамповка схемы.

от используемого клеящего вещества и составляет приблизительно 110°C для термопластичных и 150°C для термореактивных смол. Время выстоя штампа при склеивании термопластичной смолой составляет примерно 2 сек, а термореактивной — значительно больше. Для ускорения процесса был предложен способ, при котором время выстоя штампа должно быть минимальным, необходимым лишь для такого закрепления фольги данным склеивающим веществом, которое позволило бы производить дальнейшую обработку изделия, а именно пайку в ванне, сверление отверстий, вырубку отверстий для разобщения цепей; после этого схема вновь нагревается под давлением для окончательной вулканизации клеящего вещества.

В процессе штампования удобно пробить вспомогательное отверстие, по которому схема в дальнейшем

будет устанавливаться в правильное положение для сверления отверстий и вырубки. Это фактически устраняет проблему приводки, которую довольно трудно разрешить при некоторых других способах изготовления схем.

Преимущества этого способа заключаются в следующем: 1) обеспечивается возможность организации поточной линии в производственном процессе; 2) включается минимальное число рабочих операций; 3) обеспечивается возможность применения разных типов фольги, клеящих веществ и изоляционных материалов. Так, например, листовая сталь (0,05 мм) хорошо впрессовывается как в деревянные, так и в фенольные панели; 4) облегчается приводка панели при последующей обработке; 5) при этом способе устраняются проблемы химического загрязнения; 6) обеспечивается относительная экономия при массовом производстве.

В 40-х годах в Америке этим способом изготавливались тысячи рамочных антенн для радиоприемников, но после второй мировой войны его почти перестали применять. Основными недостатками этого способа являются следующие: 1) относительно высокая стоимость изготовления штампа; 2) низкая производительность в случаях, когда необходима большая прочность сцепления; 3) ограничение минимальной ширины проводника до 0,8 мм.

2. ОКРАШИВАНИЕ СЕРЕБРЯНОЙ КРАСКОЙ [4, 5, 22, 26]

Промышленное производство схем этим способом ограничивается применением керамических материалов. Их преимущество заключается в том, что керамические основания позволяют использовать металлические краски с высокой температурой затвердевания. Это обеспечивает получение продукции с хорошими механическими и электрическими свойствами. В настоящее время существует большое разнообразие керамических материалов, что позволяет производить выбор в соответствии с необходимыми электрическими свойствами. При прямолинейной печатной проводке предпочитают

использовать «стеатит», а для схемы, содержащей напечатанные конденсаторы большой емкости, можно применять «титанаты». Обычно при использовании керамических материалов площадь печатной электросхемы ограничена. Это объясняется необходимостью использовать высокие давления при формовке керамических оснований и возможностью изменения объема оснований (т. е. растяжения и коробления) при обжиге. Вместо керамических материалов можно использовать фенольные или термопластичные материалы, печать на которых можно производить красками нескольких типов, которые затвердевают при комнатной или несколько более высокой температуре. По причинам, которые будут изложены ниже, качество печатных схем на пластмассовых основаниях ниже качества схем при вжигании серебра в керамическое основание.

Перед нанесением краски обычно требуется некоторая предварительная обработка поверхности панели для улучшения сцепления ее с краской. Для этого ее обрабатывают либо механически (например обработка пескоструйным аппаратом), либо при помощи химического травления. Однако такая обработка приводит к разрушению поверхностного слоя и увеличению пористости, поэтому на участки поверхности, которые в дальнейшем не будут подвергаться металлизации, рекомендуется наносить защитное покрытие. Независимо от способа обработки после нее всю поверхность панели необходимо очистить и обезжирить.

В настоящее время разработаны и продаются в готовом к употреблению виде металлические краски, годные для нанесения на поверхность материалов разного типа — от стекла до пластмасс. Они состоят в основном из металлического составляющего (обычно серебро), связующего (смола) и растворителя (типовой состав см. табл. 7.13). Для печатания на керамическом основании в краску вводят добавки на основе стекла с низкой температурой плавления. К краскам для пластмасс добавляют восстановитель, обеспечивающий затвердевание при достаточно низкой температуре. Краску обычно наносят при помощи шаблонного сетчатого трафа-

рета с контуром электросхемы. Минимальная ширина проводника ограничивается линейными размерами ячеек сетки и равна приблизительно 0,8 мм при нормальной ширине печатной проводки 1,6 мм. Толщина проводника после затвердевания составляет примерно 0,08 мм. Выбор способа сушки красок зависит от типа изоляционного основания.

После нанесения краски на керамическое основание его нагревают до 500—800°С. В результате нагрева растворители и связующие вещества выделяются из краски и оставшееся серебро сплавляется в более или менее сплошной проводник, электропроводность которого составляет 80% электропроводности чистого серебра. При этом достигается прочное сцепление проводника с основанием (например, 21 кг/см²) и повышенная способность его к пайке.

Краску, нанесенную на основание из термопластичного материала, следует сушить в соответствии с инструкцией изготовителя. Некоторые краски затвердевают при комнатной температуре, некоторые необходимо подогревать, например до 50°С. Время сушки обычно составляет несколько часов. Электропроводность некоторых красок значительно увеличивается при нагревании схемы под давлением, так как это способствует лучшему удалению связующего и растворителя, а также улучшает сцепление проводников с основанием. Тем не менее как электропроводность, так и сцепление проводников на основаниях из термопластичных материалов в общем значительно ниже, чем серебряных проводников, вожатенных в керамическое основание.

Обычно при изготовлении печатных схем производятся еще некоторые дополнительные операции.

Сопротивления могут быть отпечатаны как часть схемы краской с низкой электропроводностью. Однако по причинам, которые будут изложены ниже, этот способ связан с многими трудностями. Тем не менее он был использован и с явным успехом, но только одним изготовителем.

Иногда серебряную цепь желательно омеднить путем электролитического осаждения, так как медь служит предохранительным слоем и усиливает пропускную способность проводников.

При монтаже элементов схемы их выводные концы припаивают к серебряной цепи, вожженной в керамическое основание непосредственно или при помощи глазков. Использование глазков особенно желательно при печати схемы на пластмассовой панели краской, затвердевающей при низкой температуре.

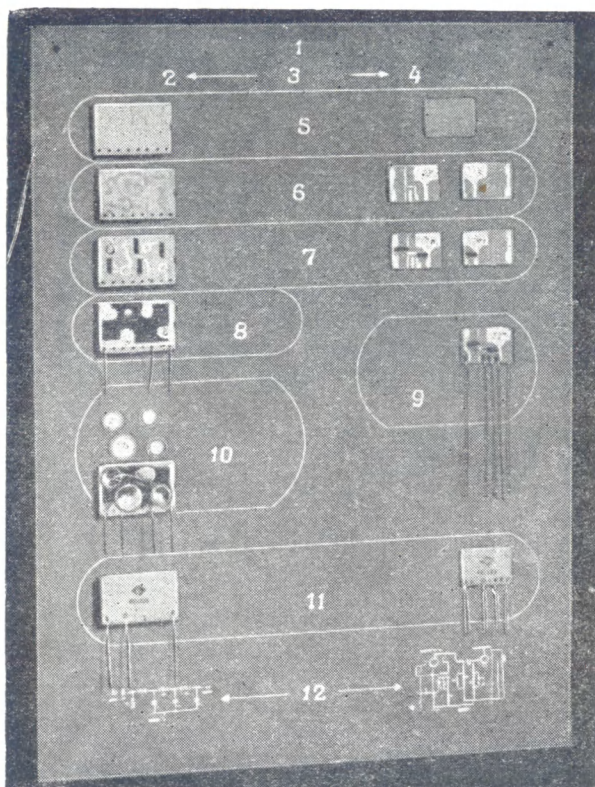
Обычно небольшие керамические узлы покрывают соответствующим составом, который обеспечивает защиту от механических повреждений и одновременно предотвращает проникновение влаги и, следовательно, миграцию серебра. Такие узлы (фиг. 2.2) сначала погружают в фенольную смолу, а затем высушивают и обжигают. Благодаря этому получают прочное жесткое покрытие, которое защищает схему и укрепляет относительно хрупкую керамическую панель. И, наконец, блок пропитывают воском под вакуумом.

Способ вжигания серебра в керамические основания имеет следующие преимущества:

- 1) большую прочность сцепления металлической цепи с изоляционным основанием;
- 2) легкость пайки;
- 3) широкий диапазон рабочих температур и низкая абсорбционная способность к влаге;
- 4) низкие диэлектрические потери (при правильно выбранном керамическом материале и защитном покрытии);
- 5) высокое сопротивление пробою;
- 6) легкость печати конденсаторов большой и малой емкости (благодаря широкому диапазону диэлектрической проницаемости);
- 7) возможность печати сопротивлений.

Недостатками этого способа являются:

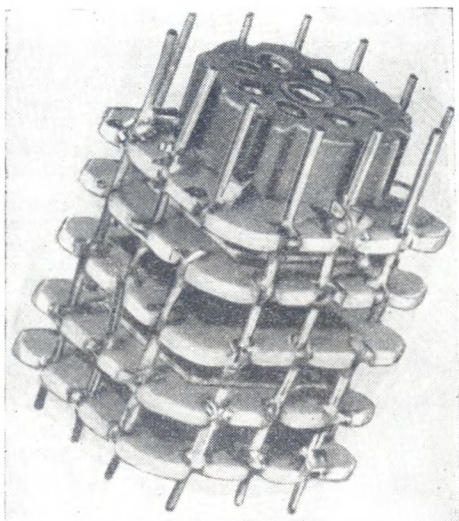
- 1) невозможность на основе этого технологического процесса организовать поточное производство;
- 2) ограничение керамических оснований размерами до нескольких квадратных дециметров;



Фиг. 2.2. Два типовых узла, изготовленных способом вжигания серебра в керамическое основание на разных стадиях производства.

В одном случае конденсаторы напечатаны, в другом дисковые конденсаторы припаяны к схеме
 1 — электронные печатные схемы; 2 — стеатитовое основание; 3 — способ изготовления; 4 — диэлектрическая пластина; 5 — керамическое основание после обжига; 6 — схема из серебра, нанесенного на основание через трафарет после обжига; 7 — кислотоупорный слой после обжига; 8 — нанесена фенольная смола и введены концы; 9 — концы припаяны; 10 — после пайки в ванне установлены конденсаторы; 11 — элементы после погружения в «дюрекс» высушены, маркированы и покрыты воском; 12 — электросхемы

3) контуры проводников не такие четкие, как при некоторых других способах изготовления, например при травлении электросхем;



Ф и г. 2.3. Модульная конструкция, используемая в системе Тинкертой.

Печатные схемы на керамических дисках смонтированы одна над другой, образуя блок, на котором укреплена панель для электронной лампы.

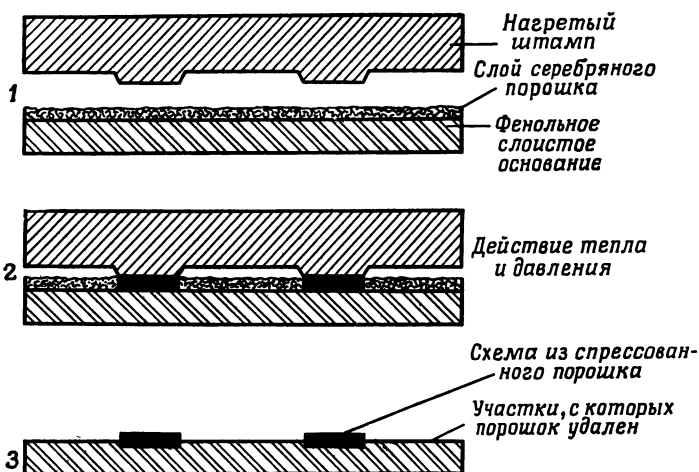
4) возможность миграции серебра при отсутствии специальной защиты (см. гл. VII).

Печать серебряной краской на других материалах (кроме керамики и стекла) никогда не имела сколь угодно значительного промышленного применения.

3 ИЗГОТОВЛЕНИЕ СХЕМ СПОСОБОМ ГОРЯЧЕЙ ЗАПРЕССОВКИ ПОРОШКА [4, 26]

Тонкоразмельченный металлический порошок наносят на поверхность изоляционной панели разными способами: опудриванием, пульверизацией, погружением

панели в порошок, накатыванием порошка валиком или другими способами. Затем порошок прессуется нагретым штампом, рабочие участки которого соответствуют рисунку схемы (фиг. 2.4). При этом металлический порошок уплотняется и обеспечивается прочное сцепление между металлическим проводником и изоляционной



Фиг. 2.4. Последовательность операций при изготовлении схем прессованием порошка.

панелью. Затем панель промывают, и она готова для резки, просверливания отверстий, вырубки и монтажа. Смытые остатки порошка регенерируют и используют вновь.

Этот способ не нашел широкого распространения, однако имеются сообщения о довольно частом его использовании. Его можно применять при работе с панелями из разнообразных термопластичных и терморективных материалов, включая также и те, которые имеют подложку из бумаги, ткани или стекловолкна. Более того, этот способ позволяет использовать ряд металлов, в том числе медь, серебро и золото, однако применение серебра преобладает. Прочность сцепления

проводников с подложкой и способность к пайке в ванне здесь гораздо больше, чем у покрытых медью диэлектриков. Кроме того, этот способ имеет несколько таких реальных преимуществ, с которыми нельзя не согласиться: 1) технология этого способа позволяет организовать поточное производство; 2) легко достигается точная привodka (так как прессующий штамп можно использовать одновременно и для пробивания вспомогательных отверстий); 3) низкая стоимость материалов (за исключением тех случаев, когда требуется металлизировать большой участок поверхности); 4) исключена возможность химического загрязнения; 5) относительно высокая электропроводность (по сравнению с электропроводностью серебряной краски на аналогичных изоляционных материалах).

Однако самым серьезным недостатком этого способа является то, что серебро (чаще всего применяемый для этих целей металл) контактирует с изоляционным основанием.

При условиях, описанных выше, очевидно будет иметь место миграция серебра, что может привести к разрушению схемы. Обычно этот процесс протекает так медленно, что им фактически можно пренебречь, но в более ответственных случаях следует выбирать какой-либо другой металл.

Кроме того, имеются и другие недостатки: 1) необходимость применения припоя, содержащего 2—4% серебра (иначе припой может растворить проводники); 2) размеры печатных схем в некоторой степени ограничиваются необходимостью применения высокого давления при прессовании; 3) высокая стоимость штампа (правда, теперь утверждают, что штамп можно изготовлять более дешевым способом — электрогравированием); 4) границы проводников не такие четкие, как, например, при травлении электросхем.

4. НАПЫЛЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА [1, 4, 5, 25, 26]

Этот способ заключается в том, что при помощи специального пульверизатора жидкий металл напыляется на изоляционную панель, на которую предвари-

тельно укладывают трафарет, изготовленный по контуру схемы. Для обеспечения хорошего сцепления поверхность панели обычно подвергается пескоструйной обработке. Существует другой способ, при котором металл распыляется в специальные пазы на изоляционной панели, соответствующие линиям проводников. В этом случае трафарет не используется, а излишки металла удаляют при помощи механической обработки.

Этот способ обеспечивает быстрое нанесение металла на изоляционное основание и используется прежде всего как вспомогательное средство наряду с другими способами, например электролитическим осаждением. Однако наращивание толстых проводников приводит этим способом невыгодно из-за высокой стоимости вследствие нецелесообразного расхода металла, кислорода и ацетилен, малой прочности сцепления и нечетких контуров проводников.

5. ВАКУУМНЫЕ СПОСОБЫ [4, 38—40]

5.1. Катодное распыление

Панель с уложенным на нее трафаретом электро-схемы помещают в вакуумную камеру на расстоянии 1—15 см от катода в зависимости от размера панели. Катод представляет собой проволоку, сетку или лист из металла, который должен быть осажден на панель. Между катодом и панелью создают высокое напряжение порядка 500—20 000 в. Потребный ток невелик. Для катода могут быть использованы многие металлы, в том числе серебро, медь, платина, золото и т. д. Толщина осаждаемой пленки металла обычно ограничивается несколькими микронами. Затем на схему электролитическим способом дополнительно осаждается металл для получения желательной электропроводности.

Способ вакуумного катодного распыления удобен как вспомогательный процесс (например, для получения основания для дальнейшего электролитического осаждения); его можно использовать для изготовления сопротивлений в виде тонких пленок (уже в течение

многих лет волноводные аттенуаторы изготовляют путем осаждения тонкой пленки нихрома на стекло); этим способом могут быть осаждены многие металлы; так как осаждение металла должно происходить в условиях вакуума, этот способ трудно механизировать и он не может быть использован в автоматической линии; сцепление с изоляционным основанием удовлетворительное только при очень тонкой пленке покрытия.

5.2. Испарение

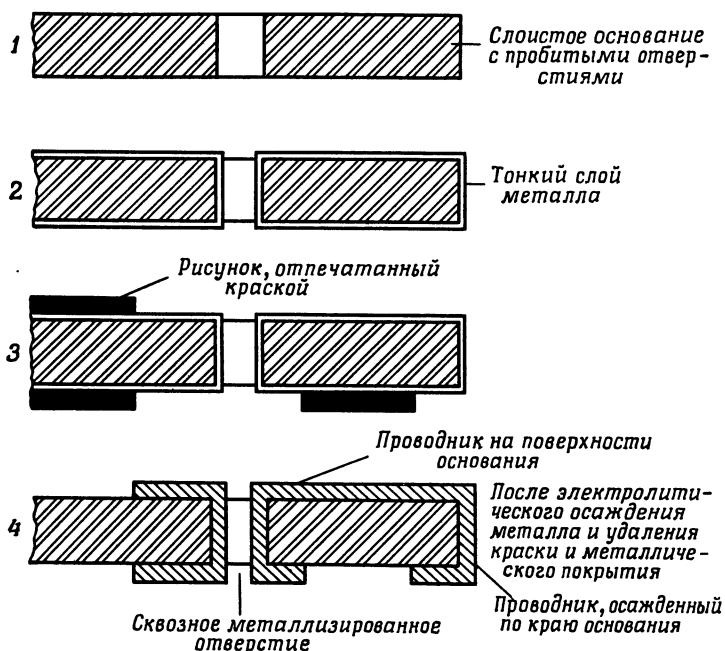
Способ нанесения металлической пленки испарением аналогичен способу катодного распыления, с той лишь разницей, что здесь не требуется применения высокого напряжения. Металл помещают в вакуумную камеру и пропускают через него ток. В результате металл начинает испаряться и осаждаться на панель. Ни технология этого способа, ни результаты существенно не отличаются от способа катодного распыления. Отсутствие высокого напряжения делает этот способ более простым и более приемлемым для осаждения тонких пленок металла на неметаллические поверхности. Этот способ широко используется для изготовления миниатюрных самовосстанавливающихся конденсаторов, в которых применяются алюминиевые или цинковые слои, осажденные испарением на пропитанную смолами бумагу. До последнего времени этот способ широко не использовался по тем же причинам, которые упоминались в связи со способом катодного распыления. Однако сейчас способ испарения начинают усиленно применять для изготовления микроминиатюрных элементов схемы, необходимых при сборке модулей.

Как уже упоминалось, технология изготовления микроминиатюрных элементов находится еще в стадии развития.

6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СХЕМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛА [4, 26, 38]

В изоляционной панели, выполненной из фенольного слоистого материала на бумажной основе толщиной 1,6 мм, сначала пробивают все отверстия, внутренние

поверхности которых подлежат металлизации. Затем панель полностью покрывается очень тонким слоем электропроводящего металла, например способами напыления, вакуумного испарения или нанесения графитового покрытия (фиг. 2.5). Обычно предпочитают способ



Фиг. 2.5. Последовательность операций при изготовлении печатных схем способом электролитического осаждения.

напыления серебра, который иногда применяют при изготовлении зеркал. Для этого используют пульверизатор, имеющий два сопла, через одну головку которого подается раствор серебряной соли, а через другую — восстановитель, например формальдегид с водой. При ударе об обрабатываемую поверхность оба раствора смешиваются. Если эта поверхность была правильно подгото-

влена, то на ней и на внутренней поверхности отверстий быстро образуется тонкий, подобно зеркальному, слой металла. Затем на обе стороны панели наносится фотомеханическим или трафаретным способом негативное изображение схемы в виде защитного покрытия. Панель погружают в ванну для омеднения, где медь осаждается на незащищенные участки панели и отверстий. По окончании процесса омеднения защитный слой и пленка серебра под ним удаляются механическим способом (щетками) или погружением на короткий срок в специальный раствор. После этого печатная схема готова для дальнейшей обработки — сверления отверстий, вырубки и монтажа элементов схемы.

Основная трудность заключается в получении удовлетворительной механической прочности сцепления. Изоляционное основание должно быть достаточно затвердевшим, чтобы во время горячего распыления раствора серебра оно не абсорбировало электролит, что может привести в дальнейшем к образованию мест утечек и коррозии. Однако поверхностное сцепление основы с металлом очень слабое, поэтому поверхность панели нужно подвергать либо пескоструйной обработке, либо обработке парами, химическими растворами, опрессовкой между стальными плитами с грубой поверхностью и другими способами, чтобы она стала шероховатой. Но и в этом случае прочность сцепления в 3—5 раз меньше, чем прочность сцепления при способе травления фольги. Недавно были достигнуты хорошие результаты при покрытии всей поверхности изоляционного основания после пробивки отверстий слоем полуполимеризованного клеящего вещества. В состав этого вещества входит эластичная липкая смола. Металлизация проводится вышеописанным способом, после чего для окончательной полимеризации клеящего вещества панель нагревают. Здесь можно допустить относительно малую прочность сцепления (по сравнению с другими способами), так как покрытые слоем металла сквозные отверстия в основании способствуют лучшему сцеплению проводящих слоев с основанием.

Способ электролитического осаждения имеет следующие преимущества:

1) низкая стоимость материалов; так, в частности, чистая фенольная пластмасса значительно дешевле фенольной пластмассы, покрытой медью;

2) возможность получения без дополнительных затрат двухсторонних схем с металлизированными сквозными отверстиями и электропроводящими слоями, переходящими с одной стороны основания на другую с огибанием его краев;

3) покрытые металлом сквозные отверстия облегчают процесс пайки в ванне, так как припой, затекая в отверстия, окружает контактные выводы элементов схемы, обеспечивая получение прочного соединения;

4) возможность использовать, кроме меди, другие материалы;

5) возможность выбора толщины проводников в соответствии с требованием электросхемы;

6) электропроводность не хуже, чем у чистой меди;

7) четкость контуров проводников равноценна четкости при способе травления фольги;

Недостатками этого способа являются:

1) комплексный характер технологии, затрудняющий создание автоматической производственной линии;

2) малая механическая прочность сцепления;

3) возможность быстрого загрязнения изоляционного основания;

4) использование серебра в контакте с изоляционной поверхностью создает потенциальную опасность миграции серебра.

Глава III

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ УДАЛЕНИЕ МЕТАЛЛА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В этой главе будут рассмотрены способы изготовления печатных схем на предварительно фольгированном изоляционном основании путем удаления тех участков металла, которые не нужны для создания проводящих элементов схемы. В большинстве случаев к изоляционному основанию приклеивают медную фольгу. В качестве основания может служить почти любой материал, но на практике предпочитают использовать бумагу и слоистые материалы на основе стекловолокна. В некоторых специальных случаях применяются также гибкие пластмассовые листы, алюминиевая фольга и др.

Наиболее простым способом удаления фольги с непроводящих участков является механический способ. Простые схемы могут быть изготовлены даже в лабораторных условиях при помощи острого ножа, которым обводят контуры проводников, удаляя ненужную фольгу вручную.

При небольшом объеме производства, когда требуется изготавливать по одному экземпляру печатной схемы, успешно применяется способ механического гравирования. Особенности этого способа будут изложены ниже. Существует также способ прессования схем, при котором проводники впрессовываются в основание, а ненужные участки фольги удаляются при помощи абразива. Однако этот способ в некотором смысле является комбинацией других. Его описание приводится в гл. IV.

В настоящее время наиболее широкое распространение получил способ травления фольги. Объем продук-

ции, выпускаемой этим способом, вероятно, превышает объем продукции, выпускаемой всеми другими способами, упоминающимися в данной книге. Имеется несколько вариантов этого способа, но все они основаны на одном общем принципе — лишний металл удаляется в процессе химической обработки. (Металл может удаляться также способом электролитического травления, если фольгированное основание использовать в качестве анода. Однако этот способ сложный, так как к концу травления электрическая связь нарушается.) Участки металла, являющиеся проводниками, защищают от воздействия химических веществ в процессе травления кислотоупорным слоем. Для этой цели используют любой инертный материал, который наносят тонким слоем либо способом трафаретной или офсетной печати, либо фотографическим копированием и электролитическим осаждением металла, используемого в качестве защитного слоя.

Способ травления фольги обеспечивает ряд преимуществ, но они не столь значительны, чтобы ими можно было объяснить преобладающее использование этого способа по сравнению с другими. Способ травления фольги имеет и ряд недостатков, одним из которых является трудность механизации процесса при организации массового автоматического производства.

По мнению автора, основной причиной широкого распространения этого способа является наличие в цинкографии уже готового оборудования и квалифицированного персонала, что и помогло освоить этот способ. Любому крупному предприятию в Великобритании, начинавшему производство печатных схем, ничего не стоило убедить цинкографское предприятие попробовать освоить новый способ. Результаты, как правило, получались хорошие, но, конечно, в какой-то степени нестабильные.

В последние годы несколько промышленных концернов по обе стороны Атлантического океана засекают свои способы организации полностью автоматических предприятий [37, 61]. Капиталовложения этих фирм очень велики, и производство может оправдать

себя только при наличии большого рынка и относительно ограниченном ассортименте выпускаемой продукции.

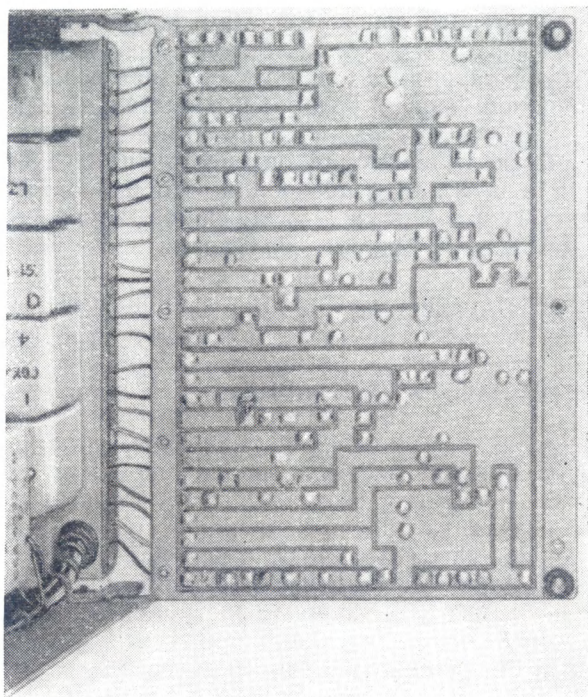
Удаление фольги любым способом ухудшает качество изоляционного основания. При механическом гравировании неизбежно незначительное повреждение поверхности основания, которое увеличивает возможность абсорбирования влаги. Травильные растворы, как правило, не действуют на изоляционный материал, но здесь существует некоторая опасность химического загрязнения в результате абсорбции, что приводит к образованию коррозии и ухудшению изоляционных свойств основания. Однако если принять соответствующие меры предосторожности, то все эти повреждения можно предотвратить или свести к минимуму.

1. МЕХАНИЧЕСКОЕ ГРАВИРОВАНИЕ

Гравировальные машины в том виде, в каком они используются в производстве, вполне подходят для изготовления печатных схем. Обычно фольгированное слоистое основание прочно закрепляют на горизонтальном столе машины и вырезают в нем достаточно глубокие пазы для полного удаления фольги. Гравирование пазов производится режущим инструментом, вращающимся вокруг оси, перпендикулярной основанию. Ширина паза определяется диаметром режущего инструмента. Гравер обводит щупом гравировальной машины металлический шаблон, на котором в увеличенном масштабе воспроизведен рисунок схемы. Движение щупа передается пантографом на режущую головку, совершающую перемещение в горизонтальном и вертикальном направлениях.

На фиг. 3.1 показана печатная схема, изготовленная этим способом. Для упрощения работы движение гравирующего инструмента ограничивается системой двух прямоугольных координат при постоянной ширине пазов. Как видно из рисунка, печатная схема, изготовленная гравированием, по внешнему виду отличается от

обычных печатных схем, в которых проводники имеют одинаковую ширину. Здесь же минимальная ширина



Фиг. 3.1. Монтажная панель батарейного переносного приемника, изготовленная способом механического гравирования.

Элементы схемы смонтированы на оборотной стороне панели

проводников определяется минимальным размером участка, необходимого для удовлетворительной пайки. В результате печатные схемы, изготовленные гравированием, имеют несколько более низкую плотность проводки и большую величину паразитной емкости монтажа.

Другими недостатками этого способа является высокая стоимость шаблона, а также повреждение основания при гравировании. Так как толщина слоистого материала неравномерна, гравирование принято производить на глубину до 0,13 мм, что вполне достаточно для прохождения резца через слой клеящего вещества до основания даже при неблагоприятных условиях. На практике неполадок по этой причине обычно не происходит.

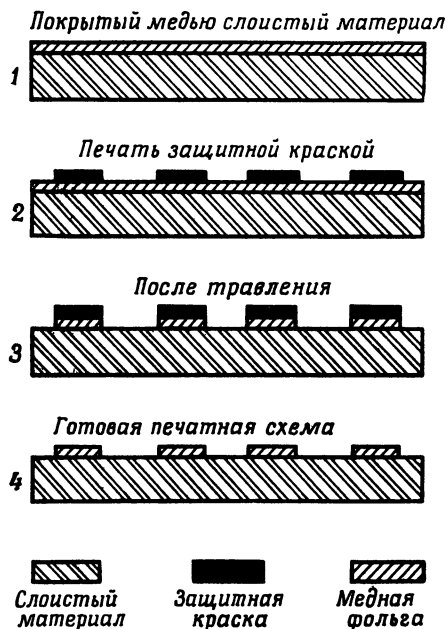
Способ гравирования успешно применяется при изготовлении низкочастотной аппаратуры (фиг. 3.1). Так как шаблоны можно менять в течение нескольких минут или даже секунд, производство электросхем вполне экономично, если нет необходимости изготавливать схемы большими партиями. На практике печатные схемы изготавливаются по несколько штук или даже индивидуально по специальному требованию. Способ гравирования обладает еще некоторыми преимуществами: небольшие затраты на первоначальные капиталовложения и небольшая потребность в площади; механическая обработка изделия до необходимого размера, пробивание и просверливание отверстий могут быть выполнены до или после гравирования; внешний вид готовой панели удовлетворительный и не требуется никакой специальной операции по очистке.

Для изготовления новых шаблонов можно использовать универсальный шаблон с модульной сеткой с направляющими пазами, в соответствующие места которых могут быть вставлены упорные штифты.

Для гравирования было также предложено программное управление (при помощи перфокарт). Имея в своем распоряжении несколько режущих инструментов, установленных для работы с модульной сеткой, всю операцию можно выполнить за два прогона. Перфокарты должны содержать информацию о подъеме и опускании режущих головок. Помимо очевидной гибкости и относительно высокой производительности, которую может дать программное управление, оно сокращает работу конструкторского бюро, так как всю информацию можно подготовить в виде таблиц.

2. СПОСОБ ТРАВЛЕНИЯ ФОЛЬГИ (фиг. 3.2) [37, 38, 97]

Существует несколько вариантов способа травления фольги. Так как различия между этими вариантами относятся в основном к способу запечатывания защитной



Фиг. 3.2. Основные этапы изготовления печатной схемы способом травления фольги.

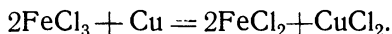
краской, то нам кажется целесообразным начать с описания общей части, а именно самого процесса травления.

Здесь различия ограничиваются применяемыми химикалиями, способами подачи травильного раствора (набрызгиванием или струей под давлением) и некоторыми особенностями, присущими отдельным предприятиям.

2.1. Химическое травление

После нанесения защитного покрытия фольгированную пластину помещают в травильную ванну. Травильные машины одного типа устроены так, что пластина в них устанавливается на небольшом расстоянии от поверхности травильного раствора в наклонном (по отношению к вертикали) положении. Травильный раствор набрызгивается на обрабатываемую пластину вращающимися лопастями ротора, установленного на дне ванны. В других травильных машинах, нашедших широкое применение в наиболее механизированных предприятиях [12], изоляционная панель поливается тонкой струей травильного раствора, подаваемой под большим давлением. Имеются машины и небольшого формата, работающие по этому же принципу. Одна из них показана на фиг. 3.3. Основное преимущество машин второго типа заключается в том, что время травления здесь меньше, чем в лопастных машинах. После травления пластину тщательно промывают, удаляют с нее защитную краску и высушивают.

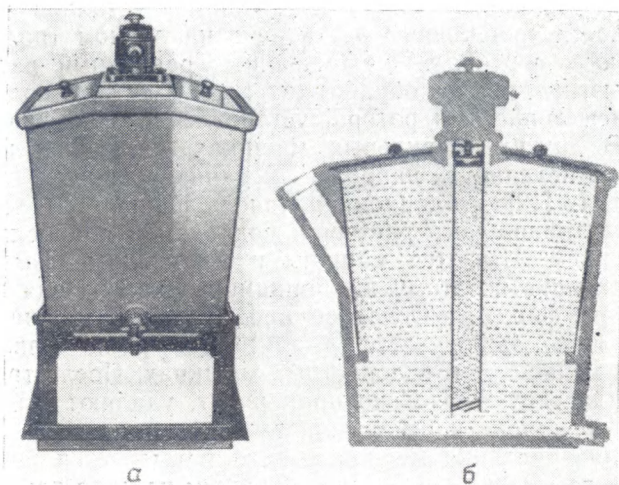
Для травления медной фольги применяется раствор хлорного железа (FeCl_3) с небольшим количеством соляной кислоты (HCl). Химическая формула процесса следующая:



По мере того как протекает процесс травления, концентрация хлорного железа в растворе уменьшается, а концентрация хлористого железа и хлорной меди увеличивается. Это явление замедляет процесс травления, поэтому содержимое ванны следует время от времени корректировать. На скорость травления оказывают влияние и другие факторы. Травление ускоряется при повышении температуры раствора, увеличении силы удара травильного раствора об обрабатываемую поверхность и увеличении количества воздуха, подаваемого в раствор. На практике время, необходимое для травливания фольги толщиной 0,03 мм, может колебаться в пределах 2—12 мин в зависимости от выше-

указанных обстоятельств, причем среднее время травления составляет 5—7 мин.

Исторически сложилось так, что в цинкографских процессах для изготовления полутонных клише наиболее



Фиг. 3.3. Травильная машина, построенная по принципу разбрызгивания раствора.

a — общий вид машины; *b* — принципиальная схема.

Травильный раствор подается под давлением во вращающуюся, расположенную вертикально трубку, имеющую большое количество отверстий, через которые выходит травильный раствор. Это обеспечивает равномерное разбрызгивание раствора на панели. Труба, вращаясь, засасывает в горловину воздух и обеспечивает вентиляцию. Травильный раствор ударяется об изоляционное основание почти под прямым углом со значительной силой; все это в соединении с подачей соответствующего количества воздуха обеспечивает глубокое и равномерное травление. Во время работы машины травильный раствор остается в покое, так что все осадки выпадают на дно ванны

более подходящим травильным раствором считается раствор хлорного железа. Но при травлении печатных схем не обязательно получать такую же текстуру, как у клише, поэтому возможно применение и других травильных растворов. Основные преимущества хлорного железа как травильного раствора следующие: 1) отно-

сительная дешевизна; 2) возможность покупать раствор в готовом к употреблению виде; 3) получение четкого и равномерного травления; 4) отсутствие токсичных паров при травлении. Однако известны и некоторые трудности, связанные с применением этого травильного раствора. Прежде всего необходимо осуществлять тщательный контроль за процессом травления и очень тщательно промывать пластину с целью устранения нежелательного химического загрязнения ее. Химическое загрязнение изоляционного материала при использовании слоистых оснований может привести к быстрому выходу из строя печатной схемы (см. разд. 3.6). Непрерывное длительное использование одной травильной ванны приводит к образованию илстого осадка, представляющего собой смесь фильтрующейся меди и окиси железа. Мельчайшие частицы окиси железа покрывают поверхность обрабатываемого изделия тонким, прочным и гладким как зеркало слоем, который трудно удалить обычной промывкой. Химическое загрязнение можно предотвратить следующим образом: использовать ванну соответствующей конструкции или часто обновлять состав ванны, либо тщательно промывать печатную схему после травления (например, в течение 30 мин), либо погружать схему в специальный очистительный раствор или в 10%-ный раствор шавелевой кислоты, нагретой до 82°С, а затем тщательно промывать горячей водой. Вообще очень трудно точно охарактеризовать процесс смывки, так как каждый изготовитель меняет его в соответствии со своей технологией. Вторым недостатком использования хлорного железа в качестве травильного раствора являются потери и меди, и хлорного железа, а существующие процессы регенерации хлористого железа [37, 38] не всегда экономичны. Кроме того, для полностью механизированного предприятия помехой является довольно малая скорость травления и длительное время смывки.

Принимая во внимание эти недостатки, в промышленности стали использовать другие травильные средства, например азотную кислоту, которая производит травление приблизительно в 6 раз быстрее, чем раствор

хлорного железа [13, 38]. Стоимость химикалий невелика, и имеется возможность регенерировать раствор, не прекращая процесса травления. Серьезным практическим недостатком таких травильных растворов является образование токсичных паров; нет сведений и о решении проблемы борьбы с химическими загрязнениями. Имеется еще два травильных раствора, преимуществами которых заключаются в основном в способах регенерации, — это персульфат аммония и хлорная медь. Кроме того, имеются данные об использовании хромовой кислоты в процессе, при котором припой, осажденный электролитическим способом, выступает в качестве защитного слоя (см. разд. 2.5). Все это говорит о том, что травильный раствор может быть выбран в соответствии с используемыми материалами. Подробное описание этих способов и химии процессов читатель может найти в работе [38].

2.2. Способ нанесения защитного слоя

Трафаретная печать. Сетчатый трафарет, несущий рисунок схемы, изготавливают способом, описанным в гл. II. Слоистый материал, покрытый медной фольгой, очищают при помощи абразива (например, пемзы) или химическим способом (обезжириванием трихлорэтиленом и погружением в пассивирующий раствор, например разбавленную хромовую кислоту). Трафарет укладывают на омедненную сторону слоистого материала и наносят на него жидкий защитный слой, выдавливая его через трафаретную сетку накатным валиком; при этом способе защитный слой наносится равномерно и получаются четкие линии, так как давление, создаваемое валиком, обеспечивает хороший контакт между сеткой и изоляционным материалом. После того как защитный слой высохнет, панель готова для травления.

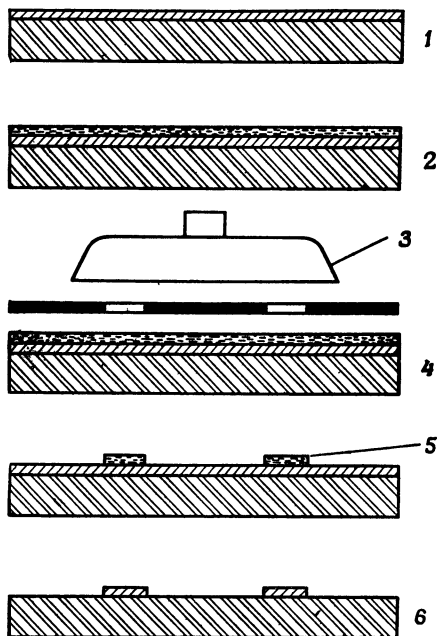
Как уже говорилось в гл. I, иногда предпочитают использовать вместо шелковых трафаретов металлические, особенно в тех случаях, когда износ трафаретной сетки очень велик.

В специальной литературе сообщалось об интересном случае применения трафарета, изготовленного из стального листа электрогравированием [13]. Трафарет удерживался в контакте с основанием магнитным зажимом. Это позволило наносить защитный слой вместо накатного валика пульверизатором.

В качестве защитного слоя можно использовать различные краски, смолы, воск, битум и другие материалы. Основное требование к этим материалам — инертность при травлении и достаточная прочность при обычном обращении. Защитный слой должен также легко удаляться, например при погружении в соответствующий безвредный раствор. При полностью механизированном процессе важным фактором является время, необходимое для затвердевания защитного слоя; оно не должно превышать времени перемещения изделия от одной станции к другой. При использовании металлического трафарета можно применять разогретые термопластичные краски, которые затвердевают почти немедленно при контактировании с относительно холодным фольгированным слоистым основанием [37]. Для удаления краски пластину после травления подвергают обработке влажным паром. Защитный материал, используемый для пульверизации, который, как сообщают, кроме всего прочего, обладает способностью действовать как эффективный антикоррозионный паяльный флюс, состоит из микрокристаллического воска, смешанного с активированной смолой [97]. Этот раствор, нагретый до 140° С, распыляется через трафарет на изоляционную панель и застывает почти моментально при попадании на медный слой. Так как этот раствор действует и как флюс, его нет надобности удалять после травления.

Способ нанесения защитного материала через сетчатый трафарет является относительно простым и экономичным. Он может быть механизирован без особых трудностей. Четкость линий и стабильность размеров достаточно высоки, чтобы удовлетворить большинству требований, но уступают по качеству печатным схемам, получаемым фотомеханическим способом.

Фотомеханический способ (фиг. 3.4). На очищенную медную поверхность наносят светочувствительный раствор. Квалифицированный рабочий может, наклоняя



Фиг. 3.4. Фотомеханический способ нанесения защитного слоя.

1 — покрытый медью слоистый материал; 2 — изоляционное основание, покрытое светочувствительным слоем; 3 — источник света; 4 — экспонированное через негатив основание; 5 — кислотоупорный слой, оставшийся после проявления; 6 — печатная схема после травления

вручную пластину под разными углами, получить равномерную пленку светочувствительного материала, но чаще всего для этой цели используют центрифугу (фиг. 3.5). Пластины с налитым в центре светочувствительным раствором помещают на вращающийся стол и включают центрифугу; в результате раствор равномерно

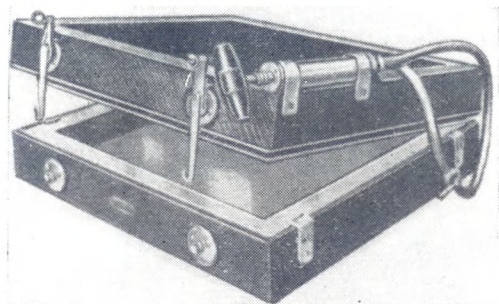
растекается по всей поверхности пластины, а излишек его стекает. Одновременно светочувствительный раствор высушивают отфильтрованным нагретым воздухом или под действием инфракрасного излучения. Светочувствительный раствор иногда наносят простым погружением



Ф и г. 3.5. Небольшая центрифуга настольного типа.

пластины в раствор или напылением. В качестве светочувствительных эмульсий используют как шеллак с двуххромокислыми солями, известный в цинкографии под названием «холодная эмаль», так и лак фирмы «Кодак Фото-Резист» или альбумин. Альбумин является наиболее дешевым, шеллак с двуххромокислыми солями — наиболее часто употребляемым, а материал фирмы «Кодак», по общему утверждению, наилучшим светочувствительным раствором.

На очувствленную поверхность пластины помещают негатив с изображением схемы и производят копирование в вакуумной копировальной раме (фиг. 3.6), освещающая раму в течение нескольких минут дуговой лампой. После экспозиции пластину погружают в проявитель,



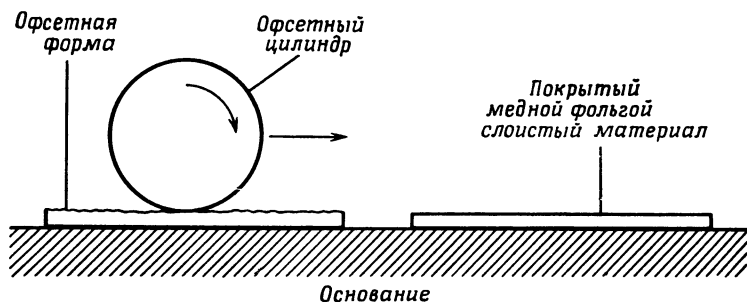
Фиг. 3.6. Небольшая пневматическая копировальная рама с ручным насосом.

растворяющий незадубившиеся участки светочувствительного покрытия. При использовании способа холодной эмали в проявитель добавляют немного метилвиолета; он окрашивает изображение, помогая визуальному осмотру, и способствует затвердеванию эмали. При способе «Кодак» окрашивание выполняется отдельной операцией, следующей за проявлением; затем пластину промывают и высушивают и в случае необходимости дефектные участки закрашивают вручную кислотоупорной краской. Если печатную схему требуется отпечатать и на второй стороне изоляционной панели, то весь процесс повторяется. После этого панель готова для травления.

Фотомеханический способ является экономичным при ручной и полумеханизированной работе и обеспечивает получение высококачественных печатных схем (как в отношении четкости линий проводников, так и стабильности размеров), возможно превосходящих по качеству печатные схемы, изготовленные другими спо-

собами. Однако этот способ выгоднее использовать при относительно небольшом объеме производства.

Последним достижением в этой области является использование ксерографии. Основное отличие этого способа от обычной фотографии состоит в возможности использования в качестве проявителя сухого порошка (вместо жидкого или газообразного химического



Фиг. 3.7. Принцип нанесения защитного слоя способом офсетной печати.

проявителя). Описание этого способа можно найти в литературе [32, 37]. Однако этот способ, как нам известно, еще широко не применяется.

Офсетный способ печати¹⁾. Основной принцип офсетного способа печати показан на фиг. 3.7. Сначала изготавливают офсетную печатную форму, несущую изображение схемы. Форма закатывается краской при помощи валика, затем офсетный цилиндр переносит краску с формы на медную поверхность слоистого материала. Однако количество краски, которое может быть перенесено, невелико, и в красочной пленке могут образоваться небольшие оголенные участки, которые могут привести к образованию дефектов в медных проводниках печатной схемы. Это нежелательное явление можно устранить повторной печатью оттиска или за-

¹⁾ Подробное описание этого способа и оборудования см. в книге «Practical Printing and Binding» под ред. Х. Уиттона, Odhams Press Ltd, 1946.

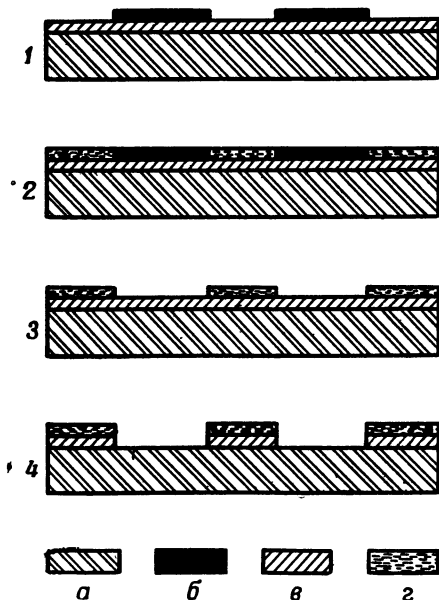
пудриванием краски битумом, который затем при нагревании расплавляется.

Существуют печатные формы трех типов: рельефные (формы высокой печати), при которых краска накатывается на выступающие над поверхностью пластины участки; формы глубокой печати, в которых краска находится в углубленных печатающих участках; офсетные формы, которые избирательно воспринимают и отталкивают краску. Пробельные участки офсетной формы гидрофильны и не воспринимают краску. Раньше в качестве материала для изготовления печатной формы применяли известняковый камень, в настоящее время офсетные формы изготавливают из цинка, алюминия, пластмассы или бумаги. Для специальных типов работ можно использовать биметаллические и триметаллические формные пластины.

Печать офсетным способом имеет много преимуществ. Она обеспечивает наиболее быстрый и наиболее подходящий способ печати при большом объеме производства по сравнению со всеми другими способами, описанными в этой главе. Процесс изготовления печатной формы относительно быстрый и дешевый, и металлические офсетные формы можно хранить в течение многих лет. Размеры изображения на оттиске не искажаются, а четкость контуров проводников по качеству стоит между трафаретной печатью и фотомеханическим способом. Основным недостатком является относительно высокая стоимость оборудования и необходимость использования квалифицированного обслуживающего персонала.

Предварительная металлизация при обратимом процессе. Часто возникает необходимость защитить готовую печатную схему наращиванием на нее антикоррозийного, износоустойчивого металлического покрытия. Схему можно металлизировать после травления, но обеспечить электрическую связь всех проводников в этом случае очень трудно. Существует другой способ, при котором всю поверхность можно металлизировать перед травлением. Но это не экономично и способствует загрязнению травильной ванны, хотя используемые при

этом способе металлы обычно инертны к большинству травильных растворов. Это последнее обстоятельство навело на мысль использовать осаждаемый металл в



Фиг. 3.8. Способ предварительной металлизации схемы после печати негативного рисунка схемы.

1 — печать защитной краской негативного рисунка схемы; 2 — электролитическое осаждение; 3 — защитная краска удалена; 4 — схема после травления.

а — слоистая пластмасса; б — защитная краска; в — медная фольга; г — металл, осажденный электролитическим способом.

качестве защитного покрытия. Этот способ показан на фиг. 3.8. Сначала печатают негативное изображение схемы, используя соответствующую защитную краску. На незащищенные участки медной поверхности электролитическим способом осаждают желательный кис-

лотоупорный слой металла. Затем защитную краску удаляют при помощи растворителя, оставляя открытыми ранее защищенные, но подлежащие удалению при травлении участки меди. Осажденный металл во время травления действует как защитный слой. Этот способ также применяется для облегчения пайки в ванне, причем в этом случае осажденный металл служит припоем. Применение этого способа ограничивается теми специальными случаями, для которых он и был разработан.

Глава IV

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНОЙ СХЕМЫ ОДНОВРЕМЕННО С ИЗГОТОВЛЕНИЕМ ИЗОЛЯЦИОННОГО ОСНОВАНИЯ

В способах, описанных в двух предшествующих главах, изготовление изоляционного основания и схемы электропроводки является двумя различными и не зависящими друг от друга операциями. И действительно, эти обе операции редко выполняются на одном предприятии. Но в данной главе будут описаны способы совместного выполнения этих двух операций. В одном из вариантов схема печатается серебряной краской на кусках ткани, которые сплавляются с фенольным основанием во время процесса его изготовления. В двух других случаях проводники из металлической фольги впрессовываются в фенольный слоистый материал во время прессования и вулканизации. И в последнем случае, одним из вариантов которого является способ Саргрова, применяется специальное изоляционное основание с имеющимися в нем пазами, которые воспринимают и задерживают металл, наносимый в жидком виде способом напыления или заливки.

Ни один из этих способов не имеет сколько-нибудь широкого применения, поэтому здесь приводится лишь краткое их описание. Читатель, интересующийся подробностями, может найти соответствующие указания в библиографии в конце книги.

1. СХЕМЫ, ОТПЕЧАТАННЫЕ СЕРЕБРЯНОЙ КРАСКОЙ И СКРЕПЛЕННЫЕ СО СЛОИСТЫМ ОСНОВАНИЕМ В ПРОЦЕССЕ ВУЛКАНИЗАЦИИ

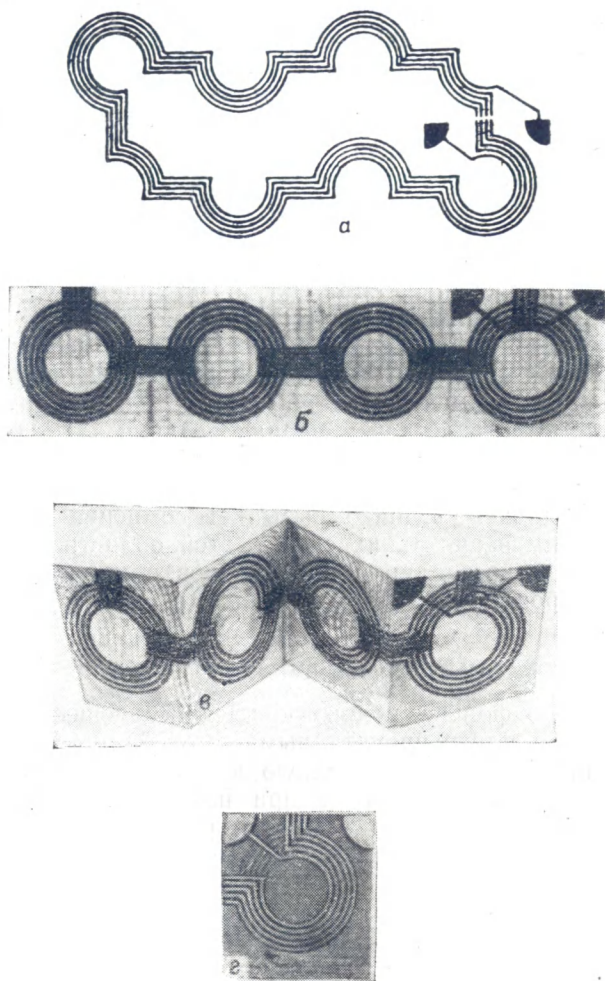
Первым этапом в этом способе является нанесение серебряной краски при помощи сетчатого трафарета на куски органди. Печать можно производить и на бу-

маге, но ткань благодаря своей структуре способствует задержанию большего количества краски. Отпечаток имеет одинаковую электропроводность с обеих сторон ткани, что желательно по соображениям, которые будут изложены ниже. Кусок органди с напечатанной на нем схемой подвергается сушке, температура и продолжительность которой определяются составом краски. После сушки серебро имеет тенденцию к пылению и отслаиванию. Чтобы устранить эти недостатки, куски ткани с отпечатанной схемой помещают между стальными пластинами в пресс, где они подвергаются в течение одной-двух минут давлению в несколько сот килограммов на квадратный сантиметр. При этом частицы серебра уплотняются и соответственно улучшаются электрические и механические свойства проводников. По желанию электропроводность можно улучшить способом осаждения меди (это также предотвращает миграцию серебра).

Затем запечатанный кусок органди покрывают куском ткани, пропитанной смолой (причем концы помещают в прорези), и листами бумаги, также пропитанной смолой, в количестве, определяемом толщиной основания. По желанию к этому комплекту (органди — ткань — бумага) можно приложить еще несколько аналогичных комплектов с печатными схемами, располагая их на разных уровнях; затем всю стопу с комплектами помещают в нагретый пресс и вулканизируют. Во время вулканизации серебро еще более уплотняется. В то же время концы в ткани припрессовываются к концам проводников схемы и почти сплавляются с ними. Теперь становится понятным преимущество пропитывания краской ткани.

Подсоединение элементов схемы осуществляется несколькими способами. В одном из них применяются глазки и шайбы, в другом непосредственно выводные концы элементов схемы припаиваются к печатной проводке, при этом желательно участки будущих соединений омеднить.

Применение этого способа при изготовлении многовитковой катушки показано на фиг. 4.1. Из рисунка



Фиг. 4.1. Сфальцованная катушка Лено.

Для внутреннего соединения отдельных слоев не требуется никаких соединительных паек. Листы прокладки, пропитанные смолой, помещают между сфальцованными листами - схемы, и весь комплект скрепляется в процессе вулканизации под действием тепла и давления.

видно, что для соединения отдельных слоев не требуется никаких соединительных паек. После сгибания и вкладки листов бумаги комплект подвергается нагреву под давлением, в результате получается блок многovitковой катушки.

Основным преимуществом этого способа является большая прочность сцепления, практическая невозможность повреждения схемы, чистая поверхность и возможность установки нескольких слоев схемы на одном и том же основании. Этот способ, по-видимому, не описывался в технической литературе, но читатель, интересующийся этим вопросом, может найти подробности в патентах, выданных на имя Лено (фирма «Стандарт телефонз энд кейблз»). Первый патент, в котором описан этот способ, выдан в Великобритании за № 651 780 (1947). Этот способ был применен при изготовлении панелей с малыми электрическими потерями для высокочастотных схем. Однако вызывает сомнение возможность применения таких схем в этой области из-за невысокой четкости линий проводников и нестабильности их размеров.

2. ШТАМПОВАННЫЕ СХЕМЫ [26]

Медную фольгу, покрытую клеящим веществом, помещают вместе с пропитанными смолой листами бумаги в нагретый пресс. Гладкую прессующую плиту, которую обычно используют при плакировании какого-либо материала медью, заменяют рельефной, травленной пластиной. Рельефные участки этой пластины (соответствующие линиям проводников) вдавливают фольгу в основание. Для удаления ненужных частей фольги с поверхности пластины ее обрабатывают на прецизионном шлифовальном станке. После этой операции получают схему, углубленную приблизительно на 0,13 мм в изоляционное основание.

Электрические и механические свойства такой схемы аналогичны свойствам схемы, полученной способом травления фольги и обладающей дополнительным преимуществом — здесь исключена возможность химического

загрязнения. Основным же преимуществом является очевидная простота способа изготовления и небольшое количество операций. Однако стоимость изготовления гравированной пластины делает экономичным применение этого способа только при больших заказах, при которых рисунок схемы меняют очень редко. Кроме того, этим способом нельзя выполнять двухсторонние печатные схемы.

3. СПОСОБ ПЕРЕНОСА СХЕМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ, НА ИЗОЛЯЦИОННОЕ ОСНОВАНИЕ [26]

Изображение схемы наносят на поверхность листа из нержавеющей стали, например способом электролитического осаждения меди. Затем лист вместе с пропитанными смолой листами бумаги помещают в нагретый пресс. После вулканизации лист из нержавеющей стали отделяют от полученного из листов бумаги слоистого основания, при этом медная схема остается впрессованной в поверхность основания. Каким бы привлекательным ни казался этот способ, практически он почти неприменим из-за трудностей, связанных с отделением стального листа, которое часто приводит к ломке схемы. Вообще перенос электролитически осажденной схемы можно производить и на готовое изоляционное основание, но описанный выше способ является более экономичным.

4. СПОСОБ ПЕРЕНОСА ДВОЙНОГО СЛОЯ ФОЛЬГИ [26]

Этот способ является вариантом вышеизложенного и заключается в том, что алюминиевую фольгу сматывают с рулона и покрывают с обеих сторон защитным слоем смолы. К этой фольге временно приклеивают второй слой омедненной алюминиевой фольги. На этом втором слое фольги кислотоупорной краской печатают рисунок схемы и производят химическое травление. Все эти операции могут выполняться непрерывно (без разрезания фольги на куски), после чего полученную ленту

сматывают в рулон и сохраняют в таком виде. Когда схема потребуется, фольгу разрезают на листы и вулканизируют вместе с пропитанными смолой бумажными листами. После вулканизации слой фольги, служивший подложкой, удаляют, а схема остается на поверхности основания. Этот способ устраняет некоторые недостатки, присущие предыдущему способу, но, несомненно, имеет и некоторые свои.

5. ЗАПОЛНЕНИЕ МЕТАЛЛОМ ПАЗОВ В ИЗОЛЯЦИОННОМ ОСНОВАНИИ [1—5]

Этот способ имел много вариантов, но, вероятно, ни один из них не выдержал испытаний. Наиболее известным вариантом является способ Саргрова, который был применен на автоматической линии и поэтому представляет значительный исторический интерес. В одном из вариантов этого способа пазы формировались путем обработки изоляционного основания пескоструйным аппаратом с применением шаблона. Шаблон оставался в этом же положении и при последующем напылении жидкого металла. Этот вариант имеет преимущество по сравнению с самим способом Саргрова, которое заключается в том, что панель не подвергается механической обработке для удаления лишнего металла. Однако этим способом не так легко изготовлять печатные элементы схемы.

Опыт показал, что все эти способы неэкономичны главным образом из-за потерь металла, кислорода и ацетилена в процессе напыления. Кроме того, способ Саргрова, при котором все элементы схемы должны печататься одновременно, обладает недостатком, присущим всем аналогичным способам, заключающимся в невозможности надежного изготовления хотя бы большей части продукции с требуемой точностью.

Глава V

МОНТАЖ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ, ПАЙКА В ВАННЕ И ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА

В большинстве случаев печатная схема является чем-то большим, чем простая распределительная панель. Она может включать в себя несколько печатных катушек и конденсаторов, но большинство элементов схемы входит в нее в виде отдельных деталей, которые должны быть установлены и припаяны к панели. Как правило, требуется выполнить следующие операции.

Вырубка по заданному размеру. Вырубку можно производить до или после печати в зависимости от способа изготовления схемы.

Пробивание отверстий. Отверстия можно пробивать последовательно или одновременно при помощи многопуансонного штампа.

Предварительное лужение. Процесс пайки в ванне облегчается предварительным лужением печатных проводников.

Сборка панели. Элементы можно монтировать на печатную схему вручную или при помощи автоматического монтажного оборудования.

Пайка в ванне. Концы элементов схемы припаяются к проводникам печатной схемы при прохождении панели над паяльной ванной.

Защита от атмосферных воздействий. Печатные схемы промышленного или бытового назначения желательнее защищать от коррозии металла и загрязнения изоляционного основания путем покрытия специальной смолой.

Характер и последовательность перечисленных выше операций меняются в зависимости от способа печати и применяемых материалов. Так, при изготовлении печатных схем способом вжигания серебра керамическое основание формируется по заданному размеру, и в него до обжига вставляют арматуру для отверстий. При работе со слоистыми материалами последовательность меняется в соответствии с особенностями процесса. Везде, где это возможно, вырубку и пробивание отверстий следует выполнять перед печатью схемы, так как это способствует более легкой корректировке приводки отверстий относительно рисунка схемы. Вышеописанная последовательность операций почти обязательно сохраняется при изготовлении схем способом электролитического осаждения металла, так как основное преимущество этого способа изготовления печатных схем заключается в получении металлизированных сквозных отверстий без дополнительных затрат. При способе штамповки или тиснения схем штамп может пробивать некоторые вспомогательные отверстия, гарантирующие приводку во время последующих операций. В этом случае проблема приводки отпадает и операции вырубки и пробивания отверстий обычно выполняют после печати. В других случаях имеет смысл сохранить вышеприведенную последовательность операций, даже если при этом трудно получить удовлетворительную приводку. Так, при фотомеханическом способе изготовления печатных схем методом травления производство экономично только в том случае, если на один большой лист слоистого материала печатают параллельно несколько схем. Однако изготовление такого штампа, который мог бы пробить на всех схемах одновременно все отверстия, невозможно из-за его высокой стоимости, поэтому вырубку в любом случае следует производить после печати. Когда кислотоупорный слой наносят способом офсетной или трафаретной печати, то изоляционное основание можно вырубить по заданному размеру и пробить в нем отверстия до травления. Однако при такой последовательности операций увеличивается возможность химического загряз-

нения из-за способности к абсорбированию тех участков основания, которые оголились при вырубке и пробивании отверстий. Поэтому в DG 5007 (см. Приложение 1) рекомендуется оставлять на слоистом изоляционном материале со всех четырех сторон кромку шириной 6,4 мм, с тем чтобы впоследствии удалить разрушенные во время травления края. (Эта рекомендация относится, естественно, только к листам изоляционного материала больших размеров, на которых отпечатано несколько схем.)

В продаже имеется несколько типов фенольных слоистых материалов; в некоторых из них пробивание отверстий производится холодным способом, в других — горячим. При холодном способе пробивания отверстий экономия достигается за счет относительной дешевизны приспособлений и обработки, а также более легкого выполнения допусков на размеры. Однако изоляционные свойства в этом случае обычно невысокие. При горячем способе пробивания отверстий требуется нагрев штампа и панели перед установкой ее под пресс. При изготовлении штампа должны быть учтены температурные коэффициенты изменения размеров материалов штампа и панели.

Способы пробивания отверстий изменяются также в зависимости от того, пробиваются ли отверстия последовательно или одновременно одним многопуансонным штампом [54]. Многопуансонные штампы довольно дороги и их применение экономично лишь при изготовлении стандартных схем большими партиями. Операция последовательного пробивания отверстий требует больше времени, но обладает значительной гибкостью. Эту операцию можно до некоторой степени ускорить, если применить пазовый шаблон и щуп. Каждый раз, когда оператор, водящий щупом по пазам шаблона, попадает в отверстие шаблона, автоматически включается штамп, пробивающий отверстие в соответствующем месте печатной схемы. В более сложных устройствах пробивной станок имеет программное управление и работает, например, от перфорированной ленты.

Процесс монтажа состоит в большинстве случаев в продевании концов элементов схемы через отверстия в основании. Эта операция, которая может выполняться вручную или механическим способом, включает в себя также загибание концов элементов схемы, после чего они готовы для спайки. Обычно элементы размещают на оборотной стороне печатной схемы, при этом пайка лишь обеспечивает соединение проводников и не несет на себе всей тяжести элемента.

Различные способы изготовления печатных схем оказали значительное влияние на конструкцию элементов схем, и в настоящее время некоторые заводы изготавливают элементы, специально предназначенные для монтажа в печатных схемах. Кроме того, в промышленности наблюдается определенная тенденция к стандартизации модуля, определяющего расстояния между отверстиями и, следовательно, между концами схемных элементов, что, несомненно, приведет к значительному упрощению конструкции машин для пробивания отверстий и монтажа. Британский стандарт 3081 устанавливает две системы сеток. В сетке системы А основной модуль равен 2,54 мм; это значит, что участки крепления концов навесных элементов должны быть расположены в пунктах пересечения сетки с таким модулем. В сетке системы Б основной модуль равен 0,635 мм; таким образом, оба модуля совместимы. Хотя такая стандартизация может быть очень выгодной, ясно, что некоторые элементы, такие, например, как ламповые панели, не могут быть размещены по прямоугольному модулю.

В момент написания данной книги на большинстве предприятий Англии сборка панелей производится вручную, а механизация ограничивается применением конвейера, транспортирующего собираемую схему от одного монтажника к другому. Поэтому требования к конструкции элементов выдвигаются без расчета на автоматическое монтажное оборудование. В конце данной главы, в разделе, посвященном автоматической сборке, еще раз будут указаны требования к элементам с учетом перспектив.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ СХЕМ [43, 47, 54]

Конструкция элементов должна удовлетворять следующим основным требованиям.

Прочность печатного основания. Некоторые элементы, такие, например, как ламповые панели, требуют сверления больших отверстий в основании печатной схемы, чем ослабляют его прочность. Новые конструкции, показанные на фиг. 5.1, позволяют устранить это. И хотя монтаж элемента в одном отверстии привлекает тем, что довольно просто пробить только одно отверстие и легко продеть в него концы, многодырочное крепление, по всей вероятности, станет универсальным.

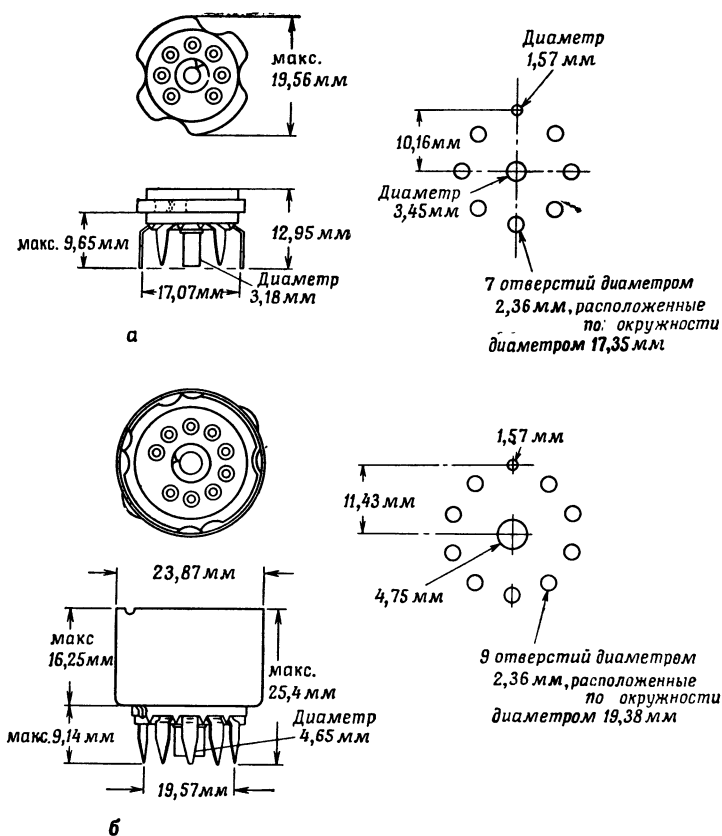
Ограничения конфигурации плоскостной схемы. Наиболее сложной проблемой при определении конфигурации печатной схемы является устранение пересечения ветвей. Эта проблема значительно облегчается, если конструировать элементы с несколькими выводами (фиг. 5.2); при новом варианте линии печатных проводников могут располагаться между выводными концами элемента.

Легкость монтажа. Контактные выводы должны легко проходить в отверстия основания, если при пробивании отверстий и изготовлении самих элементов соблюдались принятые допуски. Многие изготовители предпочитают использовать конусообразные выводы. Желательно также, чтобы при установке не было необходимости в применении клепки. Для этого элемент монтируют при помощи самозакрепляющегося вывода [47].

Получение качественной пайки. Для получения пайки удовлетворительного качества промежутки между печатным проводником схемы и выводным концом должны быть как можно меньше и не превышать 0,38 мм. Однако при этом ухудшаются условия монтажа деталей.

Легкость демонтажа элементов. Элементы должны легко сниматься с панели как в условиях завода, где они изготавливаются, так и в процессе эксплуатации, с тем чтобы можно было легко заменять ошибочно уста-

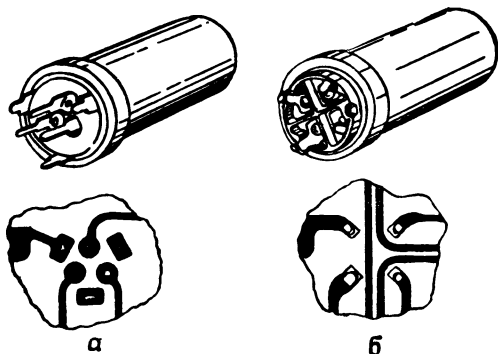
новленные и поврежденные элементы, не разрушая всей схемы. При некоторых способах монтажа элементов с



Фиг. 5.1 Ламповые панели, предназначенные для монтажа в печатных схемах, с контактами для выводов лампы через отверстия в панели, выполненные по Британскому стандарту.

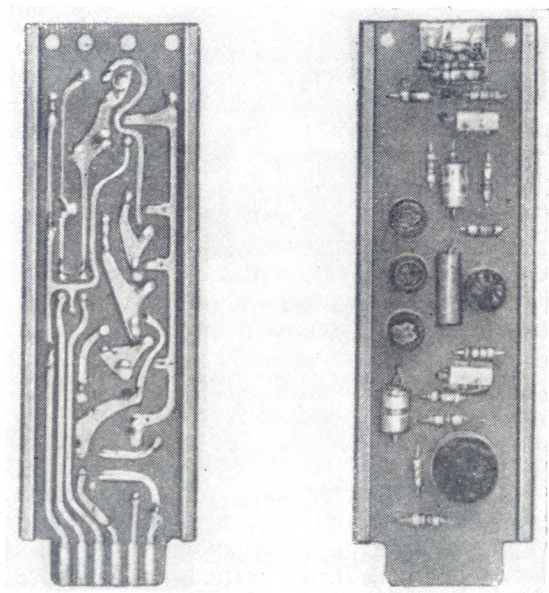
а — панель без экрана для лампы V7G; б — панель с экраном для лампы V9A.

несколькими выводными концами это условие выполнить очень трудно.



Ф и г. 5.2. Тройной электролитический конденсатор.

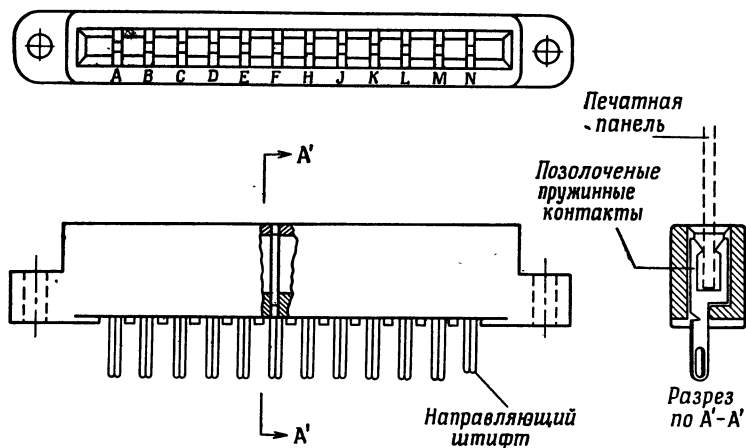
а — приспособленная конструкция; *б* — новая конструкция.



Ф и г. 5.3. Предварительный усилитель звуковой частоты, применяемый в оборудовании для внутренней связи в самолетах.

Изготовлен способом травления фольги и лужением нагретым валиком.

Эти требования определяют в основном конструкцию контактных выводов. Таким образом, большинство специальных элементов, предназначенных для печатных схем, отличается от обычных только конструкцией выводных концов. В качестве примера гораздо более радикального изменения конструкции элементов можно привести блок, показанный на фиг. 5.3, который используют вместе с гнездом особой формы (фиг. 5.4). Здесь



Фиг. 5.4. Печатная штепсельная панель; соединители такого типа используются вместе с панелями, показанными на фиг. 5.3.

Имеются различные типоразмеры с различным шагом контактов. Шаг контактов может быть равен 2,5 и 5 мм, что соответствует повсеместно применяемым модулям для печатных схем. Контакты выполнены из отпущенной пружинистой фосфористой позолоченной бронзы.

обходятся без обычного разъема, а контакты печатаются как часть проводки блока. Чтобы предотвратить повреждение контактов при многократном съеме блоков, их следует слегка подрезать у краев, выходящих на поверхность основания. Для повышения износоустойчивости и антикоррозионной стойкости контакты покрывают электролитическим осаждением золота или серебряно-радиевого сплава. В блоках, которые показаны на фиг. 5.3, вся схема подвергается лужению валиком для упрочения паяных контактов. Некоторые изготовители

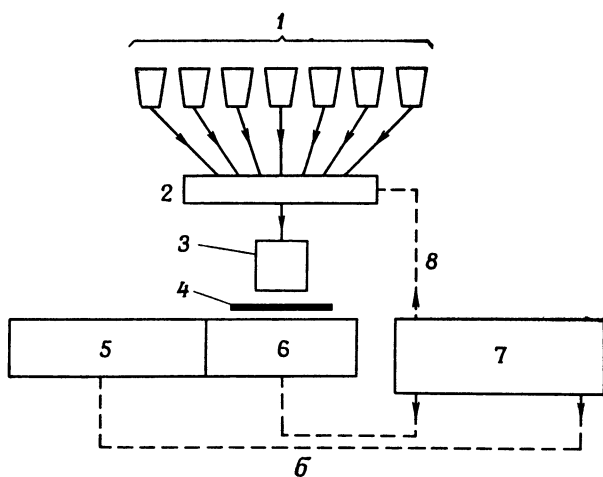
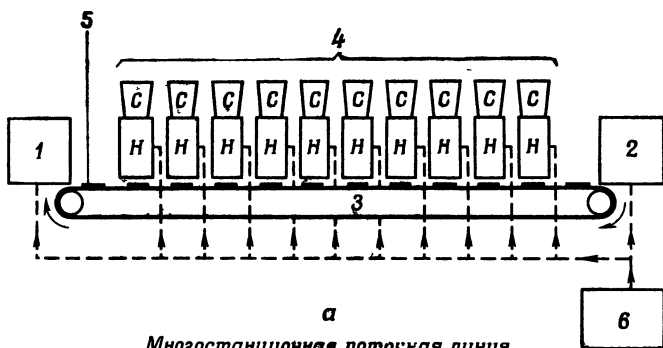
находят, что дополнительная защита лужением контактов вполне достаточна и никакого электролитического осаждения не требуется.

2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СБОРОЧНЫЕ МАШИНЫ

2.1. Общие принципы и классификация [54, 58]

Сборочные машины-автоматы можно разделить на 2 основных типа: многостанционные автоматические поточные линии и одностанционные машины с программным управлением. Основные особенности обоих типов машин схематически иллюстрируются фиг. 5.5. В автоматической поточной линии (фиг. 5.5, а) панели печатных схем транспортируются конвейером с выстоем последовательно на каждой станции, где производится монтаж одного элемента. Число станций, следовательно, соответствует числу монтируемых элементов. В одностанционной машине (фиг. 5.5, б) монтируемые элементы схемы поочередно подаются выборочным механизмом в универсальную монтирующую головку. Специальное позиционное устройство перемещает панель печатной схемы в соответствующее положение относительно монтирующей головки для вставки нового элемента. Последовательность операций контролируется программным устройством. Программа может быть записана на перфорированной ленте, перфокартами или записана на магнитной ленте. При программном управлении возможно выполнение работы полуавтоматическим способом. При этом оператор вручную перемещает щуп поочередно в каждое отверстие в пазах шаблона.

Применение многостанционной машины экономично только при производстве печатных схем большими партиями. Перед каждой новой партией требуется регулировка монтирующих головок (а их, например, 40) и загрузка бункеров головок соответствующими элементами. И хотя процесс регулировки может быть ускорен за счет использования специальных шаблонов, тем не менее он отнимает значительное количество времени. Одностанционная машина, наоборот, подходит для



Одностанционная машина с программным управлением

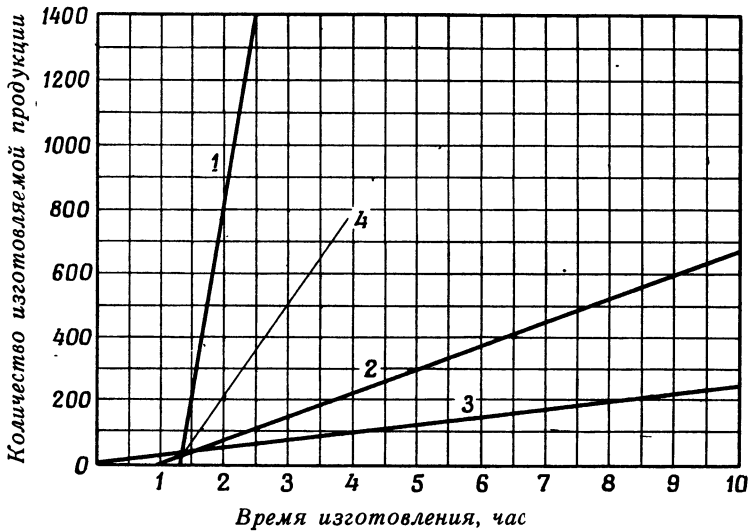
Фиг. 5.5. Принципы работы автоматических монтажных машин.

а. Н—монтажные головки; С—магазины для элементов; 1—подающее устройство; 2—приемное устройство; 3—конвейер; 4—монтажные устройства; 5—панели с печатными схемами, транспортируемыми слева направо; 6—привод (пневматический, электрический или механический).

б. 1—магазин для элементов; 2—селектор элементов; 3—универсальная монтирующая головка; 4—панель с печатной схемой; 5—механизм подачи и приемы; 6—позиционное устройство, устанавливающее панель в положение обработки; 7—программное устройство (с перфокартой, магнитной лентой или др.); 8—управление (электрическое или пневматическое).

сборки схем, выпускаемых небольшими партиями, так как программу можно менять очень быстро.

Производительность одностанционной машины относительно низкая и зависит от числа элементов, подлежащих монтажу. Кроме того, машина имеет сложную конструкцию, специальный механизм подачи и приемки,



Ф и г. 5.6. Сравнительный график производительности трех способов сборки.

1 — многостанционная поточная линия; 2 — ручной монтаж на конвейере; 3 — одностанционная машина с программным управлением; 4 — точка пересечения кривых соответствует изготовлению партии менее 50 шт.

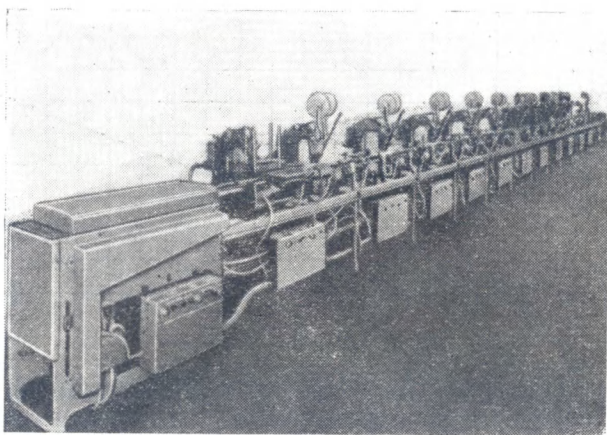
позиционное устройство для изменения положения панели относительно монтирующей головки. Сравнение производительности сборочных машин приведено на фиг. 5.6.

Вообще же производительность машин-автоматов настолько высока, что средний завод, изготавливающий радиоприемники, не смог бы использовать такую машину производительно. Поэтому значительный интерес проявляется к полуавтоматическому способу. При этом

способе машиной, осуществляющей монтаж элементов, управляет оператор. Сначала на все панели одной партии машина монтирует только один элемент, затем машину настраивают на монтаж следующего элемента. Имеются также системы, при которых один оператор управляет четырьмя машинами.

2.2. Автоматическая сборочная машина «Динасерт» [57, 63, 64]

Автоматические сборочные машины получили в США довольно широкое развитие. Обзор по этим машинам,



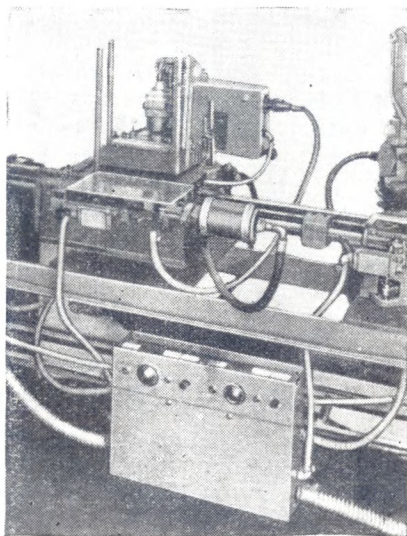
Фиг. 5.7. Автоматическая сборочная машина «Динасерт».

Показан весь конвейер с 14 монтажными головками. Аналогичная машина работает на заводах фирмы «Колстер — Брандз» в Футскрае.

большинство из которых многостанционного типа, читатель может найти в [54]. Здесь мы остановимся на описании одной из этих машин, а именно автоматической машины для сборки.

Машина «Динасерт» (рис. 5.7) состоит из конвейера, установленного по прямой, и смонтированных на

раме монтажных головок. Один конвейер может обслуживать до 40 монтажных головок, а два конвейера, установленные последовательно один за другим, могут обслуживать соответственно 80 монтажных головок. Там, где неэкономично использовать такую мощную установку, число монтажных головок сокращают и элементы



Фиг. 5.8. Устройство, подающее печатные панели, и пульт управления.

монтажируют за два или более прогонов. На фиг. 5.8 показано подающее устройство машины. Панели печатных схем укладываются стопой до 200 шт. в магазин подающего устройства, откуда они отделяются снизу по одной при помощи пневматически управляемых салазок и устанавливаются под головку пневматического пресса, в котором специальная пластина вдвигает панель в рамочную подставку из легкого сплава с подпружиненными зажимами; как только панель установится в рамке, последняя выводится на конвейер. Рамки ис-

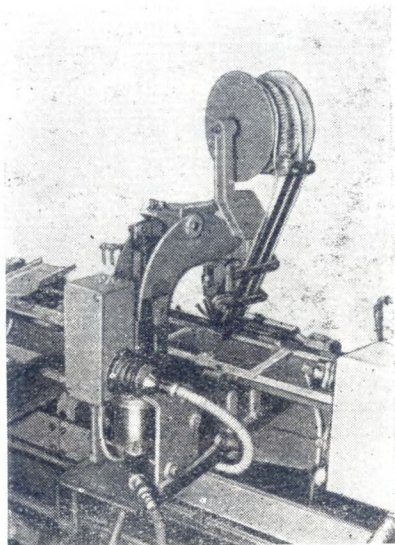
пользуются в качестве держателей для панелей, так как панели из фенольных слоистых материалов имеют тенденцию изменять свои размеры. Подставки обеспечивают точность при установке панели в рабочее положение и позволяют закреплять панели разных размеров и форм. Панель крепится на рамочной подставке при помощи стальных штифтов, которые входят в отверстия, пробитые на панели, и удерживается в рамке при помощи подпружиненных зажимов.

Монтажные устройства можно разделить на три основных группы: *устройства, монтирующие элементы с выводными концами, расположенными по оси элемента* (большинство сопротивлений, многие типы конденсаторов и перемычек); *устройства, которые монтируют элементы с радиальным расположением выводных концов* (некоторые виды конденсаторов, ламповые панели); *устройства для автоматического прикрепления глазков и зажимов к печатным схемам.*

Различие между этими группами устройств заключается в основном в способе подачи элемента в монтажную головку. В первой группе монтажных устройств элементы подаются непрерывной намотанной на барабан лентой, к которой они прикреплены (см. фиг. 5.9 и 5.12). Элементы скрепляются друг с другом при помощи двух пар клейких лент. В каждой паре ленты клейкой стороной обращены во внутрь, так что выводные концы элементов зажимаются между ними. Во второй группе устройств элементы подаются из бункеров или магазинов, а в третьей группе — по подводящему каналу или пластмассовой клейкой лентой.

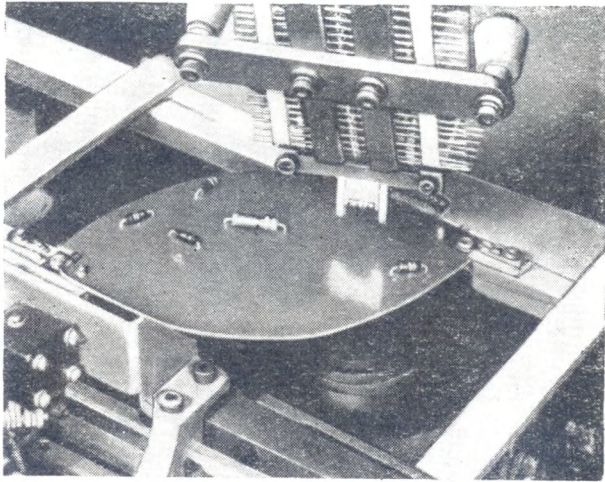
Когда элементы, скрепленные двумя парами клейких лент, поступают в монтирующую головку (фиг. 5.9), резальные устройства отрезают удлиненную часть выводных концов элементов, после чего оставшиеся концы нормальной длины загибаются в виде буквы Г. После загибания концов элемент перемещается вниз и концы его вставляются в панель печатной схемы. Находящиеся под панелью рычаги поднимаются и загибают концы в любом заранее установленном направлении, как показано на фиг. 5.11. Благодаря этой процедуре эле-

менты прочно прикрепляются к основанию, что увеличивает прочность соединения при пайке. Элементы второй группы также могут прикрепляться способом загибания концов. Каждая монтажная головка устанавливается в рабочее положение на раме конвейера одним

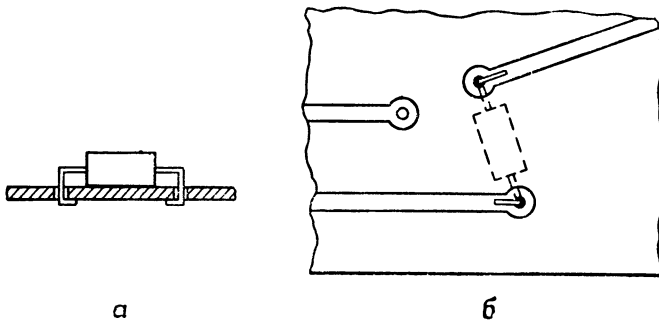


Фиг. 5.9. Головка, монтирующая элементы с выводными концами, расположенными по оси, на основание печатной схемы в конвейере.

зажимным винтом, поэтому ее легко можно снять или изменить ее положение в течение нескольких минут. Монтажную головку можно укрепить в любом положении, удобном для монтажа элемента на панель, так как ее можно поворачивать относительно вертикальной оси вместе с монтирующим устройством. Для облегчения установки монтажной головки в качестве установочного шаблона используют эталонную панель.



Ф и г. 5.10. Монтаж сопротивлений на овальное основание печатной схемы.

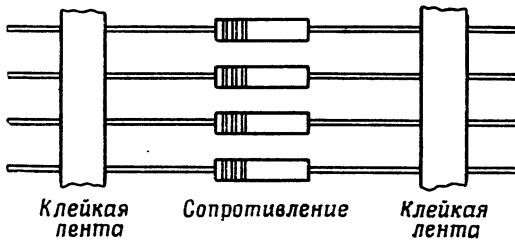


Ф и г. 5.11.

а — разрез основания печатной схемы, на котором показаны загнутые концы элемента; *б* — вид основания снизу.

В конце конвейера установлено приемное устройство, которое отделяет панели от подставок. Затем подставки поступают на ленточный конвейер, проходящий под сборочным конвейером, который транспортирует их к началу линии, где они складываются в стопы для повторного использования.

Все части сборочной машины, осуществляющие возвратно-поступательное движение, приводятся в движение от пневматических устройств, а вращающиеся части — от электродвигателя. При поступлении подставки



Фиг. 5.12. Способ закрепления сопротивлений клейкими лентами, обращенными клейкой стороной друг к другу

на станцию монтажной линии включается микропереключатель; подъем подставки вместе с панелью с конвейера и установка ее в положение для монтажа производится только после того, как сработают микропереключатели всех станций. Рабочие циклы всех монтажных головок синхронизируются при помощи реле времени на центральном пульте управления, который виден на фиг. 5.7. Монтажная линия оборудована несколькими электроблокировками, останавливающими машину в случае серьезных неполадок на какой-либо из станций.

2.3. Требования к автоматическим сборочным машинам [63]

Теоретически можно сконструировать машину, которая будет выполнять любую желательную операцию, однако на практике сложные и дорогие конструкции не-

экономичны. Конструкция машины будет значительно упрощена, если установить следующие требования на изготавливаемую продукцию:

1) размер и форма панелей печатных схем должны быть ограничены и, желательно, стандартизированы;

2) коробление и изгиб не должны затруднять работу простых устройств для установки и закрепления панелей;

3) объемные изменения панелей и приводка печатной схемы относительно отверстий также не должны быть помехой в работе устройств по установке и закреплению панелей;

4) элементы схемы должны быть стандартизированы по размеру и профилю и так сконструированы, чтобы облегчить установку при простом возвратно-поступательном движении монтирующей головки;

5) элементы должны поступать от изготовителя в готовом к загрузке виде (например, укрепленными между клейкими лентами).

Интересно отметить, в какой степени используемые в настоящее время материалы и монтируемые элементы удовлетворяют вышеприведенным требованиям. Основные недостатки самих панелей (предполагается фенольный слоистый материал) следующие:

1) неодинаковое тепловое расширение фольги и слоистого материала; коробление особенно сильно у оснований, лакированных медью только с одной стороны;

2) деформация панели в результате изменения влажности; это может произойти во время процесса обработки или при хранении;

3) деформация панели при горячем способе пробивания отверстий; необходимо учитывать разницу в тепловом расширении штампа и материала основания. Так как поддерживать равномерную температуру нагрева основания довольно трудно, следовательно, трудно получить и соответствующую точность. В этом отношении холодный способ пробивания отверстий имеет определенные преимущества.

Требования к конструкции элементов были приведены выше. Однако при машинной сборке возникают не-

которые дополнительные требования. Так, например, элементы с радиально расположенными выводными концами (например, проволочные сопротивления), как правило, монтировать труднее, чем элементы с концами, расположенными по оси. Желательно также стандартизировать профиль элементов и диаметр выводимых концов. Элементы с несколькими выводными концами монтировать труднее, даже если концы имеют форму жестких наконечников или штифтов. Очень важно точное расположение штифтов относительно корпуса элемента и точная их ориентация. Улучшение упаковки элементов позволит упростить конструкцию магазинов, подающего механизма и самой монтирующей головки. Выше уже описывался способ упаковки элементов между клейкими лентами; можно использовать также элементы, смонтированные в пластмассовую ленту или упакованные в металлические или пластмассовые контейнеры.

3 ПАЙКА В ВАННЕ [23, 54, 61, 68—73, 97]

3.1. Классификация и общие требования

Способы пайки в ванне можно классифицировать по характеру контактирования панели с припоем.

1. **Полное погружение.** Этот способ обеспечивает наилучшее соединение, но используется редко из-за температурных ограничений со стороны элементов.

2. **Контакт одной стороны панели с припоем.** Это наиболее часто применяемый способ. Элементы смонтированы на верхней стороне панели, а их концы выведены через отверстия в панели на обратную сторону. Обратная сторона, которая несет на себе печатную схему, приводится в контакт с припоем способом, который будет описан ниже.

3. **Погружение краев панели.** Все концы элементов соединяются с проводниками печатной схемы на длинных краях панели или вблизи от них. Пайка производится путем погружения двух длинных краев панели в паяльную ванну.

Для всех способов пайки в ванне характерны следующие затруднения.

1. **Химическое загрязнение флюсом.** Слоистые материалы, как известно, легко поддаются химическому загрязнению.

2. **Перегрев панели печатной схемы.** Следует строго контролировать температуру и продолжительность контакта паяльной жидкости с основанием, иначе может иметь место образование раковин (вспучиваний и др.). Керамические и некоторые слоистые материалы из стекловолокна выдерживают высокую температуру лучше, чем обычные фенольные материалы.

3. **Плохое качество пайки.** Если концы элементов, смонтированных на панели, не загнуты или не закреплены каким-либо другим способом, то они могут оказаться неспаянными с проводниками печатной схемы.

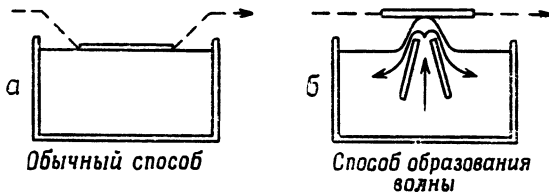
Трудности, присущие пайке в ванне, заставляют отказаться от применения этого способа при изготовлении высокопрочного оборудования; в этом случае обычно применяют ручную пайку с индивидуальной проверкой каждого соединения. Но при изготовлении бытового оборудования способ пайки в ванне широко применяется, и его применение, несомненно, будет возрастать.

3.2. Пайка при контактировании одной стороны панели с припоем

Машина для пайки в ванне (фиг. 5.13, а) должна иметь терморегулятор для поддержания постоянной температуры припоя (например, 240°С), а также механизм опускания панели печатной схемы до соприкосновения с припоем и подъема панели через заданный промежуток времени (как правило, через 5—10 сек). Панель может устанавливаться в рабочее положение и другим способом, когда она перемещается в горизонтальной плоскости, а ванна с припоем автоматически поднимается до контакта припоя с панелью.

Основным недостатком этого способа является образование перемычек между расположенными рядом проводниками. В большинстве машин, описанных в техни-

ческой литературе, эта проблема разрешается путем опускания панели в припой под углом, например, 30° . Панель плавает по поверхности припоя, при этом ее обычно перемещают с места на место для более равномерного распределения припоя. Благодаря расположению панели под углом и сильному встряхиванию при ее подъеме большие капли припоя, из которых могут образоваться перемычки, удаляются.



Фиг. 5.13. Пайка в ванне.

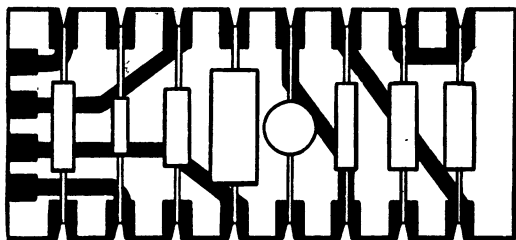
Сравнение пайки обычным способом и способом образования волны.

Вышеизложенный способ привел к разработке метода пайки волной [69], показанного на фиг. 5.13 б. При этом способе панель с печатной схемой перемещается вдоль ванны над волной расплавленного припоя, которая образуется при выбрасывании металла через специальные сопла. Панель, перемещаясь по прямой, остается все время в горизонтальном положении, а необходимое условие контактирования панели и припоя под углом обеспечивается самой формой волны. Машины для пайки этим способом изготавливаются в Англии.

Одним из преимуществ этого способа пайки является непрерывное перемешивание припоя при подаче его в сопла из середины ванны. Перемешивание устраняет образование окислов и способствует поддержанию постоянной температуры. В других случаях поверхность припоя защищают от окисления раскислителем, например пальмовым маслом или другим подобным составом (например, мультикор-РС40).

3.3. Пайка в ванне краев панели

Пайка в ванне краев панели имеет некоторые преимущества. Прежде всего обе стороны панели могут нести на себе как печатную схему, так и элементы. Кроме того, почти полностью устраняются проблемы химического загрязнения и образования перемычек. На фиг. 5.14 показан один из видов конструкции — панель



Ф и г. 5.14. Способ монтажа элементов при пайке в ванне краев основания.

Выводные концы элементов загибаются вокруг краев основания через прорези, предусмотренные в основании. При пайке с припоем контактируют только края основания

с прорезями [68]. Такую панель можно изготовить из любого материала, в том числе из керамики и слоистых материалов. Элементы помещают вместе с панелью в специальное зажимное устройство, которое производит загибание концов в прорези за края основания, одновременно прикрепляя элементы к основанию.

Этот способ очень удобен при изготовлении небольших разъемных блоков для оборудования, снабженного транзисторами. Однако он неудобен для монтажа электронных ламп; здесь одним из способов является использование специальных ламп, прикрепляемых к основанию соответствующими зажимами.

3.4. Способы повышения прочности пайки [95]

1. Предварительное лужение или гальванопокрытие. Чтобы обеспечить прочное соединение, желательно при-

менять высокоактивный флюс. Однако применение такого флюса приводит к химическому загрязнению слоистых материалов. Это можно в значительной степени предотвратить путем нанесения на проводники перед погружением в паяльную ванну соответствующего металла (способом электролитического осаждения или нанесением припоя).

Электролитическое осаждение можно с успехом осуществлять двумя способами: либо проводники покрывают тонким слоем золота, либо на проводники электролитическим способом осаждают припой. Способ электролитического осаждения припоя не всегда экономически себя оправдывает и, кроме того, сам процесс может явиться причиной химического загрязнения. Поэтому чаще всего предпочитают применять припой. Нанесение припоя обычно выполняют при помощи нагретого валика, благодаря чему окисная пленка на поверхности проводника разрушается и устраняется необходимость в применении высокоактивного флюса. Кроме того, остатки флюса можно смыть гораздо быстрее после простого лужения, чем после пайки в ванне, когда на основании печатной схемы уже имеются элементы.

2. Загибание концов элементов (фиг. 5.11). После вставки концов элементов в отверстия основания элементы нужно прочно закрепить путем загибания их концов, иначе любой нажим на элемент будет передаваться на концы его и приводить к отслаиванию фольги. Однако нежелательно, чтобы элементы монтировались близко к основанию, так как это приводит к образованию ловушек для влаги. Во избежание этого перед вставкой концов в отверстия создают гофры на выводных концах вблизи тела элемента.

3. Металлизация отверстий. Такое же или даже более прочное соединение можно получить без загибания концов, если внутренняя поверхность сквозного отверстия в основании покрыта медью. В этом случае припой затекает в отверстие (по закону течения жидкости в капиллярах) и заклинивает в нем конец элемента. При способе электролитического осаждения печатной схемы металлизация сквозных отверстий производится

без дополнительных затрат. Этот способ можно, конечно, использовать в сочетании с любым другим способом нанесения печатной схемы, но тогда металлизация отверстий составит дополнительную операцию.

4. Использование глазков. Результаты, аналогичные вышеуказанным, можно получить при использовании глазков. Очень важно так сформировать глазки, чтобы флюс не оставался между головкой глазка и печатным проводником, так как в противном случае получаются контакты с высоким проходным сопротивлением. Одним из способов, дающих хорошие результаты, является пайка головки глазка к печатному проводнику во время операции формирования [65].

5. Выборочная пайка. При этом способе во время пайки в ванне поверхность основания, входящую в контакт с припоем, частично защищают при помощи маски. Маска может быть изготовлена либо из листа бумаги с соответствующими прорезями, который после пайки удаляют, либо ее можно выполнить нанесением постоянного защитного слоя смолы. В обоих случаях это делается для ограничения пайки только необходимыми участками. Способ имеет несколько преимуществ: экономится припой, предотвращается образование перемычек между проводниками, ограничивается нагрев основания при пайке.

4. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ [9,74—80]

Часто на промежуточных стадиях изготовления печатных схем применяют защитные покрытия, чтобы предотвратить химическое загрязнение и коррозию в процессе обработки и хранения. Желательно, чтобы такое покрытие было совместимо с применяемыми паяльными флюсами. Имеется целый ряд защитных материалов, отвечающих этому требованию, например, покрытие ТСС типа DS99 и Мультикор типа PC10A.

На печатные схемы, используемые в приборах бытового назначения, желательно наносить предохранительное покрытие после их сборки и пайки в ванне, чтобы

предотвратить абсорбирование влаги основанием и образование грибковой плесени [87, 93]. Серебряные схемы на керамических основаниях обычно покрывают с оборотной стороны фенольной смолой, а затем пропитывают воском в вакууме. Такая отделка напоминает по внешнему виду вощеные конденсаторы. В качестве защитного покрытия может служить также пленка термопластичного материала с высокой точкой плавления, такого, как Kel-F или «Мелинекс». Слоистые материалы покрывают смолой, затвердевающей в холодном состоянии; обычно это немодифицированная эпоксигруппа без растворителя [97]. Выбор соответствующего защитного покрытия следует производить с большой осторожностью; при неправильном выборе материала можно нанести больше вреда, чем пользы. К защитному покрытию предъявляются следующие требования.

1. Защитное покрытие должно быть совместимо с материалами, используемыми для печатной схемы и ее отдельных элементов. Например, медь замедляет некоторые процессы полимеризации, а растворитель, содержащийся в защитном слое лака, может реагировать с материалами изоляционного основания или элементами схемы.

2. Температура вулканизации не должна превышать температуру, предельно допустимую для элементов и самого основания.

3. Защитный слой рекомендуется наносить на печатную схему в вакууме, чтобы устранить возможность появления воздушных пузырьков и остатков влаги в панели.

4. Сцепление защитного слоя с основанием должно быть прочным.

5. Защитное покрытие должно быть невосприимчивым к влаге и образованию грибковой плесени.

6. Защитное покрытие должно обладать соответствующими электрическими свойствами.

7. Желательно, чтобы защитное покрытие было прозрачным и позволяло различать цветовое кодирование, обозначения навесных элементов и т. д.

8. Защитное покрытие должно быть нанесено так, чтобы оставалась возможность демонтировать и заменять элементы без повреждения покрытия.

Последним интересным нововведением в этой области [81] является использование тонкого гибкого слоя полисульфидного каучука, наносимого щеткой или способом пульверизации. Прочность сцепления этого покрытия с металлом и пластмассой очень велика. Так как этот изолирующий слой мягкий и упругий, его можно срезать ножом при смене элементов и вновь наращивать аппликацией, которая прочно прикрепляется к старому слою. Основным недостатком являются более низкие электрические свойства этого материала по сравнению с обычной вулканизированной смолой.

ЧАСТЬ II

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ПРИМЕНЕНИЕ



Scan AAW

Глава VI

ПОДГОТОВКА ОРИГИНАЛА ПЕЧАТНОЙ СХЕМЫ

За очень небольшим исключением первым шагом в изготовлении печатной схемы является подготовка черно-белого оригинала. Обычно он представляет собой чертеж, на котором металлические участки вычерчиваются черным. Затем этот чертеж фотографируют и изготавливают негатив на пленке или стекле. Изготовление копии с этого негатива можно производить одним из четырех основных способов, перечисленных ниже.

Изготовление печатной схемы непосредственно с негатива. В случае применения фотомеханического травления негатив можно использовать таким, какой он есть, т. е. без каких-либо дополнительных операций, кроме подготовки других экземпляров негатива, если это нужно.

Трафаретная печать. Негатив можно использовать для изготовления печатных форм для трафаретной печати, как описано в гл. I.

Офсетная печать. Для способа офсетной печати требуется специальная литографская форма, изготавливаемая из цинка, алюминия, пластмассовой пленки или бумаги. Цинковые формы, имеющие наиболее широкое применение, изготавливаются обычным фотолитографским способом путем контактной печати с негатива схемы.

Изготовление матриц для штамповки и тиснения. Эти матрицы, изготавливаемые обычно из нержавеющей стали, могут быть в некоторых случаях получены гравированием.

1. ОБЫЧНЫЙ МЕТОД ВЫЧЕРЧИВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ СХЕМ

Для изготовления чертежей можно использовать бристо́льский картон хорошего качества и тушь. Бристо́льский картон предпочитают обычной чертежной бумаге по следующим причинам: он имеет более тщательно отделанную поверхность, обладает лучшей контрастностью, поставляется в виде плоских листов и не мнется. Однако это не очень стабильный материал, так как он может изменять свои размеры в зависимости от температуры и влажности. Если чертеж фотографируют сразу же после изготовления и потом работают с фотокопией, то последнее обстоятельство не имеет существенного значения. Но в тех случаях, когда устойчивость размеров имеет важное значение, рекомендуется использовать какой-либо специальный материал, например чертежный картон DS фирмы «Кодак». Эта бумага на алюминиевой основе поставляется в рулонах шириной 50,4 см и длиной 7,6 м с более тщательной отделкой поверхности, чем у бристо́льского картона.

Поверхность не должна быть чрезмерно блестящей, так как это затрудняет получение удовлетворительного освещения чертежа при фотографировании. По той же причине краску нужно наносить равномерно и следить за тем, чтобы толщина слоя была одинаковой. Исправление чертежа производится при помощи белил или путем удаления линий резинкой или ножом. Так как краска имеет тенденцию растекаться за пером в количестве, которое трудно проконтролировать, то вряд ли удастся получить допуск по толщине линии меньше чем $\pm 0,25$ мм. Имеются специальные перья, которые обеспечивают более равномерную подачу краски, но для опытного чертежника они не дают больших преимуществ. Поэтому, как правило, схему чертят по крайней мере с четырехкратным увеличением. Это, однако, не всегда возможно, так как в репродукционную фотокамеру нельзя поместить чертежи, превышающие определенный размер, а обычные репродукционные фотоаппараты имеют размеры не больше 60×60 см². В аппаратах, предназначенных специально для работ с

печатными схемами, можно, разумеется, фотографировать чертежи и гораздо больших размеров.

В тех случаях, когда необходимо точно выдержать ширину линий, целесообразнее использовать специальный материал, широко применяемый в рекламной



Фиг. 6.1. Изготовление оригинала схемы с помощью скребка.

Черное покрытие удаляют путем протягивания скребка по поверхности.

практике, который состоит из мелованной картонной подложки, покрытой слоем черной краски. На фиг. 6.1 показан поперечный разрез пластинки из этого картона и обычный скребок. При помощи этого скребка, который благодаря точной машинной обработке может иметь любую ширину, соответствующую ширине проводника, одним движением удаляют черную краску, чтобы

обнажить белый слой. Если допущена ошибка, поверхность можно закрасить тушью. Целесообразно изготовить комплект скребков, по одному для каждой ширины проводника. Четкость и точность линии при этом методе изготовления оригинала выше, чем при работе пером и тушью. Если схема состоит главным образом из прямолинейных проводников, этот метод, вероятно, более продуктивный, чем вычерчивание пером и тушью.

2 ДРУГИЕ МЕТОДЫ ВЫЧЕРЧИВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ СХЕМ

Чтобы сделать процесс вычерчивания схемы менее трудоемким [54], были разработаны различные методы. В простейшем случае для нахождения центров деталей, имеющих несколько выводов, таких, например, как ламповые панели и другие, можно подготовить трафареты. Там, где принят прямоугольный модуль, чертежную доску можно приспособить таким образом, чтобы линейки, угольники и другие чертежные принадлежности можно было передвигать только на определенные расстояния. Другой метод заключается в том, что используют специальную чертежную бумагу, на которой слабыми линиями соответствующего цвета нанесена сетка, не воспроизводящаяся при последующем фотографировании. При работе по более совершенному методу изготавливают чертеж-образец в два раза большего размера, на который в местах, подлежащих сверлению, нанесены черные кружки. На этот чертеж накладывают прозрачную пленку, на которой вычерчены нужные соединения схемы, и весь монтаж фотографируют. Ненужные отверстия с полученного негатива удаляют.

Этот процесс можно еще упростить, если использовать черную липкую ленту для обозначения проводников и черные липкие диски — для выводов. Рекомендуется, чтобы диски имели в середине белое отверстие для центрирования и лента была достаточно гибкой для правильного воспроизведения кривых или прямых линий. Существует более механизированный вариант этого метода; на белом листе алюминия высверливают слепые

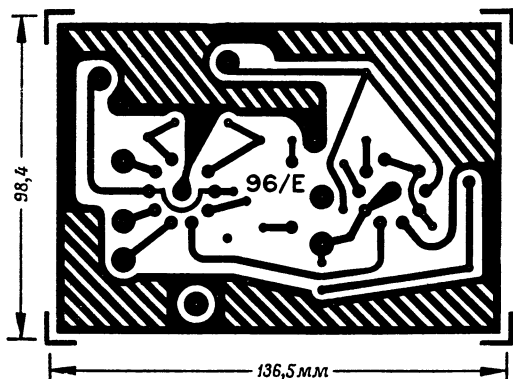
отверстия в каждом возможном месте. В соответствующие отверстия вставляют черные пластмассовые диски, а остальные отверстия закрывают белой маскировочной лентой. Черная липкая лента укладывается между выводами, изображая проводку.

3 РАЗМЕТКА СХЕМЫ

Разметка схемы должна быть выполнена очень тщательно. Наибольшая и самая серьезная трудность связана с необходимостью избежать перекрестных соединений. В тех случаях, когда изоляционное основание запечатано с двух сторон, такие перекрестные соединения можно осуществить сравнительно экономично; это в первую очередь относится к печатным схемам, выполненным способом электролитического осаждения на основания, в которых уже имеются сквозные отверстия. Поэтому дополнительные расходы связаны лишь с пробиванием отверстий. Если основание запечатано только с одной стороны, то для каждого перекрестного соединения необходим специальный провод и, следовательно, дополнительная операция при окончательной сборке. Монтаж перекрестных соединений можно в значительной мере упростить путем соответствующего подбора и расположения деталей.

Большое значение имеют также ширина проводников и расстояние между ними. Для сильноточных цепей может быть необходимой ширина проводников 3,2 или даже 6,4 мм, хотя обычно она не превышает 1,6—3,2 мм. Минимальная рекомендуемая ширина — 0,38 мм. Расстояние между проводниками обычно должно быть не меньше 0,8 мм, но лучше 1,6 мм, иначе могут возникнуть трудности при пайке методом погружения. При расчете расстояния между проводниками нужно также учитывать поверхностное сопротивление основания в соответствии с требованиями к схеме при наиболее неблагоприятных климатических условиях, в которых она должна работать, однако учесть это довольно сложно. Тем не менее следовало бы принять, что сопротивление между двумя параллельными проводниками длиной

152,4 мм каждый при расстоянии между ними 1,6 мм должно быть не менее 20 Мом. Для более коротких или более удаленных друг от друга проводников допустимое сопротивление следует увеличивать примерно пропорционально. В обычных условиях, например в условиях бытового использования, измеренное поверхностное сопротивление может быть гораздо выше 50 000 Мом.



Ф и г. 6.2. Образец чертежа.

Там, где пиковое напряжение между проводниками превышает 150 в (DG 5007), рекомендуется минимальное расстояние $0,72 + V^2/72 \cdot 10^6$ мм.

Диаметр участков, предназначенных для установки соединительных контактов, должен превышать диаметр отверстия для контактов не менее чем на 1,3 мм.

Рекомендуются следующие диаметры отверстий в основании для крепления и соединения деталей: 1,0; 1,3 и 2,0 мм с допуском $\pm 0,1$ мм.

Если на изоляционном основании получаются большие участки, покрытые металлом, то их площадь следует уменьшить подобно тому, как это показано на фиг. 6.2.

В идеальном случае ширина и общее направление медных полос должны быть такие же, как у проводников. Это обеспечивает возможность быстрого нагрева

металлического рисунка в паяльном растворе и равномерное нанесение припоя по всей поверхности. Кроме того, предотвращается тепловая деформация основания.

Следует также принимать во внимание требования модульного построения схемы и учитывать возможность автоматических сборочных машин. Нужно учитывать также влияние механической вибрации и ударов в процессе эксплуатации. Панели больших размеров имеют тенденцию к изгибу, поэтому размещение элементов, чувствительных к прогибу панели, требует особого внимания. Поэтому почти всегда предпочитают работать с несколькими панелями меньших размеров, чем с одной большой. Следует обращать внимание на монтаж таких деталей, как штепсельные разъемы, ламповые панели и др., которые в процессе эксплуатации подвергаются действию отрывающих сил.

Там, где требуется точность, например, при работе с тензометрами и микроволновыми схемами, следует обеспечить соответствующий допуск на изменения, происходящие в процессе печати. Так, при травлении фольги наблюдается тенденция травящего раствора подтравливать фольгу на конце проводника (фиг. 6.3). В результате этого уменьшается эффективная ширина проводника, при этом уменьшение может достигать нескольких десятитысячных дюйма или даже значительно большей величины в зависимости от толщины фольги и характера процесса травления. В принципе это можно учесть при выполнении чертежа схемы, вычерчивая проводники несколько шире, чем требуется.



Фиг. 6.3. Подтравливание проводника в процессе травления фольги.

Коэффициент травления, являющийся отношением глубины травления к подтравливанию, обычно больше трех. Более низкие коэффициенты (т. е. большее подтравливание) будут наблюдаться, если основание оставляют в травильном растворе дольше, чем следует.

4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ, КОТОРЫЕ СЛЕДУЕТ ВКЛЮЧИТЬ В ЧЕРТЕЖ

На чертеже схемы, кроме основных деталей, должны быть нанесены:

1. *Изготовитель и наименование продукции.* Размер и толщина надписей должны быть совместимы со шкалой чертежа так, чтобы их можно было читать после уменьшения (т. е. высотой не менее 2,5 мм).

2. *Цифры, показывающие степень уменьшения.* Недостаточно только установить нужную степень уменьшения, необходимо также для контроля указать окончательный размер схемы (см. фиг. 6.2).

3. *Метки для обреза.* Их особенно необходимо нанести, если обрезка осуществляется вручную (см. фиг. 6.2).

4. *Центры отверстий.* Для ручного пробивания или сверления отверстий следует наметить их центры. Лучше, однако, вычерчивать кружки, внутренний диаметр которых на 0,8 мм меньше диаметра сверла или инструмента для пробивания отверстий. Для разметки центров отверстий на черном участке схемы следует оставить белые кружки, диаметр которых на 0,4 мм меньше диаметра отверстия. При желании диаметр сверла или инструмента для пробивания отверстия можно указать рядом с центром отверстия.

5) *Установочные метки* для правильного размещения панели при отделочных операциях, следующих за печатанием. Соображения, указанные выше, следует учитывать и при получении центров отверстий.

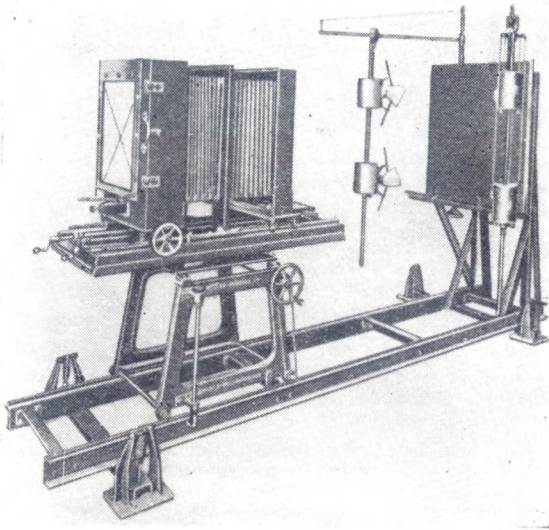
5. АППАРАТЫ И ТЕХНИКА ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Фоторепродукционное оборудование, используемое в цинкографии, с некоторыми усовершенствованиями или без них может быть применено и при изготовлении печатных схем.

На практике для фотографирования используются горизонтальный репродукционный фотоаппарат и копировально-множительная машина.

Репродукционный аппарат (фиг. 6.4), используемый при фотографировании печатных схем, отличается от

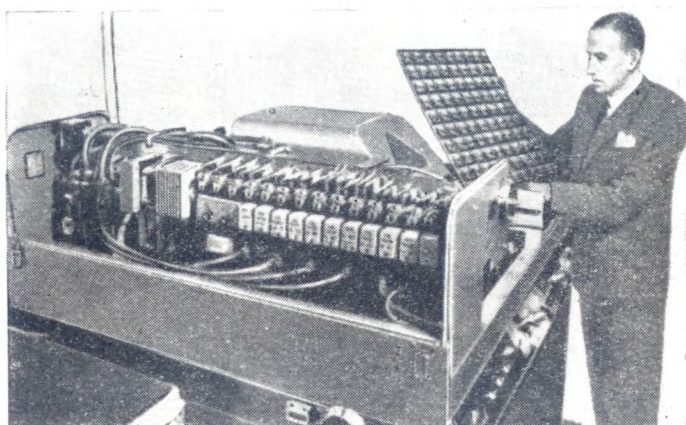
цинкографского отсутствием оборачивающей системы. Копировально-множительная машина позволяет получить серию негативов одного и того же чертежа на одном листе; при каждой последующей экспозиции происходит смещение либо в горизонтальном, либо в вертикальном направлении по отношению к предыдущему



Фиг. 6.4. Стандартный горизонтальный репродукционный фотоаппарат размером от 25×30 до 75×100 см с дуговыми осветительными устройствами.

положению. Эта машина широко используется при производстве чеков, где название банка или другие надписи повторяются на лицевой стороне чека много сот раз. Особое применение находит копировально-множительная машина в цинкографии, где в интересах экономии необходимо использовать большие листы слоистого материала с медным покрытием и печатать одновременно достаточное количество идентичных схем. Иногда для

изготовления печатных схем разрабатывается и используется специальное фотографическое оборудование. Так, фирма «Фотосеркит» (США) использует специальные фотоаппараты, позволяющие работать с очень большими чертежами [26] и обеспечивающие равномерное освещение оригинала. Две флуоресцентные лампы, смонти-



Фиг. 6.5. Копировально-множительная машина с электронным управлением.

рованные вертикально на каретке, непрерывно перемещаются поперек поля аппарата с помощью электромотора. Лампы находятся на расстоянии 152,4 мм друг от друга и со стороны фотоаппарата закрыты черным; остается незакрытой лишь вертикальная щель между ними. Таким образом, изображение попадает в камеру только через эту щель и негатив экспонируется последовательно от одного края до другого по мере перемещения источника света поперек оригинала, установленного в вертикальном оригиналодержателе.

На фиг. 6.5 показана специальная копировально-множительная машина с электронным управлением, которая работает на предприятии фирмы «Плазмет» (Лондон). Эта машина позволяет производить ступенчатое

копирование на лист форматом 61×46 см с точностью до 0,005 мм на расстоянии 61 см. Особый интерес представляет то, что эта машина может быть использована для получения цинкографским путем установочных меток для пробивания отверстий в запечатанном слоистом материале. Высокая точность изготовления машины обеспечивает хорошую приводку всего комплекта в процессе копирования.

Глава VII

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ СХЕМ

Совершенно очевидно, что сам печатный процесс в значительной мере определяет материалы, которые могут быть использованы для металлической схемы и изоляционного основания. Не исключено, однако, что метод, правильный во всех прочих случаях, применяется для материалов, которые сами по себе или в сочетании с другими материалами имеют характеристики, неблагоприятные для обычного использования. Примером этого может служить метод вжигания серебра в керамику. По целому ряду причин в качестве пигмента для проводящей краски другим металлам предпочитают серебро, а практически единственным диэлектриком, который может противостоять высоким температурам, необходимым для удовлетворительного закрепления серебра, оказалась керамика. В сочетании эти материалы обладают целым рядом благоприятных характеристик, а именно: хорошими электрическими свойствами, очень высокой силой сцепления, низкой влагопоглощающей способностью и широким температурным диапазоном. Однако из-за трудности изготовления размер керамических пластин ограничивается несколькими квадратными дюймами; кроме того, при неблагоприятных условиях обработки может иметь место миграция серебра, которая иногда вызывает полное разрушение изоляции схемы. В настоящее время основным недостатком считается ограниченность размера. Что касается миграции серебра, то ее можно в значительной мере уменьшить, если пропитать панель соответствующим

влагонепроницаемым веществом в вакууме, но при этом ухудшаются другие характеристики, а именно диэлектрические свойства и температурный диапазон. Таким образом, несмотря на огромные усилия специалистов США максимально расширить сферу применения схем, полученных методом вжигания серебра в керамику, их промышленное использование фактически ограничено производством небольших узлов, таких, например, как межкаскадные узлы связи.

Многие пластические материалы, поставляемые в виде листов, например полистирол и политетрафторэтилен (ПТФЭ), обладают отличными электрическими свойствами и низкой влагопоглощающей способностью. Однако, как правило, такие материалы обладают слабой адгезией к металлическим покрытиям и, за исключением названных материалов, имеют низкую точку размягчения, что делает их непригодными к употреблению. По этой причине обычно предпочитают использовать слоистые пластики, причем необходимая механическая прочность достигается за счет введения таких, например, волокнистых материалов, как бумажное или стекловолокно. Чаще всего используется фенольный слоистый материал, толщина которого может быть самой разнообразной. Там, где приходится работать в условиях высоких температур, и в тех случаях, где необходимы высокие электрические свойства, можно использовать один из многочисленных слоистых материалов из стекловолокна, пропитанного смолой. Благодаря неоднородности своей структуры все слоистые материалы обладают относительно большой влагопоглощающей способностью, в результате чего они довольно легко поглощают химические загрязнения во время таких процессов, как химическое травление, электролитическое осаждение, плавление и т. д. В присутствии влаги возникает ионная проводимость, вызванная загрязнениями, в результате чего снижается эффективное сопротивление изоляции схемы. Эту трудность можно преодолеть только путем тщательного контроля процесса. На ранних же этапах развития техники изготовления печатных схем приходилось сталкиваться со столь значи-

тельными затруднениями, что из-за указанных свойств картон считался вообще практически непригодным. Помимо сведений о явлениях загрязнения, поглощения влаги, миграции серебра, воздействия пайки на силу сцепления и т. д., в этой главе приводятся основные данные об электрических и механических свойствах материалов, которые должны помочь проектировщику в выборе соответствующих материалов в каждом отдельном случае.

1. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ [84]

Керамические материалы целесообразно классифицировать по 4 группам:

- 1) материалы с диэлектрической постоянной меньше 12;
- 2) материалы с диэлектрической постоянной больше 12;
- 3) материалы с пьезоэлектрическими свойствами;
- 4) материалы с ферромагнитными свойствами.

Однако все эти материалы имеют одно общее свойство: их получают из земельных неорганических материалов, и для того чтобы они окончательно затвердели, их подвергают обжигу или спеканию при высоких температурах.

1.1. Материалы с относительной диэлектрической постоянной меньше 12

К керамическим материалам этой категории относятся обычные электротехнические фарфоры, применяемые для изготовления изоляторов высокого и низкого напряжений, стекловидные материалы, используемые в высокочастотных устройствах (например стеатит), и огнеупорные керамические материалы для вакуумных ламп. Несмотря на то, что большинство этих материалов может быть без труда металлизировано, для изготовления печатных схем широко используется только стеатит. Основные свойства стеатита приведены в табл. 7.1. Помимо хороших электрических и механических характеристик, он не имеет себе равных по экономичности, особенно при обработке тех изделий, которые могут быть

получены либо путем автоматической сухой прессовки, либо экструзией.

Это объясняется тем, что в качестве основного сырья используется стеатит $(\text{OH})_2\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}$, который предста-

Таблица 7.1

Свойства некоторых керамических материалов

Материал	Стеатит	Двуокись титана, титановая керамика
Применение	Высокочастотная изоляция	Керамические конденсаторы, пьезоэлектрические керамические материалы
Удельный вес, г/см^3	2,5—2,7	3,5—5,5
Поглощение воды, %	0,0	0,0
Коэффициент линейного теплового расширения, 20—700, °C	$(8,6—10,5) \cdot 10^{-6}$	$(7,0—10,0) \cdot 10^{-6}$
Допускаемая температура обработки, °C	1000—1100	—
Предел прочности при растяжении, кг/см^2	562—703	281—703
Предел прочности при сжатии, кг/см^2	4570—9140	2810—8430
Предел прочности при изгибе, кг/см^2	1124—1687	703—1546
Ударная вязкость, кгм/см^2	$(0,6—0,8) \cdot 10^{-6}$	$(0,6—1) \cdot 10^{-6}$
Модуль упругости, кг/см^2	$(0,9140—1,0546) \cdot 10^6$	$(0,7031—1,0546) \cdot 10^6$
Электрическая прочность (для 6-миллиметрового образца), в/мм	8000—12000	2000—12000
Удельное сопротивление при комнатной температуре, ом/см^3	$10^{13}—10^{15}$	$10^8—10^{15}$
Диэлектрические потери, $\text{tg } \delta$	0,0008—0,0035	0,0002—0,0500
Диэлектрическая постоянная	5,5—7,5	15—10 000

вляет собой легко добываемый мягкий минерал, не вызывающий чрезмерного износа штампов и инструментов. Из сырья, в состав которого входят также глинозем и окиси щелочноземельных металлов в качестве флюсов, изготавливают изделие и затем обжигают его при температуре около 1300°C . После обжига его структура представляет собой главным образом тесно сросшиеся кристаллы метасиликата магния (MgSiO_3). Обработанный

Таблица 7.2

Влияние температуры и частоты на свойства керамических материалов с диэлектрической постоянной меньше 12

Параметр	Переменный фактор	Средний результат
Диэлектрическая постоянная	Частота	При изменении частоты от постоянного тока до 10^8 гц остается приблизительно постоянной; при значениях выше 10^8 постепенно падает. При 10^{10} гц снижается на 10%
	Температура	Приблизительно постоянна до критической температуры, которая колеблется от 150 до 300°C в зависимости от материала. При температурах, превышающих критическую, резко возрастает
Диэлектрические потери, $\text{tg } \delta$	Частота	Приблизительно постоянна в интервале $10^4 \div 10^8$ гц. При низких частотах, например 100 гц, может увеличиться в 3 раза. При сверхвысоких частотах, например 10^{10} гц, возрастает или понижается в зависимости от типа материала
	Температура	Возрастает в среднем в 10 раз при повышении температуры на каждые 100°C

стеатит тверже стекла; шлифовать его поверхность можно лишь карборундовыми или алмазными дисками, а сверлить — ультразвуком. Следовательно, придание формы изделию или механическая обработка должны производиться тогда, когда материал находится еще в необожженном состоянии.

По сравнению с другими некерамическими материалами, используемыми для печатных схем, стеатит имеет еще некоторые преимущества: очень низкую поглощающую способность по отношению к влаге, а также то, что с ним можно работать в очень широком температурном диапазоне. По своим электрическим свойствам он равноценен лучшим материалам из стеклянного волокна (а именно материалу ПТФЭ) и уступает только полистиролу. Однако самым серьезным недостатком является ограниченный размер стеатитовых пластин; изменения в размерах и деформация, вызываемые сжатием в процессе обжига, ограничивают размер пластин до 5×5 см.

Влияние температуры и частоты на электрические свойства стеатита показано в табл. 7.2 и в работе [84].

1.2. Материалы с диэлектрической постоянной больше 12

В эту группу в основном входят минерал рутил (TiO_2) и титанаты (окиси титана и других металлов). Варьируя состав, можно получить целый ряд керамических материалов для специальных целей с ярко выраженными диэлектрическими свойствами. Основные свойства этих материалов приведены в табл. 7.1.

Ассоциация фабрикантов радиоэлектронной и телевизионной аппаратуры (см. Приложение 1) сделала попытку более четко определить эти свойства, подразделив их на две группы соответственно для двух классов материалов, как это видно из табл. 7.3.

Керамические материалы I класса пригодны для применения в тех случаях, когда важны прежде всего высокий Q -фактор и стабильность диэлектрической постоянной. Путем изменения состава можно добиться

изменения температурных коэффициентов от положительного через нуль к отрицательному.

Таблица 7.3

Классификация керамических материалов с высокой диэлектрической постоянной

Категория	Класс I	Класс II
Диэлектрическая постоянная	6—500	500—10 000
Температурный коэффициент емкости	От положительного через нуль к отрицательному	См. текст
Диэлектрические потери, $\operatorname{tg} \delta$	0,0004—0,004	0,004—0,03
Сопrotивление изоляции	10 000—100 000	10 000—100 000
Изменение диэлектрической постоянной со временем	Отсутствует	Около 4% в течение 10 лет

Конденсаторы с отрицательным температурным коэффициентом используются для компенсации дрейфа других емкостей.

Материалы II класса целесообразно применять для изготовления деталей с малыми размерами или там, где в качестве части цепи печатаются конденсаторы большой емкости, например 0,1 мкф. Однако эти материалы имеют целый ряд существенных недостатков:

1) при температуре Кюри (которая находится где-то в интервале между -100 и $+120^\circ\text{C}$ в зависимости от состава) наблюдается заметное увеличение диэлектрической постоянной;

2) диэлектрическая постоянная изменяется в зависимости от разности потенциалов;

3) во время цикла зарядки наблюдается петля гистерезиса, подобная кривой намагничивания для железа. Это может вызвать существенные нелинейные искажения, а также высокое рассеяние.

В связи с этим применение материалов II класса обычно ограничивается использованием их во вспомогательных цепях и некритичных по величине переходных конденсаторах. Дополнительные сведения о свойствах этих материалов можно найти в работах [46, 84].

1.3. Керамические материалы с пьезоэлектрическими свойствами

Диэлектрические материалы в целом известны как электростриктивные, т. е. материалы, у которых происходит механическая деформация, пропорциональная электрическому полю. Этот эффект обычно мал. Однако некоторым титановым керамическим материалам путем соответствующей обработки можно сообщить это свойство примерно на 50%. Преимущество этих керамических материалов перед другими пьезоэлектрическими материалами состоит в том, что они обладают большей химической стойкостью и им легко может быть придана нужная форма, чем упрощается проектирование высокоэффективных преобразователей.

1.4. Ферромагнитные керамические материалы (ферриты)

Ферриты — это керамические материалы с кристаллической структурой, подобной структуре минерала шпинеля ($MgOAl_2O_3$). Основное преимущество этих материалов перед металлическими состоит в том, что они обладают высоким электрическим сопротивлением и, следовательно, незначительными потерями на вихревые токи. В настоящее время существует целый ряд материалов с различными магнитоэлектрическими свойствами с различными магнитной проницаемостью, гистерезисными потерями и т. д. Они нашли широкое применение в качестве материала для сердечников высокочастотных трансформаторов, стержней односторонне пропускающих волноводов и запоминающих устройств для цифровых счетно-решающих машин. Последнее открывает широкие возможности для применения печатных схем, так как монтаж схемы полной ферритовой

матрицы, способной запоминать много тысяч цифр, является довольно трудоемким. В работах [33, 34] описаны методы, по которым схема может быть напечатана наполовину, а в одном случае полностью. Эти отпечатанные проводники фактически соединяют отверстия в ферритовых сердечниках или пластинах.

2. ЛИСТОВЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ [84]

Пластические материалы представляют собой комплексы низко- и высокомолекулярных групп, обладающие разными диэлектрическими свойствами. Некоторые из низкомолекулярных материалов представляют собой углеводороды, обладающие в чистом виде очень низкими диэлектрическими потерями и, как правило, низкими диэлектрическими постоянными. Однако замещенные углеводороды, как, например, фенолы, анилины и спирты, содержат полярные группы, которые сообщают молекулам постоянный дипольный момент. Поэтому пластические материалы можно разделить на две группы: полярные и неполярные. У полярных материалов наблюдается постоянная неуравновешенность электрических зарядов внутри молекулярной структуры. Диполи внутри структуры состоят из молекул, концы которых несут противоположные заряды. Такие молекулы имеют тенденцию к определенной ориентации в приложенном электрическом поле при условии, что частота не очень высока. Полярные материалы обнаруживают значительные изменения диэлектрической постоянной в зависимости от частоты, причем при некоторой критической частоте наблюдаются максимальные диэлектрические потери. Эта критическая частота с изменением температуры может существенно изменяться.

Пластические материалы могут иметь линейную или трехмерную структуру молекул; в соответствии с этим существует два типа смол: термопластичные и термоактивные. У большинства термопластичных смол структура такова, что тысячи атомов связаны прочными валентными связями в одном направлении, в то время

как макромолекулы имеют толщину лишь нескольких атомов в поперечном направлении. Терморезактивные смолы образуют трехмерную структуру, напоминающую рыболовную сеть. Механические свойства определяются прежде всего числом поперечных связей; если они многочисленны, как у фенолформальдегида, материал твердый, жесткий и, возможно, хрупкий.

Ниже приводятся некоторые подробности о термопластичных листовых материалах, используемых обычно в радиопромышленности, и которые, по всей вероятности, найдут применение при изготовлении панелей для печатных схем. Обычно из-за плохих механических свойств, низкой температуры размягчения и трудности обеспечения надежного прилипания между металлическим проводником и пластмассовым листом их применение все же ограничено. Гибкий лист пластического материала успешно использовался для получения гибкой печатной проводки и главным образом для получения системы проводов для соединения отдельных электрических узлов.

Терморезактивные смолы в сочетании с одной или двумя термопластичными широко применяются при производстве слоистых пластиков со смоляной проклейкой.

2.1. Полиэтилен

Полиэтилен представляет собой цепное соединение большого числа молекул этилена. Ниже -70°C он хрупкий; при более высоких температурах относительно гибкий и имеет точку размягчения около $+100^{\circ}\text{C}$; в чистом виде неполярен, и потери чрезвычайно низки (табл. 7.4 и 7.5). Загрязнение в процессе производства или в результате механической обработки может дать дипольные группы с общим увеличением потерь и получением типичных максимумов потерь. Достаточно продолжительное облучение солнечным светом дает такой же эффект и вызывает повышение температуры хрупкости до комнатной температуры. Не считая гибких схем, полиэтилен не имеет широкого применения из-за трудности обеспечения удовлетворительного сцепления с

Свойства некоторых термопластичных материалов

Состав	Полиэтилен	Полистирол	Политетрафтор-этилен	Полихлортри-фторэтилен	Полиэтилен-терефталат
Фирменные названия	Алкатен Телкотен Риджидекс Хостален	Дистрен Люстрон Стирон Тролигул	ПТФЭ Флуон Тефлон	Кел-Ф — Хостафлон	Терилен Мелнекс Милар Дакрон
Практи- ческие пределы частоты	Постоянный ток	Постоянный ток	Постоянный ток	Постоянный ток	Незначитель- ные между 10^5 и 10^7
	макс. 10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	
Диэлектрические потери, $\text{tg } \delta$	0,0002	0,0002	0,0001	0,01—0,05 при изменении частоты и температуры	0,01 при низ- кой частоте, 0,001 при вы- сокой частоте

Диэлектрическая постоянная (на верхнем пределе частотного диапазона)	2,25	2,55	2,10	2,3—2,8 в зависимости от частоты и температуры	2,8—3,5 в зависимости от частоты и температуры
Электрическая прочность, <i>в/мм</i>	40 · 10 ³	40 · 10 ³	40 · 10 ³ 80 · 10 ³	120 · 10 ³ 200 · 10 ³	160 · 10 ³ 200 · 10 ³
Пределы температуры, °С	—40 +70	—40 +65	—60 +285	—195 +180	—40 +130
Физические характеристики	Гибкий Мягкий Воскообразный	Хрупкий	Гибкий, воскообразный, хорошо сопротивляется химическим воздействиям, не известны события приклейки	Более жесткий, имеет более высокие литьевые свойства, чем ПТФЭ	Только тонкие пленки
					Электрические свойства значительно изменяются с изменением температуры и частоты

Таблица 7.5

Влияние температуры и частоты на свойства некоторых термопластичных листовых материалов

Состав		Полиэтилен			Полистирол			Полиэтиленгликоль		
Температура, °С		24	80	80	25	80	80	22	100	
10 ² гц		0,0005	0,0005	0,0005	0,0001	0,0009	0,0005	0,0010		
Средний диапазон		0,0002	0,0003	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002		
10 ¹⁰ гц		0,0004	0,0008	0,0004	0,0004	0,0005	0,0004	0,0005		
10 ² гц		2,25	2,25	2,25	2,56	2,54	2,10	2,04		
Средний диапазон		2,25	2,25	2,25	2,56	2,54	2,10	2,04		
10 ¹⁰ гц		2,25	2,20	2,20	2,54	2,53	2,08	2,04		

Диэлектрические
потери, tg δ

Диэлектрическая
постоянная

металлическими проводниками и термических свойств. Полиэтилен подвержен действию некоторых органических растворителей и минеральных смазочных масел, которые вызывают его набухание. На основе полиэтилена можно получить материалы с улучшенными механическими свойствами в ущерб некоторым электрическим. Подвергая полиэтилен δ - или γ -излучению, можно поднять точку его размягчения до более $+200^{\circ}\text{C}$, причем стойкость к действию растворителей и масел значительно увеличивается при несущественном ухудшении электрических свойств [86]. Однако этот метод обычно считают неэкономичным.

2.2. Полистирол

Полистирол обладает такими же электрическими свойствами, как и полиэтилен. Но в противоположность последнему он относительно хрупок при температурах, близких к точке размягчения (82°C). (Некоторые сополимеры полистирола имеют гораздо более высокие рабочие температуры, но значительно худшие электрические свойства.) Важным свойством этого материала при применении его в конденсаторных схемах для отсчета времени является чрезвычайно низкая электрическая утечка. Адгезия серебряных красок довольно низкая, но медная фольга может сцепляться с полистиролом достаточно прочно. Нужно очень тщательно подобрать клеящее вещество, особенно если схема должна работать при высоких частотах, так как само клеящее вещество может внести значительные потери. Ввиду хрупкости полистирола могут возникнуть трудности при травлении, особенно если фольга была припрессована к полистиролу в горячем виде и если лист тонкий. Снятие внутренних напряжений вызывает коробление и может привести к тому, что образец расколется. Поэтому считается более целесообразным использовать полистирол со стеклянным покрытием. Если каждую сторону образца из полистирола залить так, чтобы образовалось стеклянное покрытие, то получится вполне пригодный материал.

2.3. Фторуглеродные смолы (ПТФЭ, Kel-F и др.)

К этой группе относятся материалы, которые не являются ни термопластичными, ни терморезактивными и характеризуются очень широкими температурными пределами, низким поглощением влаги и высокой стойкостью к воздействию химических веществ. Но эти материалы относительно дороги. Они существуют в двух основных формах: политетрафторэтилен (ПТФЭ, флуон, тефлон) и полихлортрифторэтилен (Kel-F, ПХТФЭ, хостафлон). Последний получают замещением в C_2F_4 одного атома фтора хлором, благодаря чему полимер становится более твердым, прочным и приобретает более высокие литьевые свойства, но его электрические характеристики ухудшаются. ПТФЭ сам по себе неполярен, и его электрические свойства подобны свойствам полиэтилена и полистирола. В продажу поступает ПТФЭ с покрытием из медной фольги; этот полимер используется также при производстве слоистых материалов из стекловолокна.

2.4. Полиэтилентерефталат (мелинекс, милар, терилен) [42, 46]

Это — полиэфир, применяемый при изготовлении конденсаторов и заменяющий в этом случае бумагу, причем он имеет более низкие потери и более высокую температуру обработки. Ввиду этого он применяется в производстве специальных конденсаторов для печатных схем, однако насколько известно, он не используется в качестве изоляционного основания для самих печатных схем. Конденсаторы, внешняя поверхность которых защищена ПХТФЭ, можно без повреждения погружать в расплавленный припой. Следует отметить, что этот материал высокополярен, его удельная проводимость значительно изменяется в зависимости от частоты и температуры и максимум потерь лежит в интервале от 0,1 до 10 Мгц.

2.5. Другие термopластичные материалы

В радиопромышленности часто используются и другие материалы: полиметилметакрилат (перспекс, троли-тул, плексиглас и др.), поливинилхлорид (ПВХ, винилит и др.) и пенополистирол. Ни один из них не находит сколько-нибудь значительного применения при изготовлении печатных схем.

3. СЛОИСТЫЕ ПЛАСТИКИ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ МЕДНОЙ ФОЛЬГИ И СМОЛЯНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ

3.1. Метод изготовления

Слоистые пластики, покрытые медной фольгой и пропитанные смолой, изготавливаются следующим образом. Листы волокнистого материала (т. е. целлюлозную, асбестовую и стеклянную бумагу, бумажную ткань и др.) сначала пропитывают или покрывают синтетической смолой, растворенной в соответствующем растворителе. После этого листы сушат в печах, в результате чего растворитель удаляется, разрезают на нужный формат и складывают в стопу требуемой толщины. Стопу помещают в нагретый пресс. При одновременном действии тепла и давления смола растекается и вулканизуется в однородный материал. Благодаря волокнистости материала слоистые пластики со смоляной проклейкой, как правило, обладают прекрасными механическими свойствами.

Металлическую фольгу обычно наклеивают на изоляционное основание при помощи клейкой пленки, помещенной между металлом и слоистым материалом. Приклеивание фольги может проводиться либо в процессе вулканизации либо как отдельная операция, выполняемая на готовом основании. Обычно используют фольгу из электролитической меди, но иногда применяются также и другие виды фольги, например катаная медь или алюминий.

При работе с ПТФЭ возникают трудности, так как нет подходящего клеящего вещества для приклейки медной фольги. Тем не менее некоторым предприятиям удалось добиться удовлетворительного склеивания без клеящего вещества путем горячего прессования фольги и листов стеклянного волокнистого материала, пропитанного смолой, за одну операцию. Другая трудность, возникающая при работе с этими материалами, состоит в том, что по сравнению с другими для их обработки требуются гораздо более высокие температура и давление.

3.2. Классификация сортов и их свойства

В табл. 7.6 приведены основные сорта слоистых материалов, классифицированных по системе NEMA (см. Приложение 1). Внутри каждой основной группы имеются варианты, включающие составные сорта, такие, например, как широко известный XXXP, представляющий собой штампованную разновидность сорта XXX. В Англии изготавливается целый ряд подобных сортов, но нет такой строгой классификации, как в США. Кроме того, еще не существует спецификаций на эти материалы, если не считать основных фенольных сортов (без покрытия); обычно изготовители указывают, какому пункту стандартной спецификации удовлетворяет данный материал (по Британскому стандарту и RCS11, см. Приложение 1).

Электрические и механические свойства немногих отобранных сортов, выпускаемых ведущей фирмой США, приводятся в табл. 7.7. Следует отметить, что эти цифры характерны только для материалов, выпускаемых данной фирмой; для предельных значений следует обратиться к стандартам NEMA, которые приводятся также в спецификациях Американского общества по испытанию материалов.

Свойства двух, очень нужных сортов, выпускаемых ведущей английской фирмой, приведены в табл. 7.8. У однотипных сортов, выпускаемых разными фирмами, отдельные свойства мс.ут в значительной степени отли-

чаться. Это относится прежде всего к материалам из стеклянного волокна. Поэтому при работе с токами высокой частоты, где особенно важны диэлектрические свойства, могут наблюдаться значительные отклонения, вызванные различиями в стекловолкне, в соотношении смолы и стекловолкна и в клеящем веществе, используемом для закрепления металлической фольги на слоистом материале. Постоянство свойств материалов, выпускаемых каждой фирмой, обычно достаточно удовлетворительное. Что касается максимальных температур обработки, необходимо сделать оговорку, что данные табл. 7.6. и 7.7 относятся к слоистым материалам без покрытия.

При наличии покрытия из медной фольги на максимальную температуру оказывает влияние применяемое клеящее вещество, и иногда, например для меламиновых и пропитанных силиконовой смолой слоистых материалов, эта температура может быть примерно на 25° ниже.

Для многих бытовых целей применяются более дешевые сорта бумаги или даже ткани с фенольной пропиткой. Для промышленных целей чаще всего используется сорт ХХХР; он также находит широкое применение в изготовлении изделий бытового назначения. Несмотря на то что применяются главным образом сорта, поддающиеся горячей штамповке, некоторые фирмы (см. табл. 7.8) поставляют и такой сорт, который можно штамповать в холодном состоянии, что снижает стоимость оборудования и обработки. Дополнительным преимуществом этого сорта является то, что можно располагать отверстия на небольшом расстоянии друг от друга и, следовательно, не давать допуск на тепловое расширение или сжатие основания. В пределах, указанных НЕМА, этот сорт обычно обладает хорошими свойствами, но несколько уступает лучшим сортам ХХХР.

Сорта С, СЕ и прежде всего LE обладают тем преимуществом, что могут быть обработаны для придания им определенной формы из листового материала, однако в процессе горячей обработки ухудшаются электрические и механические свойства материалов.

Таблица 7.6

Классификация слоистых материалов, предложенная NEMA (Ассоциация фирм электротехнической промышленности)

	Классификация NEMA	Основа	Смола	Область применения	Максимальная температура, °C
Удовлетворительные для большинства низкочастотных печатных схем. Лучшие сорта удовлетворяют повышенным требованиям	X	Бумага	Фенольная	Где важны механические характеристики, а электрические свойства имеют второстепенное значение	105
	P	»	»	Для штамповки. Некоторые сорта можно штамповать в холодном состоянии	90—120
	XX	»	»	Где важны электрические свойства при высокой механической прочности	120

Первоначально предназначенные для использования в условиях, где необходимы хорошие механические характеристики	XXX	»	»	Для использования при высокой влажности с низкой хладнотекучестью	120
	A	Асбест	Фенольная или меламиновая	Для использования в тех случаях, когда требуется теплостойкость	135—170
	C	Брезент или ткань	То же	Где важны механические характеристики, например вязкость и ударная вязкость. Некоторые сорта обладают высокой химической стойкостью	105—120
	SE и LE	Ткань	»	Где важны электрические свойства при вязкости, превышающей вязкость материалов на бумажной основе	105—120

Продолжение табл. 7.6

	Классификация NEMA	Основа	Смола	Область применения	Максимальная температура, °C
<p>Первоначально предназначенные для использования в условиях, где необходимы хорошие механические характеристики</p>	L	Ткань	Фенольная или меламиновая	<p>Где важны механические характеристики. Например, для системы зубчатых передач</p>	105—120
	N	Нейлоновая ткань	Фенольная	<p>Где требуются хорошие электрические свойства во влажной атмосфере. Должен поддаться формовке и механической обработке</p>	75
<p>Используются для печатных схем, применяемых в жестких условиях</p>	G 1, 2, 3	Стекловолоконное	»	<p>Где требуются хорошие электрические свойства при хорошей теплостойкости и механической прочности</p>	135

G 5,8	» »	Меламиновая	Где требуется тепло- стойкость, дугостой- кость, а также высо- кая механическая прочность	175
G 6,7	» »	Силиконовая	Для использования при работе с токами высо- кой частоты, требую- щими высокой тепло- стойкости, дугостой- кости и стабильности электрических свойств при работе во влаж- ной атмосфере	200
G 10	» »	Эпоксидная	Где требуется устойчи- вость размеров, ста- бильные электриче- ские свойства при вы- сокой влажности, боль- шой теплоустойкости и отличных механиче- ских свойствах	150

Свойства некоторых

Сорт материала				Свойства слоистых							
классификация NEMA	сорт C-D-F	обозначения, принятые в армии США	состав	удельный вес	твердость по Роквеллу	предел прочности при растяжении, 10^8 кг/см^2		предел прочности при изгибе, 10^8 кг/см^2		предел прочности на сжатие плашмя, 10^8 кг/см^2	
						М	ВВ	ПВ	ВВ		ПВ
XXXP	XXXP 26	3115 PBE-P	Фенольная смола, бумага	1,32	110	10	8	13	12	18	
LE	LE-13	15035-FBE	Фенольная смола, хлопчатобумажная ткань	1,33	110	9	6	12	10	24	
G1/G2	GB-261D	—	Фенольная смола, стеклянное волокно	1,55	105	10	7	14	12	26	
—	GMP-100	—	Полиэфирная смола, стеклянное волокно	1,65	100	10	7	17	15	26	
G5	GB 28M	15037-GMG	Меламиновая смола, стеклянное волокно	1,95	120	24	19	30	26	45	
G10	GB-28E	18177-GEE	Эпоксидная смола, стеклянное волокно	1,72	116	31	28	37	40	40	
G6	GB-261S	997-GSG	Силиконовая смола, стеклянное волокно	1,70	100	13	10	15	12	26	
—	GB-112T	—	Тефлоновая смола, стеклянное волокно	2,2	60	15	13	8	7	13	

Примечания: 1. Материалы расположены в порядке, определяемом их стоимостью.

2. Все испытания проводились в соответствии с американским стандартом (ASTM) для испытаний электроизоляционных материалов (см. Приложение 1).

3. Все величины усредненные и поэтому могут быть использованы лишь для сравнения друг с другом.

4. ВВ — вдоль волокна, ПВ — поперек волокна.

5. Испытания на прочность при сжатии производились с образцами толщиной 12 мм.

СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

материалов без покрытия												С покрытием из медной фольги													
плашмя		ребром		ударная вязкость по Изоду образца с надрезом при длине надреза 25 мм, кг/м		абсорбция воды (в %) через 24 часа после погружения при 23°С		температура при длительном воздействии, °С		электрическая прочность		диэлектрические потери tg δ, при частоте 1 МГц		диэлектрическая постоянная при частоте 1 МГц		сопротивление изоляции, МОм		прочность сцепления фольги со слоистым материалом; сила отрыва, кг/см		максимальная температура при длительном испытании, °С		сопротивление растворению припойа		электрические свойства	
ВВ	ПВ	ВВ	ПВ	1,5 мм	3 мм	максимальная	кратковременное испытание	перпендикулярно слоям, в/25 мм	параллельно слоям, кв	при изготовлении	после увлажнения	при изготовлении	после увлажнения	дуговое сопротивление, сек	сопротивление изоляции, МОм		прочность сцепления фольги со слоистым материалом; сила отрыва, кг/см		максимальная температура при длительном испытании, °С		сопротивление растворению припойа		электрические свойства		
—	—	0,05	0,04	0,6	0,5	120	800	70	0,026	0,027	4,2	4,3	10	5 · 10 ⁴	1—1,6	120	8 сек при 242°С	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	0,2	0,2	0,2	1,4	0,9	105	550	45	0,050	0,058	4,8	5,2	4	10 ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,1	0,9	0,9	0,8	1,5	0,9	135	440	50	0,010	0,019	4,2	4,3	4	2 · 10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1,7	1,6	0,6	0,4	130	475	60	0,016	0,042	4,2	4,5	135	> 10 ⁷	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,8	1,7	1,2	1,0	2,0	1,5	150	500	35	0,012	0,070	7,2	8,0	190	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,4	3,3	1,5	1,3	0,2	0,1	150	650	60	0,018	0,020	5,0	5,1	120	2 · 10 ⁴	1,3—2	150	30 сек при 260°С	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	1,2	1,0	0,2	0,1	200	200	60	0,002	0,009	3,7	4,0	275	5 · 10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	0,7	0,6	0,03	0,02	250	700	—	0,001	—	2,6	—	180	> 10 ⁶	0,6—1,3	200	60 сек при 260°С	—	—	—	—	—	—	—	—

6. Испытания на электрическую прочность производились на листах толщиной 1,5 мм в масле при действии поля с частотой 60 гц.

7. Все другие испытания, за исключением указанных случаев, проводились на материалах толщиной 3 мм.

8. Определение tg δ и диэлектрической постоянной в присутствии влаги производились под чистой водой при температуре 23°С в течение 24 час.

9. Величины сопротивления изоляции определялись по образцам в атмосферных условиях при 90%-ной влажности и температуре 35°С в течение 96 час.

Таблица 7.8

**Свойства некоторых слоистых материалов
с медным покрытием**
(составлена по данным фирмы «Бакелит», Лондон)

	Метод испытания	Сорт и характерные показатели	
Марка	—	Е 19050	ДН 19057
Состав	—	Фенольная смола, бумага	Эпоксидная смола, стеклян- ное волокно
Удельный вес	—	1,31	1,87
Предел прочности при разрыве, $кг/см^2$	БС 1137	720	2160
Предел прочности при срезе, $кг/см^2$	БС 2076	570	1000
Предел прочности при изгибе, $кг/см^2$	БС 2572	1100	3300
Ударная вязкость (ребром) $кгм$	БС 2572	2,8	36
Поглощение воды (для образцов 1,5 мм), $мг$	БС 2076	10	3
Электрическая проч- ность в направлении, перпендикулярном слоям материала при 90° С (1,5 мм), $в/мм$	БС 2572	16 000	16 000
Электрическая проч- ность вдоль слоев материала при 90° С, $кв$	БС 2572	40	40
$tg \delta$ при 800 $гц$		0,02	0,02
$g \delta$ при 10 ⁶ $гц$	БС 2076	0,03	0,025
Диэлектрическая посто- янная при 10 ² $гц$ (поле перпендику- лярно образцу сло- истого материала)	БС 2076	4,4	5,0

Продолжение табл. 7.8

	Метод испытания	Сорт и характерные показатели	
Сопротивление изоляции после 24-часового погружения в воду, <i>Мом</i>	БС 2076	10 ⁵	10 ⁴
Сила сцепления фольги со слоистым материалом для пленки шириной 1 см, кг		1,1	1,3
Теплостойкость (при выдерживании в растворе для пайки), °С		230 (10 сек)	270 (10 сек)
Максимальная температура обработки, °С	—	~ 90	~ 140
Спецификация	—	БС 1137 тип 1 БС 2572 тип РЗ	

Примечания. 1. Большое количество материалов (подобных приведенным в табл. 7.7) производится в Англии; подробные данные об этих материалах можно получить в «Бритиш Пластикс Федерейшн» (Лондон). Два выбранных материала обладают свойствами, представляющими особый интерес для изготовителей печатных схем.

2. Отличительной особенностью Е 19060 является то, что его можно сверлить при комнатной температуре и толщине до 1,5 мм (для штамповки рекомендуется нагреть до 60° С). Однако сопротивление горячим парам трихлорэтана, часто используемого для обезжиривания, у этого материала ниже, чем у подобных сортов, применяемых для горячей штамповки. Коробление и скручивание необычайно низкие.

3. За исключением $\text{tg } \delta$ при 800 гц, сопротивления нагреву и максимальной температуры обработки, все перечисленные выше свойства измерялись после удаления меди травлением.

В настоящее время многие фирмы поставляют большое количество изоляционных материалов с основой из стекловолокна. Их основным преимуществом является повышенная по сравнению с материалами на бумажной или тканевой основе теплостойкость. Во многих случаях они обладают также лучшими электрическими характеристиками, включая дугостойкость, диэлектрические потери и иногда сопротивление изоляции. Однако необходимо помнить, что после продолжительного цикла

увлажнения электрические свойства этих материалов обычно сильно ухудшаются, но, возможно, не до такой степени, как у фенольных сортов.

Пропитанные смолой меламиновые слоистые материалы из стекловолокна часто применяются для изготовления печатных выключателей и других переключающих устройств, так как они обладают большой дугостойкостью, механической прочностью и теплостойкостью. Однако их нельзя использовать при работе с токами высокой частоты и они обладают относительно малой сопротивляемостью к проникновению влаги.

Наиболее широко применяемый слоистый материал из стекловолокна с эпоксидной смолой упоминается в табл. 7.7 и 7.8. У эпоксидной смолы достаточно высокое сцепление с металлом, что обеспечивает более высокий предел прочности при изгибе по сравнению с большинством других материалов, приведенных в табл. 7.7.

Новые слоистые материалы, полученные под высоким давлением, обладают такими же, а иногда и лучшими электрическими свойствами, чем фенольные сорта стекловолокна. Максимальная рабочая температура их выше и становится сравнимой с аналогичным параметром меламина. Это позволяет широко применять пайку при 275°C без вспучивания панелей. Дугостойкость также высокая. Поставляется и полиэфирный слоистый материал; его свойства являются средними между свойствами фенольной и эпоксидной смол.

Особого внимания заслуживает слоистый материал из стекловолокна, пропитанный кремнийорганическими смолами. Этот материал имеет высокие температурные характеристики, большую дугостойкость и низкие диэлектрические потери, которые лишь незначительно увеличиваются после цикла увлажнения (см. табл. 7.10). К сожалению, липкая пленка, используемая для приклейки медной фольги к основанию, вызывает заметные нарушения, степень которых зависит от того, какая смола применяется изготовителем. В наибольшей степени ухудшаются максимальная рабочая температура и поверхностное сопротивление. Другая трудность, с которой сталкиваются многие потребители,

состоит в том, что листы, пропитанные кремнийорганическими соединениями, после длительного хранения имеют тенденцию расслаиваться.

Самым лучшим, но, к сожалению, и самым дорогим материалом для работы при сверхвысоких частотах, т. е. для использования в микроволновых печатных схемах, является ПТФЭ, слоистый материал из стекловолокна, пропитанный смолой. У этого материала в сухом виде чрезвычайно низкие диэлектрические потери, однако после испытаний в тяжелых условиях по этому параметру материал существенно не отличается от многих других. Чистый ПТФЭ не воспламеняется, обладает чрезвычайно высокой температурной характеристикой, фактически устойчив по отношению ко всем растворителям, очень едким солям и наиболее концентрированным кислотам. Тем не менее на слоистый материал из стекловолокна оказывают воздействие все химические вещества, которые действуют на стекло, и он может также задерживать загрязняющие электролиты в промежутках между волокнами стекла и окружающей смолой ПТФЭ.

3.3. Механические допуски

Метод изготовления слоистых материалов создает трудности в получении малых допусков на толщину. Ниже приводится допуск на толщины по Британскому стандарту 2076

Толщина материала, мм	Допуск, мм
0,8	$\pm 0,09$
1,6	$\pm 0,14$
2,4	$\pm 0,18$
3,2	$\pm 0,20$

Однако эти цифры относятся только к материалам со смоляным связующим до нанесения на них медной фольги. В США NEMA выпустила спецификацию для слоистых материалов типа XXXP с покрытием из медной фольги; в этой спецификации материалы подразделяются на два класса: к I классу относятся материалы с обычным допуском на толщину, а ко II клас-

су — с жестким допуском на толщину. Грубо говоря, указанные выше цифры представляют собой промежуточные данные между обоими классами.

Для слоистых материалов из стеклянного волокна допуски, как правило, на 50% выше, так как этот материал отличается относительной несжимаемостью. В некоторых случаях для получения более строгих допусков изготовитель предпочитает обрабатывать слоистый материал до нанесения медной фольги. Не приходится и говорить о том, что за счет этого возрастает стоимость материала. Жесткие допуски по толщине желательны при использовании штепселей и штепсельных разъемов и весьма существенны при работе в микроволновом диапазоне.

Слоистые материалы с медным покрытием особенно подвержены короблению и скручиванию, главным образом ввиду различного теплового расширения меди и слоистого основания. Это приводит к серьезным затруднениям, особенно когда для монтажа элементов применяется автоматическое оборудование. Цифры, взятые из Британского стандарта 2076, не применимы в том случае, когда они относятся только к основанию. Спецификация NEMA для слоистых материалов XXXP такова:

Толщина основания, мм	Максимальное коробление и скручивание, %		
	медное покрытие нанесено с одной стороны		медное покрытие нанесено с двух сторон
	фольга 0,035 мм	фольга 0,071 мм	толщина обоих слоев фольги
0,78—1,16	20	24	6
1,16—1,6	15	18	6
1,6 —3,1	10	12	3
3,1 —6	5	6	1,5

Эти цифры были получены следующим образом. Неразрезанный лист материала в том виде, в каком его получили от поставщика, помещали на плоскую поверхность вогнутой стороной вверх. Затем на лист клали легкую линейку длиной 90 см и измеряли максимальное расстояние между листом и линейкой; результат выражали, как и раньше, в процентах. Для любой другой длины линейки или размера листа данные пересчитываются по формуле

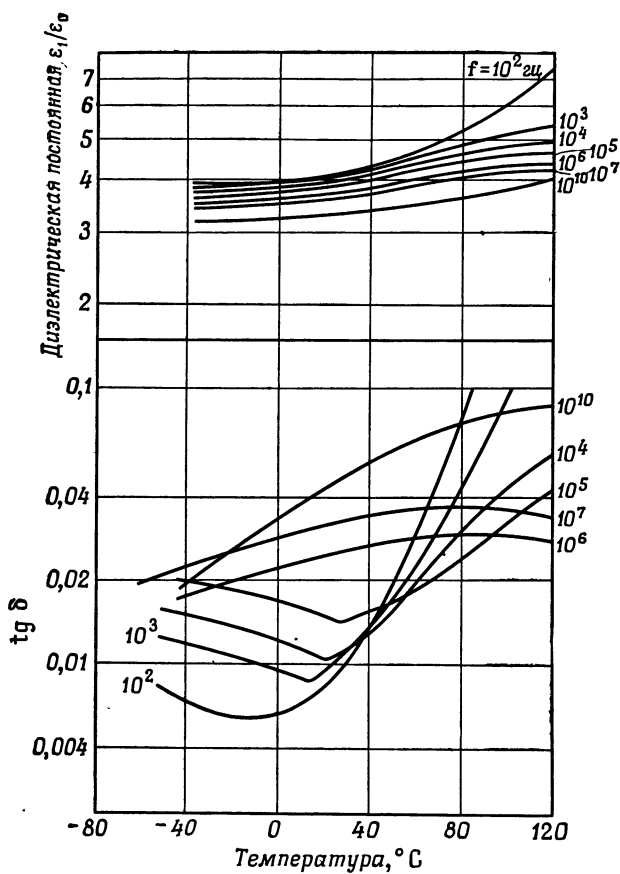
$$d = \frac{DL^2}{(90)^2},$$

где d — допускаемое отклонение при использовании нестандартной линейки; D — допускаемое отклонение при использовании линейки длиной 90 см, а L — длина нестандартной линейки, мм.

Указанные выше пределы неудовлетворительны с точки зрения поставщика оборудования; к счастью, на практике большинство фирм, поставляющих слоистые материалы, могут снабжать производителей материалами со значительно лучшими характеристиками. Слоистые материалы из стеклянного волокна в гораздо меньшей степени подвержены короблению и скручиванию. Это в первую очередь относится к более твердым прочным сортам, таким, например, как слоистый материал, содержащий стекло и эпоксидную смолу.

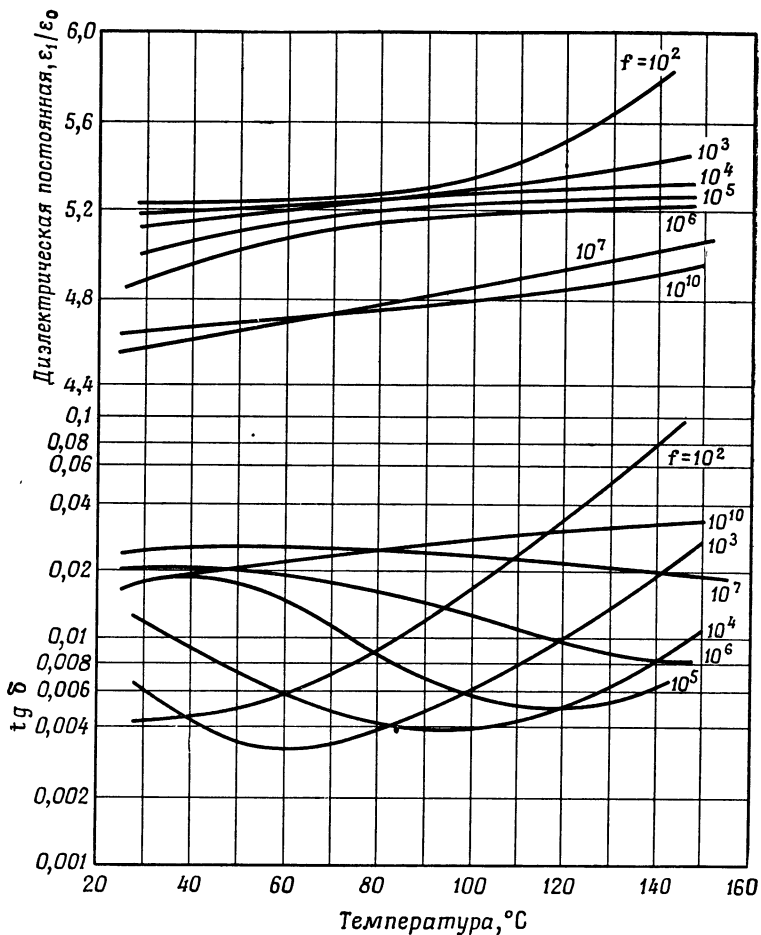
3.4. Влияние температуры и частоты на электрические свойства слоистых материалов [85, 87]

К сожалению, данные по этому вопросу недостаточны полные. На фиг. 7.1—7.4 приведены кривые для четырех материалов, причем в пределах каждой категории результаты можно считать характерными. Однако между однотипными сортами, изготовленными различными фирмами, по всей вероятности, имеется значительное различие. Кроме того, необходимо тщательно различать электрические свойства, измеренные



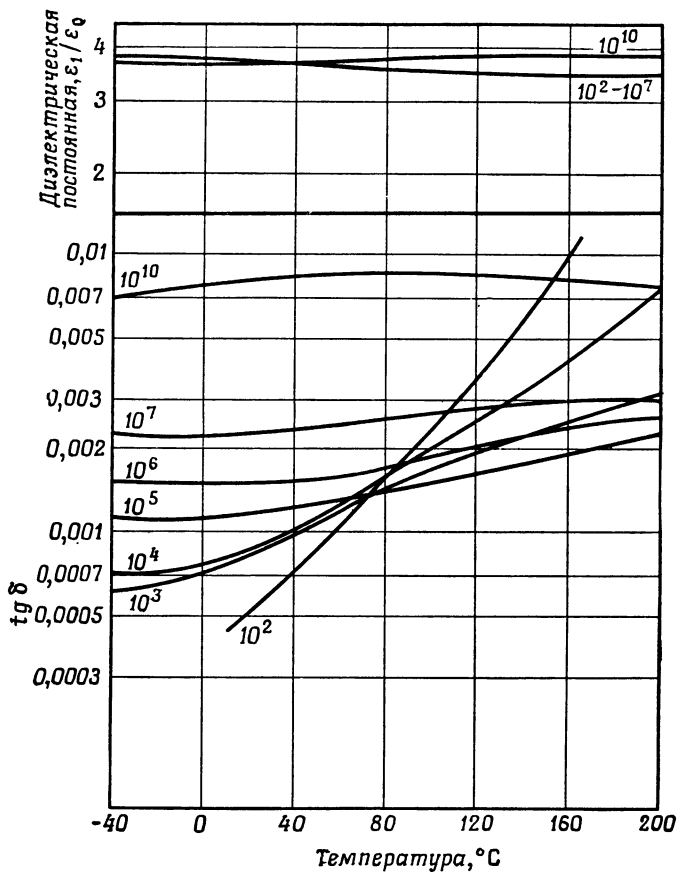
Фиг. 7.1. График зависимости $\text{tg } \delta$ и диэлектрической постоянной от частоты и температуры для фенольного слоистого материала на бумажной основе (сорт CDF XXXP-26).

Электрическое поле перпендикулярно поверхности листа для частот до 10^7 гц и параллельно для частот 10^{10} гц.



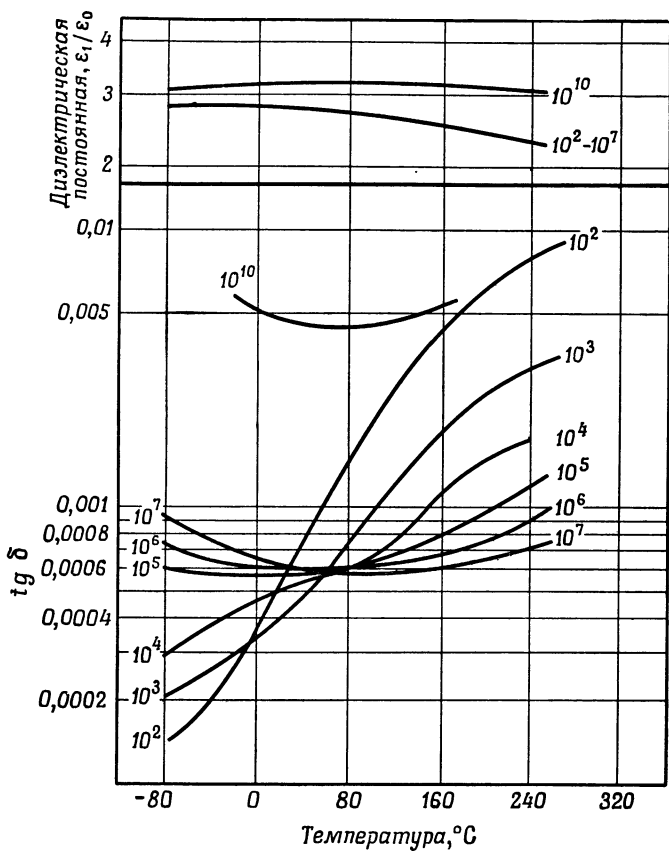
Фиг. 7.2. График зависимости $\text{tg } \delta$ и диэлектрической постоянной от частоты и температуры для слоистого материала из стекловолокна, пропитанного эпоксидной смолой (сорт GB-181-E).

Направления полей те же, что и на фиг. 7.1.



Ф и г. 7.3. Зависимость $\text{tg } \delta$ и диэлектрической постоянной от частоты и температуры для слоистого материала из стекловолкна, пропитанного силиконовой смолой (сорт CDF GB-261-S).

Направления полей те же, что и на фиг. 7.1.



Фиг. 7.4. Зависимость $\text{tg } \delta$ и диэлектрической постоянной от частоты и температуры для слоистого материала из стекловолокна, пропитанного тефлоном (сорт GB-112Т).

Направления полей те же, что и на фиг. 7.1.

Таблица 7.9

**Влияние температуры и частоты на свойства
двух слоистых материалов**

	Температура, °С	Коэффициент	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	3 · 10 ⁹	10 ¹⁰
			зц									

Для слоистых материалов из стекловолокна типа GB-112S

Поле перпендикулярно листу	25	ϵ_r	3,56	3,56	3,56	3,55	3,54	3,54	3,54	—	—	—
		$\text{tg } \delta$	1,35	1,29	1,29	1,11	0,85	1,14	1,86	—	—	—
	90	ϵ_r	3,41	3,39	3,38	3,38	3,38	3,38	—	—	—	—
		$\text{tg } \delta$	2,64	1,62	1,49	1,61	1,10	0,98	—	—	—	—
	200	ϵ_r	3,18	3,18	3,18	3,17	3,10	3,10	—	—	—	—
		$\text{tg } \delta$	23,6	4,3	2,3	19,5	2,1	1,54	—	—	—	—
Поле параллельно листу	25	ϵ_r	6,55	5,72	4,94	3,96	3,84	3,82	3,80	3,78	3,76	3,70
		$\text{tg } \delta$	125	91	108	51,6	12,8	3,7	2,5	3,9	5,2	8,7
	215	ϵ_r	10,93	8,60	6,65	4,92	—	—	—	—	—	3,78
		$\text{tg } \delta$	200	208	180	141	—	—	—	—	—	8,0

Для слоистых материалов из стекловолокна типа GB-112T

Поле перпендикулярно листу	25	ϵ_r	2,76	2,74	2,74	2,74	2,73	2,73	2,73	—	—	—
		$\text{tg } \delta$	0,89	0,61	0,6	0,6	0,58	0,62	1,18	—	—	—
	250	ϵ_r	2,48	2,46	2,46	2,46	—	2,44	—	—	—	—
		$\text{tg } \delta$	8,0	3,6	1,8	1,4	—	0,25	—	—	—	—
Поле параллельно листу	25	ϵ_r	3,35	3,24	3,18	3,17	3,16	3,15	3,15	3,15	3,15	3,10
		$\text{tg } \delta$	36,1	24,5	16,9	10,8	4,2	2,3	2,4	3,1	3,8	4,7
	250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,10
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70

Примечания. 1. Значения $\text{tg } \delta$ 10³; 2. ϵ_r — диэлектрическая постоянная.

в продольном и поперечном направлениях относительно направления волокон слоистого материала.

Для иллюстрации этих трудностей можно сравнить данные фиг. 7.3 и 7.4 с данными табл. 7.9, причем два силиконовых сорта не идентичны. В первом случае наблюдается значительное различие в диэлектрической постоянной в зависимости от направления приложенного поля. Во втором случае — несовместимость данных, приведенных на фиг. 7.3 и 7.4 и табл. 7.9 в отношении потерь при 10^{10} гц. Автор на опыте убедился, что потери при 10^{10} гц, показанные на фиг. 7.4, чрезвычайно высоки даже при комнатной температуре. В качестве примера разницы, очевидно, существующей между номинально эквивалентными сортами, выпускаемыми различными фирмами, в табл. 7.10 приведены результаты испытаний двух различных марок слоистого материала из стекловолокна с ПТФЭ.

При низких частотах эти расхождения, как правило, не существенны. Однако при высоких частотах такие различия могут вызвать затруднения и необходимость очень тщательного изучения каждого отдельного материала той или иной фирмы перед выполнением проектных работ.

3.5. Влияние влажности на электрические свойства слоистых материалов с медным покрытием [100, 102, 103]

Слоистые материалы по самой своей природе относительно чувствительны к проникновению влаги. Влага проникает в материал главным образом через торцевые части листа. Однако, если поверхность листа имеет механические или химические повреждения, абсорбция может происходить и через поверхность.

В табл. 7.10 приведены некоторые характерные данные. На все эти материалы сначала была нанесена медная фольга, а затем опытный образец схемы, полученный фотомеханическим травлением. Следовательно, степень повреждения и загрязнения (если они имели место) различных образцов была приблизительно такая же, как и при обычном изготовлении. Нетрудно

Таблица 7.10

**Влияние влажности на электрические свойства
диэлектриков с медным покрытием**
(По данным «Стандарт телекоммуникационной лабораториз»)

Испытание	Тип	При получении	После 7 циклов	После 14 циклов	После 20 циклов
Сопrotивление изо- ляции, <i>Мом</i>	F1	$1,6 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
	F2	$5,5 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$
	E	$1,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^4$
	S	$5,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$
	P	$> 10^6$	$> 10^6$	$4,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^6$
Диэлектрическая по- стоянная при 1 <i>Мгц</i>	F1	2,69	2,74	2,76	2,74
	F2	2,56	2,55	2,54	2,52
	E	4,91	5,00	5,00	5,00
	S	3,94	3,96	4,07	3,97
	P	2,48	2,48	2,48	2,50
Диэлектрические по- тери при 1 <i>Мгц</i>	F1	0,0006	0,0184	0,0222	0,0239
	F2	0,0003	0,0068	0,0085	0,0121
	E	0,0135	0,0135	0,0142	0,0143
	S	0,0029	0,0039	0,0046	0,0057
	P	$< 0,0002$	$< 0,0002$	$< 0,0002$	0,0002

Испытаниям подвергали вытравленные образцы в соответствии со спецификацией Ассоциации поставщиков радиоэлектронных деталей. Было проведено испытание на устойчивость по отношению к горячему пару в соответствии с п. 4.11 Брит. станд. 2011 (при циклическом изменении температуры от 20 до 35° С и 95%-ной относительной влажности, всего 20 дней).

F1 = ПТФЭ пропитанное стекловолочно, изготовитель № 1.

F2 = ПТФЭ пропитанное стекловолочно, изготовитель № 2.

E = стекловолочно, пропитанное эпоксидной смолой.

S = стекловолочно, пропитанное силиконовой смолой.

P = полиэтилен высокой плотности.

заметить, что все слоистые материалы значительно уступают чистому листу полиэтилена. Оказывается, что слоистый материал из стекловолочно, пропитанный эпоксидной смолой, обнаруживает наименьший износ,

тогда как слоистый кремниевый пластик дал лучший показатель объемных потерь после 20 циклов увлажнения, но наименьшее поверхностное сопротивление. Те же самые материалы подвергали затем ускоренному испытанию на устойчивость по отношению к горячему пару. Для материалов класса F1 (Брит. станд. 2011, п. 4.2.2) результаты испытаний были примерно такими же, как и ранее.

Очень интересная серия опытов была проведена Отделением пластмасс Королевского общества исследований в области радиолокации при Министерстве снабжения [102].

Опытные образцы пятнадцати сортов слоистых пластиков в течение 12 месяцев находились на открытом воздухе в условиях жаркого и влажного климата Южной Нигерии. В числе этих образцов были различные сорта стеклоэпоксидных, стеклополиэфирных, стекло-меламиновых материалов, ПТФЭ, фенольных бумаг и других слоистых материалов. Та же организация провела еще ряд лабораторных испытаний этих материалов. Все измерения подтверждают относительную стабильность стеклоэпоксидных пластиков, очень низкую влагостойкость слоистых пластиков из стекловолокна с ПТФЭ и превосходство силиконовых сортов при длительных тепловых испытаниях. Стекломеламиновые пластики оказались весьма низкого качества, даже хуже, чем лучшие сорта фенольной бумаги. Результаты, полученные при испытании слоистого пластика со стеклянным волокном, требуют некоторых пояснений в отношении величин, характеризующих поглощение влаги, указанных в табл. 7.7 при погружении в воду на 24 часа при температуре 25°С. Как стекло, так и ПТФЭ, если их рассматривать по отдельности, фактически не абсорбируют влагу. Однако смола ПТФЭ в отличие от эпоксидной обладает очень низкой адгезией. Создается впечатление, что после многократного повторения цикла между стеклом и смолой ПТФЭ возникают промежутки, подобные капиллярам, через которые сравнительно легко проникает влага. Интересной особенностью опытов, поставленных в Нигерии, было то, что некоторые образцы,

последовательно подвергавшиеся повторному испытанию, проводимому после очистки и сушки, дали результаты, мало отличавшиеся от первоначальных, но показывающие, что постоянных нарушений не наблюдалось.

3.6. Влияние химического загрязнения на электрические свойства слоистых материалов [38, 97, 101]

Листовой материал может химически загрязняться двумя путями. Если торцы листа соответствующим образом защищены, то загрязняется поверхность и результатом этого будет снижение поверхностного сопротивления. С другой стороны, если загрязнение происходит через открытый край листа, то будет падать объемное сопротивление, а следовательно, будут увеличиваться диэлектрические потери. В каждом случае снижение сопротивления вызвано токами проводимости, возникающими в электролите ввиду наличия свободных ионов. Эти токи возникают только в том случае, когда лист содержит достаточное количество влаги. Поэтому загрязненный лист после тщательной сушки может пройти все необходимые производственные испытания, но оказаться непригодным к употреблению.

Основные источники загрязнения: 1) используемые в процессе печати химические вещества; 2) флюсы, необходимые для пайки; 3) среда, окружающая рабочее место.

Химическими веществами загрязняются как вытравленные, так и полученные путем наращивания печатные схемы. В обоих случаях на лист воздействует много разных химических веществ, таких, как травящие и очищающие растворы, растворы для металлизации и т. д. Загрязненный лист до сборки элементов можно очистить при помощи абразива, например пемзы. Однако одной только механической очистки недостаточно, так как абразивы, с помощью которых можно удалить отложение, вызывают повреждение поверхности основания и тем самым увеличивают восприимчивость к загрязнениям в процессе эксплуатации схемы. Кроме того, рекомендуется определять природу остаточных веществ и

составить рецептуру химического промывочного раствора, который эффективно удалял бы эти вещества. Можно также отрегулировать процесс таким образом, чтобы уменьшить скопление подобных веществ и возможность попадания их на основание.

Проблема загрязнения флюсами в процессе пайки связана с необходимостью использования активных флюсов для обеспечения надежной пайки. Однако такие флюсы обычно дают неблагоприятные осадки. В связи с этим признаны удовлетворительными стеариновая кислота и раствор канифоли в спирте. Лужение схемы до сборки элементов ни в коей мере не способствует разрешению этой проблемы.

Защита от загрязнения в процессе эксплуатации может быть в какой-то мере обеспечена при помощи нанесения защитных покрытий после сборки деталей. Об этом уже говорилось выше. Тем не менее если основание уже загрязнено, то покрытие на поверхности будет лишь задерживать доступ влаги и разрушение схемы.

Из сказанного выше следует, что изготовление изоляционных оснований для печатных схем должно производиться очень тщательно. Хорошо известно, что отпечатки пальцев на поверхности металла могут вызвать коррозию; менее очевидно, может быть, их воздействие на изолирующее основание. В Стэнфордском научно-исследовательском институте был проведен ряд интересных опытов на листе чистого ПТФЭ и на слоистом пластике из стекла с ПТФЭ. Влияние отпечатков пальцев на поверхностное сопротивление для чистого ПТФЭ поддавалось измерению только при влажности выше 95%. Наоборот, сопротивление изоляции слоистого пластика падало почти линейно от 10^6 до 1 *Мом* при увеличении влажности от 40 до 98%. Большие скопления пыли [93] в условиях умеренной влажности также вызывали заметное снижение сопротивления изоляции.

Другой причиной разрушения изоляционного материала является миграция серебра. Миграция происходит лишь в том случае, когда серебро находится в

физическом контакте с диэлектрическим материалом и вызывается обычно электролитическим перемещением ионов серебра в присутствии влаги и приложенного потенциала постоянного тока.

3.7. Воздействие процесса пайки на силу сцепления [93, 97]

Воздействие пайки на силу сцепления до некоторой степени зависит от того, производится ли она вручную или в ванне (о методе пайки в ванне погружением см. гл. V разд. 3).

В процессе пайки температура проводников может подниматься до 300°С и выше в зависимости от времени контакта и первоначальной температуры и теплоемкости паяльника. С другой стороны, это воздействие локализовано и сама полоска проводника действует как довольно эффективный теплоотвод.

Таким образом, хотя сила сцепления в точке контакта может падать почти до нуля, проводник не обязательно отделится, если на него не оказывать физического воздействия. Если же при этом не будет превышена известная критическая температура, то сила сцепления восстановится при охлаждении. Самой серьезной проблемой является замена дефектных деталей: нужен навык и опыт, для того чтобы избежать перегрева или механического повреждения, особенно таких многополюсных деталей, как ламповые панели и трансформаторы. Качество пайки может быть улучшено путем: 1) использования припоя с довольно низкой температурой плавления (т. е. 60% Sn и 40% Pb); 2) использования паяльника с низкой температурой наконечника и высокой теплоемкостью, желательнее с автоматической регулировкой температуры; 3) достаточно искусной работы в том отношении, что паяльник не должен находиться в контакте со схемой более 4 сек для каждого соединения.

Пайка в ванне (погружением) дает довольно равномерное, но относительно незначительное уменьшение силы сцепления по всему основанию. Это происходит

потому, что температуру припоя и время контакта можно контролировать гораздо точнее, чем при ручной пайке. Обычно при этом процессе основание погружается на 2—3 сек в раствор припоя при температуре 240°С. Однако трудность здесь заключается в том, что некоторые сорта слоистых материалов склонны к образованию пузырей. К сожалению, определить какие-либо рациональные и в то же время достаточно точные допуски для каждого материала при пайке погружением нелегко. Поэтому бывают случаи, когда в различных лабораториях при испытании образцов одного и того же материала, а именно при помещении их в паяльную ванну, приходят к совершенно различным выводам относительно допустимого времени погружения, даже если все прочие условия опыта по возможности идентичны. Это происходит в основном по двум причинам. Во-первых, теплостойкость слоистых материалов из фенольной бумаги очень быстро снижается при незначительном повышении температуры в области 240°С. Во-вторых, небольшие расхождения при составлении паяльных растворов могут привести к значительным отклонениям температуры припоя при контакте с основанием, хотя номинально растворы могут поддерживаться при одной и той же температуре.

В настоящее время изготовители печатных схем стремятся подходить к разрешению этой проблемы эмпирически. Отрегулировав производственный процесс, изготовитель проводит ряд опытов, испытывая однотипные материалы разных фирм. Обнаружив один или несколько сортов, которые выдерживают процесс пайки погружением, производственники отбирают эти сорта. Случалось, однако, что когда изготовитель слоистого материала пытался проверить опытным путем условия пайки, ему приходилось признать, что его материал практически непригоден для данной цели. При таком положении почти невозможно разработать спецификацию, которая удовлетворяла бы одновременно обе стороны.

Как правило, большинство слоистых пластиков почти одинаково проявляют себя в процессе пайки погружением, хотя и имеют отличительные особенности. Те фе-

нольные сорта, которые обладают большой силой сцепления в холодном состоянии, обычно выдерживают процесс пайки погружением лучше, чем более слабые материалы [93]. Единственным материалом, превосходство которого ярко выражено, является слоистый пластик из стекловолокна, пропитанный эпоксидной смолой. В самом деле, этот материал выдерживает температуру ванны выше 260° С, что облегчает получение прочных и надежных соединений. Кроме того, этот материал гораздо меньше подвержен повреждению при замене дефектных деталей.

4 ПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Медная фольга

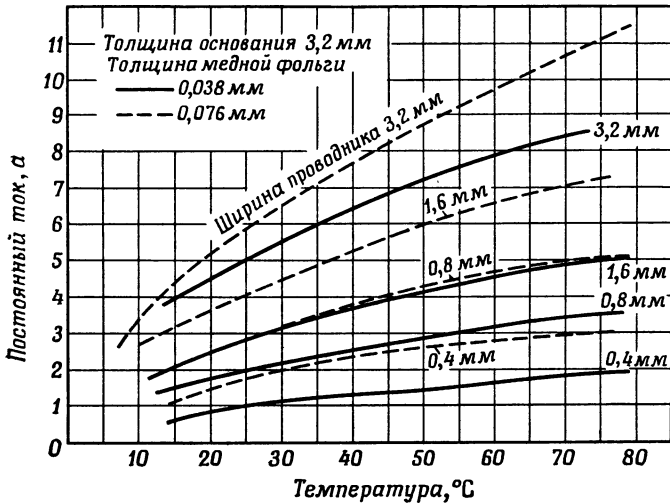
Медная фольга, которая обычно используется для печатных схем, получается электролитическим путем. Медь осаждается на барабанах из нержавеющей стали, вращающихся в растворе сульфата меди. Таким путем можно получать рулоны фольги в несколько десятков тысяч метров при ширине 127—152 см. Ввиду того что поверхность фольги, находящаяся в контакте со стальным барабаном, воспроизводит фактуру поверхности барабана, последний полируют до блеска. На обратной стороне поверхность матовая; это целесообразно, так как обеспечивает известную степень механического сцепления, давая таким образом хорошее сцепление между медной фольгой и диэлектрическим основанием. Свойства фольги во многих отношениях сходны со свойствами холоднокатаного медного листа. Фирма «Ройял Маинт Рефайнери» (Лондон) производит фольгу, имеющие следующие характеристики:

Чистота, %	Минимальная 99,9			
Проводимость, %	Минимальная 95			
Ширина, м	До 1,3			
Толщина, мм	0,025	0,035	0,070	0,100
Вес, 1 м ² , г	224	305	610	896

По специальным заказам может быть изготовлена фольга с другими характеристиками с минимальной

толщиной 0,003 мм. Большинство изготовителей печатных схем считают стандартной толщину 0,035 мм (обычно такую фольгу называют «одноунциевой»).

Очень важно, чтобы толщина фольги была по возможности равномерной и чтобы на ней не было даже маленьких отверстий. Отверстия нежелательны по двум



Фиг. 7.5. Допустимая сила тока для проводников из медной фольги, полученных способом травления.

причинам. Во-первых, это может привести к тому, что при малой ширине проводников возможно появление обрывов схемы. Во-вторых, во время приклейки через отверстие может проникнуть небольшое количество смолы, которая действует как кислотоупорный слой и может привести к тому, что процесс травления будет протекать не совсем правильно.

Были рассмотрены также другие металлы, причем вместо меди может быть использован недорогой алюминий, преимущество которого состоит в том, что он легче сцепляется со слоистыми пластиками. Но ввиду трудно-

Таблица 7.11

Физические константы различных металлов и сплавов

Металлы и сплавы	Относительное сопротивление ¹⁾	Температурный коэффициент сопротивления	Удельный вес	Коэффициент температурного расширения ²⁾	Средний коэффициент температурного расширения ($\times 10^6$)	Точка плавления, °C	Электродвижущая сила, в
Алюминий	1,64	0,0039	2,70	2,03	28,7	660	+ 1,7
Латунь (66% Cu, 34% Zn)	3,9	0,002	8,47	1,2	20,2	920	—
Кадмий	4,4	0,0038	8,64	0,92	31,6	321	+ 0,401
Углерод	2900	— 0,0005	—	—	—	3500	—
Константан (55% Cu, 45% Ni)	28,45	$\pm 0,0002$	8,9	0,218	14,8	1210	—
Медь, отожженная твердотянутая	1,00 ¹⁾	0,00393	8,89	3,88	16,1	1083	{ — 0,344 — 0,470 ³⁾
	1,03	0,00382	8,94	—	—	1083	— 0,470
Дюралюминий	3,34	0,002	2,7	1,603	—	500—637	—
Золото	1,416	0,0034	19,32	0,296	14,3	1063	{ — 1,30 — 1,50 ³⁾

Индий	9,0	0,00498	7,30	0,057	33,0	156,4	+ 0,336
Свинец	12,78	0,0039	11,34	0,344	29,4	327	+ 0,122 - 0,80 ³⁾
Мanganин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	26	± 0,00002	8,5	0,63	—	910	—
Нихром 1 (65% Ni, 12% Cr, 23% Fe)	65,0	0,00017	8,25	0,132	—	1350	—
Никель	5,05	0,0047	8,9	0,6	15,5	1455	+ 0,231
Палладий	6,2	0,0033	12,0	0,7	11,0	1549	- 0,820
Фосфористая бронза (4% Sn, 0,5% P, остальное Cu)	5,45	0,003	8,9	0,82	16,8	1050	—
Платина	6,16	0,003	21,4	0,695	9,0	1774	- 0,863
Родий	4,9	—	12,4	0,21	—	1966	—
Серебро	0,95	0,0038	10,5	4,19	18,8	960,5	- 0,7978
Олово	6,7	0,0042	7,3	0,64	26,9	231,9	+ 0,136
Цинк	3,4	0,0037	7,14	1,12	26,3	419	+ 0,7618

¹⁾ Сопровитвление отожженной меди $1,724 \times 10^{-6}$ ом/см² при 20° С.

²⁾ Коэффициент удельной теплопроводности = $\frac{\text{Теплопередача, вт} \times \text{толщина, см}}{\text{Площадь, см}^2 \times \text{изменение температуры, } ^\circ\text{С}}$.

³⁾ Существует два типа ионов.

Относительно металлов, не указанных в этой таблице, см. работу [82].

стей, с которыми приходится сталкиваться при пайке алюминия, он почти не применяется. Электрические свойства этих и других металлов, используемых в качестве проводников или металлических покрытий проводников, приведены в табл. 7.11, а на фиг. 7.5 показана пропускная способность медных проводников различной ширины и толщины.

4.2. Характеристики металлопокрытий

Очень часто желательно гальванизировать печатные проводники. Целью этого процесса может быть: 1) обеспечение защиты от коррозии; 2) увеличение сопротивления механическому износу; 3) увеличение предельно допустимых токов в схеме; 4) улучшение пайки.

Гальванизацию можно проводить до печати, и тогда она является частью процесса травления (т. е. она служит для той же цели, что и кислотоупорный слой), или после печати.

Ниже будут рассмотрены в общих чертах характеристики трех способов применительно к проектированию печатных контактных переключателей; о других возможностях применения гальваностегии сообщалось выше. Выбор металла зависит от характера использования и предъявляемых требований. В табл. 7.12 рассмотрены некоторые практически применяемые металлы и их назначение.

Важным вопросом, который следует рассмотреть, является вопрос о том, ослабляет ли гальванизующий раствор связь между медью и основанием. Цианид¹⁾ и некоторые кислые растворы действительно ослабляют эту связь, и, следовательно, пригодность металлов, гальванизировать которые можно только из этих растворов, стоит под вопросом.

¹⁾ Некоторые изготовители (например, «Континентал даймонд фибр») могут поставлять специальные сорта слоистых материалов с медным покрытием, связь которого с основанием устойчива к действию горячих растворов цианида.

Таблица 7.12

Металлические покрытия и их сравнительные характеристики

Способ покрытия	Назначение
Серебро, нанесенное мгновенным погружением	Кратковременная защита от коррозии
Серебро, нанесенное гальваническим способом; толщина пленки 0,0025—0,051 <i>мм</i>	Обеспечение хорошего контакта при малой скорости
Припой (60% Sn, 40% Pb), нанесенный гальваническим способом	Для облегчения процесса пайки
Золото, нанесенное мгновенным погружением	Защита от коррозии и облегчение пайки
Золото, нанесенное гальваническим способом; толщина пленки 0,0025—0,013 <i>мм</i>	Хорошая электрическая контактная поверхность
Индий, нанесенный гальваническим способом; толщина пленки 0,005—0,013 <i>мм</i>	Хорошая антикоррозионная контактная поверхность
Никель, нанесенный гальваническим способом; толщина пленки 0,006—0,013 <i>мм</i>	Твердая износостойчивая контактная поверхность для переключателя
Никель — родий, нанесенные гальваническим способом; толщина никелевого покрытия 0,006—0,013 <i>мм</i> ; толщина родиевого покрытия 0,00012—0,001 <i>мм</i>	Твердая антикоррозионная износостойчивая контактная поверхность для переключателей (пригодна для периодической и непрерывной работы)
Серебро — родий, нанесенные гальваническим способом; толщина серебряного покрытия 0,006—0,013 <i>мм</i> ; толщина родиевого покрытия 0,00013—0,00025 <i>мм</i>	Хорошая антикоррозионная контактная поверхность для переключателей (пригодна для случая, когда никель нельзя применить из-за его ферромагнитных свойств)

4.3. Проводящие краски

Рецептура проводящей краски или красочного покрытия зависит от используемого материала основания и от способа нанесения покрытия. Допустимая температура сушки и применимость тех или иных растворителей определяются видом изоляционного основания. Способ нанесения (щетка, струя или трафарет) определяют исходя из необходимой вязкости и, следовательно, относительных пропорций компонентов краски.

Таблица 7.13

Рецептуры проводящих красок

Материал основания	Керамические материалы	Стекло	Термо-реактивные пластмассы	Термо-пластичные пластмассы
Температура обжига или плавления, °С	450—800	450—650	25—175	25—75
Пигмент, %	Мелкий серебряный порошок, 65	Мелкий серебряный порошок, 65	Мелкий серебряный порошок, 70	Мелкий серебряный порошок, 70
Связующее	Целлюлозная смола, 13%; мелкодисперсное стекло с низкой точкой плавления, 12%	Целлюлозная смола, 13%; мелкодисперсное стекло с низкой точкой плавления, 12%	Целлюлозная смола в метакриловой смоле, фенольные смолы, 20%	Метакриловая смола, полистирольная смола, 20%
Растворитель	Ацетаты или производные целлозольва, 10%	Ацетаты или производные целлозольва, 10%	Ацетаты, кетоны или производные целлозольва, 10%	Кетоны, бензол, толуол или этилендихлорид, 10%

Примечание: Все процентные отношения даны по весу.

В табл. 7.13 даны некоторые типовые рецепты красок для различных материалов основания.

Когда-то в США имелось в продаже большое количество таких материалов, которые не требовали дополнительной обработки перед применением. Составы, затвердевающие на воздухе и имеющие низкую температуру обжига, первоначально предназначались для нанесения на листовые пластмассовые материалы и слоистые пластики. Они состоят из связующего, растворителя и проводящего металлического порошка, обычно серебряного, который тщательно измельчается в валковой дробилке, шаровой мельнице или другом подобном устройстве. Затем этот состав высушивают воздухом или обжигают, растворитель при этом улетучивается, а связующее затвердевает, причем частички серебра сцепляются друг с другом, а также с материалом основания, на которое наносят краску. Ввиду того что частички серебра разделены частично изолирующим материалом, проводимость редко превышает 20% проводимости чистого серебра. Вообще, чем выше температура обжига, тем больше проводимость, сила сцепления и сопротивление царапанию. Удовлетворительная пайка при работе с низкотемпературными красками, как правило, затруднена.

Обжигаемые составы требуют обработки при температурах в интервале 450—650°С и предназначены для использования на керамических материалах или стекле, которые в этом случае служат основанием. Они подобны низкотемпературным материалам, но в них добавляется керамический флюс, представляющий собой не что иное, как мелкодисперсное стекло с низкой точкой плавления. При нагревании происходят различные изменения. Во-первых, улетучивается нестойкий растворитель и затем при повышении температуры печи выгорает связующее. Наконец, плавится флюс. При охлаждении оказывается, что мелкие частички серебра прочно вкрапливаются в расплавленный флюс, который в свою очередь прочно сцепляется с материалом основания. Адгезия отличная, и проводимость может составлять 95% проводимости чистого серебра. При изгото-

влении устойчивых красок заменяют относительно мало-проводящие материалы, например газовую сажу или коллоидную сажу, серебряным пигментом. К сожалению, при этом приходится сталкиваться с целым рядом трудностей. Во-первых, составление рецептуры в достаточной мере устойчивой краски — довольно сложное дело. Во-вторых, в том случае, когда нужно получить прочное изделие, возникает проблема нанесения краски. Подробнее об этом говорится в гл. VIII, разд. 4.

Важным фактором удовлетворительного использования всех проводящих красок является подготовка основания. Кроме того, нужно тщательно выполнять рекомендации поставщиков относительно температуры и длительности обжига.

Более подробное обсуждение проблем, связанных с серебряными красками, их составом, изготовлением и применением, можно найти в [4, 5].

4.4. Миграция серебра

Миграция серебра обычно происходит тогда, когда серебро находится в контакте с диэлектриком. Она может рассматриваться как электролитическое перемещение серебра из его первоначального состояния, сопровождаемое химическим восстановлением в металлическое серебро. Эффект в чистом виде проявляется в уменьшении сопротивления изоляции и электрической прочности на пробой, что иногда приводит к полному разрушению материала.

Миграция серебра происходит только при некоторых специфических условиях. Во-первых, между двумя или более проводниками должны существовать участки, на которых скапливается влага. Они могут находиться на поверхности, как, например у керамических или высокоэортных листовых пластических материалов, или внутри материала, как, например, у слоистых материалов. Во-вторых, приложенные электрические потенциалы должны иметь постоянную составляющую. Если к схеме приложены лишь потенциалы переменного тока, миграция серебра не происходит.

Скорость миграции серебра определяется относительной влажностью, величиной приложенного поля постоянного тока и временем, в течение которого действуют эти оба фактора. Экспериментальным путем было обнаружено, что самая быстрая миграция серебра наблюдается при влажности выше 90%, и очень небольшая (а иногда и совсем не наблюдается) миграция происходит при влажности ниже 30%. Таким образом, для схем бытового назначения этот эффект незначителен, и оценка его дает основание предположить, что разрушение схемы вряд ли произойдет ранее, чем через 8 лет. С другой стороны, это явление должно быть учтено при проектировании схем для промышленного использования.

Очевидно, что любой метод, при котором серебро находится в непосредственном контакте с материалом основания, должен рассматриваться как сомнительный. Это касается большинства методов, описанных в гл. II, за исключением штампованной проводки, так как серебро обычно используется или как проводник, или как основа для последующего нанесения меди.

Если серебро обязательно должно находиться в контакте с изолирующим основанием и если создание условий для миграции серебра неизбежно, то для снижения действия этих факторов необходимо принять следующие меры предосторожности. Во-первых, желательнее использовать диэлектрический материал, который обладает ничтожно малой адсорбцией влаги, даже если он в течение длительного времени находится во влажной атмосфере. Лучше всего в этом случае применять керамику или высококачественные пластмассовые материалы, такие, как ПТФЭ. Во-вторых, законченную схему, включая проводники, нужно пропитать в условиях вакуума влагонепроницаемой смолой или воском. По причинам, изложенным выше, это не так легко и эффективно, как кажется на первый взгляд. В самом деле, это может даже ускорить разрушение схемы. Вместо этого схему после сушки можно поместить в герметически закрытый стеклянный или металлический сосуд; этот метод, однако, связан с большими затратами и может использоваться лишь в особых случаях.

Глава VIII

ПЕЧАТНЫЕ ДЕТАЛИ ДЛЯ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЧАСТОТ

Термин «печатная схема» можно свободно использовать для всех случаев применения методов, описанных в предыдущих главах. Исходя из этого, хотелось бы четко разграничить печатную проводку, которая только обеспечивает необходимую электрическую связь между стандартными деталями, и печатные схемы, где по крайней мере некоторые детали печатаются как часть проводки. В этой главе рассмотрены возможности печати таких элементов, как индуктивности, конденсаторы, переключатели, коммутаторы и сопротивления. В двух последующих главах рассматриваются вопросы, связанные с печатью схем микроволнового диапазона.

Возможность печати некоторых деталей зависит от двух основных факторов. Во-первых, электрические параметры печатной детали должны удовлетворять определенным требованиям и, во-вторых, метод изготовления печатных деталей по сравнению с обычными методами должен быть экономически оправдан. В частности, оценка будет зависеть от таких факторов, как вид детали, ее удельный вес в схеме, допуски, условия обработки, характер изоляционного основания и используемого в данном случае способа печати. Так, например, добиться этим методом высоких значений емкости довольно трудно, если не считать возможности вжигания серебра в керамику, где в качестве керамики используется титанат. Наоборот, малые емкости, обычно используемые в высокочастотных схемах с удовлетворительным Q -фактором, можно получить, применяя не дорогой изоляционный материал с низкими потерями, а дешевый и доступный фенольный пластик. Подобные

соображения до некоторой степени приемлемы для печатных катушек, хотя в этом случае не найден удовлетворительный метод получения индуктивностей выше нескольких микрогенри.

На печатные контакты переключателей и коммутаторов должно быть дополнительно нанесено гальванопокрытие, стоимость нанесения которого следует сравнить со стоимостью изготовления обычных деталей. Преимущества печатных методов будут выявляться при усложнении переключателей, например при изготовлении дисков для цифрового кодирования. Печатный метод представляется единственно возможным, обеспечивающим нужную точность при сравнительно небольшой стоимости.

Наибольшие трудности возникают при изготовлении печатных сопротивлений, которые в сущности можно получать лишь методом вжигания серебра в керамику. Исключение составляют низкоомные сопротивления, применяемые для тензодатчиков или для антиобледенителей, так как в этих случаях практически имеют дело с длинным витым медным проводником достаточно малой ширины и толщины.

Положительным качеством печатных деталей часто считают стабильность электрических свойств. В самом деле, там, где применяется точный печатный процесс (например, фотомеханическое травление), для металлических проводников можно получить исключительную размерную устойчивость. Однако не следует забывать, что качество печатных деталей зависит также от свойств изоляционного основания, т. е. допусков на толщину и диэлектрическую постоянную, и от изменения этих параметров при изменении температуры и влажности. Так, например, допуски на печатный конденсатор вряд ли лучше с какой-либо точки зрения, чем для обычной детали.

В настоящее время наилучший допуск для печатных сопротивлений общего характера, выпускаемых любой фирмой, составляет 10%. Даже при таких допусках процесс остается относительно сложным и экономически невыгодным. Поэтому такой метод применяется

довольно ограничено. Тем не менее одна фирма выпускает небольшие печатные узлы с некоторым количеством печатных сопротивлений.

1. ПЕЧАТНЫЕ КАТУШКИ

1.1. Принципы проектирования

Катушки могут быть отпечатаны без особого труда как часть печатной проводки. Если поверхность катушки цилиндрическая, можно получить относительно высокие значения индуктивности и хороший Q -фактор (для материала с низкими потерями). На плоских поверхностях единственно возможными формами являются одновитковая петля или многовитковая спираль (фиг. 8.1). Вообще такие катушки, если они отпечатаны на немагнитных материалах, из-за размера ограничены по индуктивности до 50 $\mu\text{кГн}$ и имеют Q -фактор обычно ниже, чем цилиндрические. Если катушку предстоит вводить в магнитную среду с относительной магнитной проницаемостью μ , то индуктивность увеличится в μ раз. Однако редко оказывается возможным, особенно при работе с плоскими спиральными катушками, добиться хорошей связи катушки с магнитной средой или обеспечить замкнутый путь для магнитного потока. Следовательно, индуктивность, достигаемая путем использования магнитного материала в качестве основания или дополнительного элемента, значительно ниже, чем индуктивность, вычисленная для однородной среды бесконечной протяженности и высокой магнитной проницаемости.

Другой способ увеличения индуктивности заключается в том, что печатают две катушки, по одной на каждой стороне изоляционного основания. Общая самоиндукция двух катушек, соединенных последовательно, будет равна

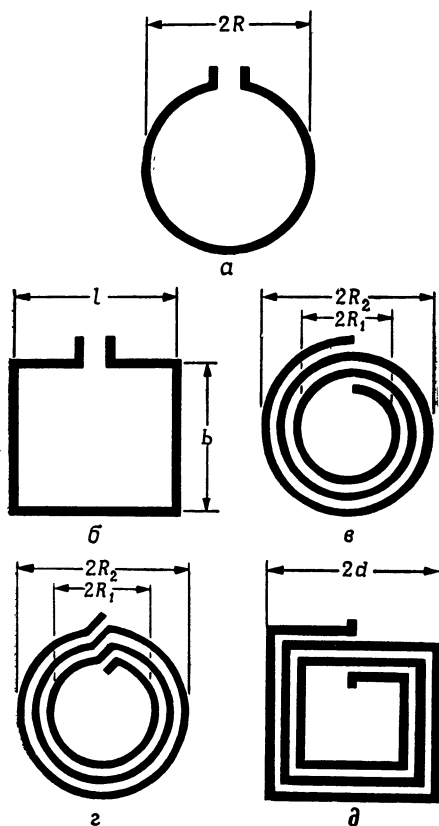
$$L = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad (1)$$

и взаимоиנדукция

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}, \quad (2)$$

где k — коэффициент связи.

Если основание достаточно тонкое, k может быть доведено до значения, почти равного единице, и может



Ф и г. 8.1. Некоторые типовые печатные индуктивности.

Катушки (z) и (д) вычертить значительно легче, чем катушку (в).

быть получена общая индуктивность, почти в 4 раза больше индуктивности отдельной катушки. Этот процесс при желании можно продолжить и получить таким

образом ряд спиралей, последовательно включенных и соответственно изолированных друг от друга. В самом деле, используя метод печати, описанный выше, удалось сконструировать полностью источник питания на 50 гц с печатным и силовым трансформатором и дросселем.

Важное значение в конструкции катушек имеет Q -фактор. Хорошо известно, что Q -фактор изменяется обратно пропорционально потерям в схеме; соответственно чем выше Q -фактор, тем острее резонансная кривая настроенного контура. Q -фактор катушки зависит:

1. От сопротивления проводников в радиочастотном диапазоне, которое определяется формой печатных проводников и сопротивлением их при прохождении постоянного тока, а также от рабочей частоты. Для обеспечения большого по величине Q -фактора проводник должен иметь:

а) удельное электрическое сопротивление, близкое к удельному электрическому сопротивлению чистой меди или серебра;

б) толщину, по меньшей мере в несколько раз большую глубины скин-эффекта. Последняя определяется как глубина, при которой плотность тока падает до значения $1/e$ на поверхности и выражается формулой

$$d = 159 \sqrt{\rho / f \mu} \text{ см}, \quad (3)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проводника, $ом/см$; μ — относительная магнитная проницаемость проводника (одинаковая для меди и серебра) и f — частота, $кгц$;

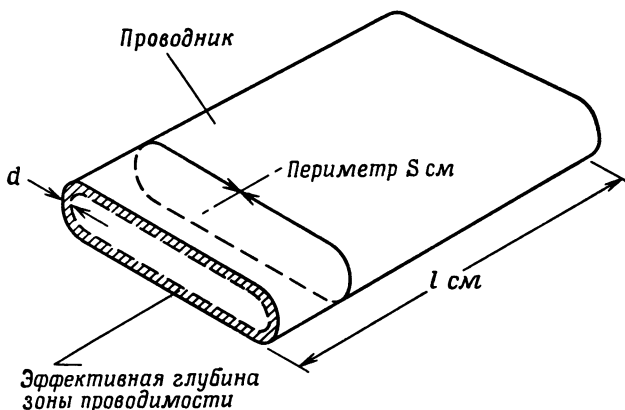
в) правильно выбранный периметр проводника S , определяющий сопротивление на единицу длины (фиг. 8.2)

$$R = \frac{\rho}{Sd} \text{ ом/см}; \quad (4)$$

г) такое взаимное расположение проводников, при котором токи будут равномерно распределяться по поверхности металлических проводников. Плоские проводники не идеальны в этом отношении, они имеют тенденцию к концентрации тока на острых концах. Таким об-

разом, для изолированных полосковых проводников сопротивление радиочастотам будет приблизительно вдвое больше, чем получаемое по уравнению (4).

С другой стороны, если витки расположены близко друг от друга и края находятся на небольшом расстоянии, как в случаях (в), (г) и (д) (фиг. 8.1), токи распределяются более равномерно с понижением концентрации на краях.



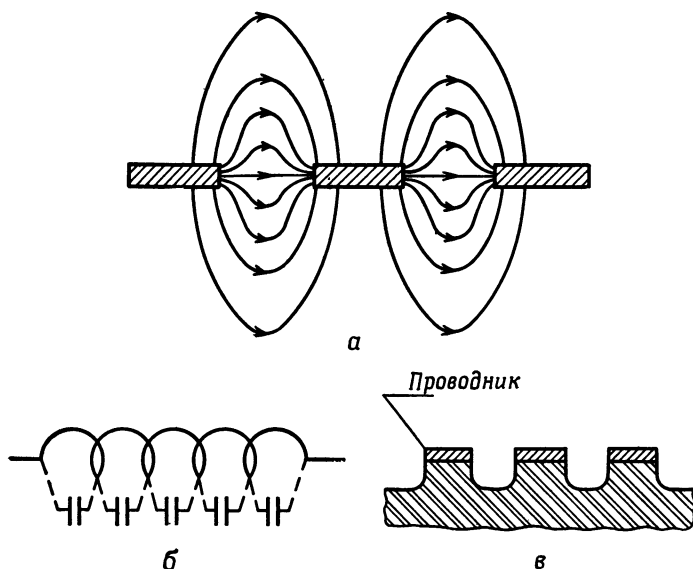
Фиг. 8.2. Распределение токов при высоких частотах за счет действия скин-эффекта.

Сопротивление при высоких частотах, следовательно, выше, чем сопротивление постоянному току.

Однако при близком расположении проводников все преимущества теряются из-за увеличения диэлектрических потерь, как будет показано ниже.

2. *От диэлектрических потерь в изоляционном основании.* Между каждой парой смежных витков возникает разность потенциалов, причем сумма всех межвитковых напряжений равна общему напряжению на клеммах катушки. Разность потенциалов между витками создает электрическое поле, общий вид которого показан на фиг. 8.3, а. Это поле в свою очередь вызывает токи смещения, большая часть которых концентрируется непосредственно между двумя смежными проводниками.

Кроме тока смещения, который пропорционален квадрату межвиткового напряжения, образуется также ток утечки, амплитуда которого пропорциональна диэлектрическим потерям ($\operatorname{tg} \delta$) среды. Этот ток утечки вызывает рассеяние электрической энергии и, следовательно,



Ф и г. 8.3. Паразитная межвитковая емкость катушки.

а — электрические силовые линии между проводниками; *б* — эквивалентная схема; *в* — метод уменьшения паразитных емкостей за счет удаления диэлектрика из области максимальной концентрации электрического поля.

способствует снижению Q -фактора. Его воздействие может быть уменьшено различными способами:

- а) путем использования изоляционного материала с низкими потерями в качестве основания для металлических проводников, такого, например, как керамика или высококачественные пластики (например, ПТФЭ);
- б) путем увеличения промежутков между витками;
- в) путем образования проводников на рельефных участках изолятора, как показано на фиг. 8.3, в, таким образом, чтобы на участках сильных электрических

полей, т. е. непосредственно между двумя соседними витками, не было изоляционного материала. Этот метод не имеет еще широкого распространения.

В связи с этим следует подчеркнуть, что если катушки отпечатаны на обеих сторонах основания и для увеличения индуктивности включены последовательно, то наблюдается более чем пропорциональное увеличение паразитной емкости и, следовательно, явное снижение Q -фактора. Причина этого заключается в следующем. Помимо паразитной емкости, между витками на одной и той же стороне основания возникает также паразитная емкость между витками, расположенными на противоположных сторонах. Однако напряжение между такими витками будет значительно больше, чем напряжение между соседними витками, следовательно, и токи утечки будут пропорционально больше. Кроме того, поле между этими витками полностью проходит через изоляционный материал, где большие потери.

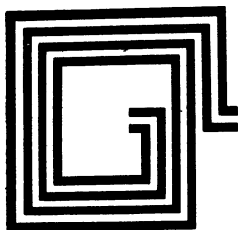
3. *Потери в магнитных материалах.* Большинство магнитных материалов имеет высокую диэлектрическую постоянную, так что токи смещения велики, а потери незначительны. Если же они помещены очень близко к проводникам катушки, то происходит сильное увеличение диэлектрических потерь. Помимо этого, имеют место обычные потери на гистерезис. Тем не менее путем правильного выбора магнитного материала и правильного расположения катушки и магнитного сердечника можно добиться того, что относительное увеличение индуктивности будет больше, чем относительное увеличение потерь. При этих условиях Q -фактор возрастает.

Индуктивность катушки может быть определена с достаточной степенью точности по формулам, приведенным ниже. Однако, как видно из вышеизложенного, точное вычисление Q -фактора произвести довольно сложно.

Правильный чертеж катушки можно изготовить, лишь обладая известным опытом. Интересно, например, рассказать об одной работнице, не имевшей технического образования, но в течение длительного времени

занимавшейся измерением Q -факторов и испытанием новых конструкций. Она могла, только взглянув на катушку, предсказать Q -фактор с большей точностью, чем инженеры, конструировавшие эти катушки!

Если нужна система взаимосвязанных катушек, т. е. трансформаторы промежуточной частоты, то требуемая взаимоиндукция может быть получена различными путями. Для сильной связи катушки должны быть напечатаны концентрически на противоположных сторонах основания; для более слабой связи центр их может быть смещен; для очень слабой связи их можно печатать рядом на той же самой поверхности. Во многих случаях печать катушек на обеих сторонах основания чрезвычайно неудобна, а именно тогда,



Фиг. 8.4. Печатная схема бифилярного трансформатора, обеспечивающая высокий коэффициент связи.

когда стандартные детали смонтированы на том же основании и когда для получения соединений прибегают к пайке погружением в припой. В этом случае высокий коэффициент связи можно получить, используя катушки с бифилярной намоткой (фиг. 8.4); это удобно только тогда, когда две катушки должны иметь примерно одинаковую индуктивность, причем желательно, чтобы коэффициент связи был близок к единице. Две катушки могут быть также напечатаны рядом на одной и той же поверхности с искусственным увеличением связи за счет пластины из магнитного материала, помещенного на нижней стороне основания и перекрывающего обе катушки. Трудность состоит лишь в обеспечении стабильности параметров.

Межвитковая емкость, оказывающая влияние на Q -фактор, изменяет также и другие параметры катушки. Так как эта емкость включена параллельно катушке, она изменяет эффективное индуктивное сопротивление катушки в k раз. k можно вычислить по формуле

$$k = \{1 - (f/f_0)^2\}^{-1}, \quad (5)$$

где f_0 — резонансная частота контура, образованного индуктивностью и ее собственной паразитной емкостью. При частоте, большей f_0 , эквивалентное сопротивление катушки будет иметь емкостной характер. Нетрудно определить паразитную емкость путем измерения индуктивности катушки при двух или более частотах, предположим, на куметре. В то же время расчет паразитной емкости при заданной конструкции катушки весьма затруднителен. Возможно, однако, дать приблизительную оценку f_0 . Спиральный проводник можно рассматривать как линию передачи, эквивалентную последовательной индуктивности (при замкнутом свободном конце) до частоты, при которой электрическая длина равна четверти длины волны; при более высокой частоте линия приобретает емкостной характер. Следовательно, частоту f_0 можно оценить путем определения частоты, при которой электрическая длина составляет $1/4$ длины волны. К сожалению, нам неизвестна фазовая скорость в эквивалентной линии передачи, которая является функцией геометрической конфигурации и эффективной диэлектрической постоянной (частично воздух, частично изолирующий материал). Тем не менее не произойдет большой ошибки, если принять скорость $c/\epsilon_r^{1/2}$, где c — скорость света в свободном пространстве (а именно $3 \cdot 10^{10}$ см/сек) и ϵ_r — относительная диэлектрическая постоянная материала (т. е. около 5 для фенольных слоистых материалов). В этом случае

$$f_0 \approx c(4l\epsilon_r^{1/2})^{-1} \text{ гц.} \quad (6)$$

Таким образом, резонансная частота f_0 для катушки в 5,5 мкгн, содержащей 20-витковую полностью намотанную спираль, с внешним диаметром 4 см, отпечатанной на фенольном слое материала, будет 30 Мгц. Эта частота соответствует паразитной собственной емкости, равной примерно 5 пф.

1.2. Формулы для расчета индуктивности

Ниже приводятся некоторые несложные и часто употребляемые формулы для расчета индуктивности и взаимной индукции. Точность их обычно достигает 0,5%.

Эти формулы заимствованы из четырех основных источников, упомянутых в работах [115, 117, 119, 122]; любая из них может быть использована для других видов катушек, не рассматриваемых здесь. В связи с этим следует подчеркнуть, что в литературе по расчетам спиральных катушек имеется некоторое несоответствие. Представлено три решения: классическое, приближение по Вилеру и эмпирическая формула Бриана, которая, как полагают, дает наибольшее соответствие с результатами измерений.

При использовании этих формул полезно учесть следующие основные положения:

1) главным фактором, определяющим индуктивность одновитковой петли, является площадь, заключенная в плоскости петли. Следовательно, петли, ограничивающие одну и ту же площадь, при использовании тех же самых проводников обладают фактически одной и той же индуктивностью;

2) для заданной площади кольцеобразная петля соответствует наименьшей длине проволоки и, следовательно, наиболее высокому Q ;

3) при условии, что связь между витками достаточно сильная, индуктивность возрастает как квадрат числа витков;

4) в большинстве случаев поперечные размеры проводников относительно мало влияют на индуктивность;

5) форма поперечного сечения проводника также не имеет большого значения. Поэтому трубчатый проводник с диаметром d будет иметь ту же индуктивность, что и тонкий полосковый проводник шириной d ;

6) замечания, изложенные в п. (4) и (5), в равной степени относятся и к взаимной индукции.

1.3. Формулы для вычисления индуктивности

Все размеры даны в сантиметрах. Индуктивность — в микрогенри. Все логарифмы при основании e ; $\lg x = 2,303 \lg_{10} x$. Предполагается, что проводники немагнитные (например, медные) и находятся в среде с магнитной проницаемостью, равной 1 (т. е. в вакууме). Для

магнитной среды с относительной проницаемостью μ нужно результат умножить на μ .

1. *Самоиндукция прямого отрезка проводника.*

Для круглых проводов длиной l и диаметром d

$$L = 0,002l \left(\lg \frac{4l}{d} - 0,75 \right) \text{ при низких частотах} \quad (7a)$$

падает до

$$L = 0,002l \left(\lg \frac{4l}{d} - 1,0 \right) \text{ (при очень высоких частотах),} \quad (7b)$$

что вызвано скин-эффектом.

Для прямоугольного стержня длиной l , шириной b и толщиной c

$$L = 0,002l \left(\lg \frac{2l}{b+c} + 0,5 + 0,224 \frac{b+c}{l} \right), \quad (8)$$

если $l > 50(b+c)$, последним членом в уравнении можно пренебречь.

2. *Одновитковые петли в одной плоскости* (см. фиг. 8.1 а, б).

Следующая формула справедлива для любой правильной фигуры, расположенной в одной плоскости, и для любого поперечного сечения проводника при условии, что средний периметр l петли больше периметра поперечного сечения проводника:

$$L = 0,002l (\lg A - B), \quad (9)$$

где $A = 4l/d$ для круглого провода диаметром d ;

$A = 2l/(b+c)$ для прямоугольных проводников шириной b и толщиной c ;

$B = 2,451$ для круга;

$B = 2,561$ для правильного восьмиугольника;

$B = 2,636$ для правильного шестиугольника;

$B = 2,712$ для правильного пятиугольника;

$B = 2,853$ для квадрата;

$B = 3,197$ для равностороннего треугольника;

$B = 3,332$ для равнобедренного прямоугольного треугольника. Для прямоугольной петли со сторонами a и

b с круглым проводом, имеющим радиусом r ,

$$L = 0,004 \left\{ a \lg \frac{2a}{r} + b \lg \frac{2b}{r} + 2(a^2 + b^2)^{1/2} - \right. \\ \left. - a \sin h^{-1} \frac{a}{b} - b \sin h^{-1} \frac{b}{a} - 1,75(a + b) \right\} \quad (10)$$

3. *Плоская круговая спиральная катушка* (фиг. 8.1, в, з).

Пусть N — количество витков;

$$a — \text{средний радиус} = \frac{1}{2}(R_1 + R_2),$$

$c = R_2 - R_1$ — полоса, занятая витками катушки.

Классическая формула [115, 117, 119] имеет вид

$$L = 0,004\pi N^2 a \left\{ \left(\lg \frac{8a}{c} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{24} \left(\frac{c}{a} \right)^2 \left(\lg \frac{8a}{c} + 3,583 \right) \right\}. \quad (11)$$

Для случая, когда $R_1 = 0$, т. е. когда спираль доходит до центра, формула упрощается и имеет вид

$$L = 0,0138a N^2, \quad (12a)$$

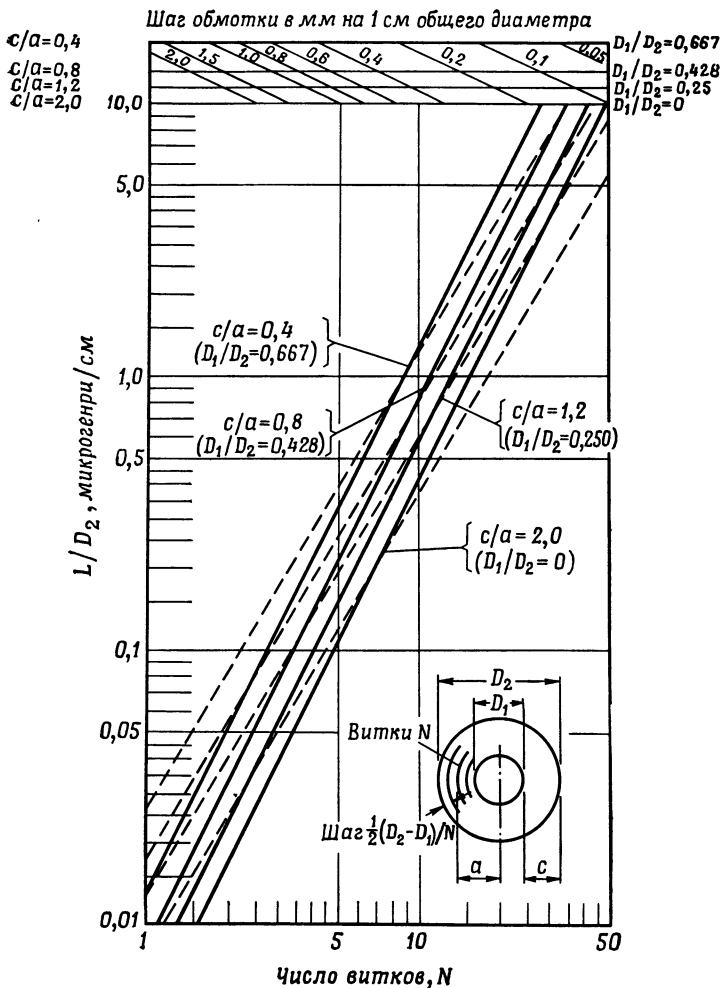
$$L = 0,00345 D_1 N^2, \quad (126)$$

где $D_1 = 2R_1$ — общий диаметр катушки.

Эйслер [37] вывел простое приближение, которое дает цифровые значения, отклоняющиеся на несколько процентов от данных уравнения (11) почти во всех случаях,

$$L = 0,394a^2 N^2 / (8a + 11c). \quad (13)$$

Во всех вышеприведенных формулах предполагается равномерное распределение тока. Промежутки между витками бесконечно малы, и изменяющееся вследствие скин-эффекта распределение токов при высоких частотах не принимается во внимание. Бриан [111], проводивший измерения на многих печатных катушках, заявил, что применение этих формул может повлечь за собой довольно значительные ошибки. Из результатов своих измерений он вывел следующую эмпирическую



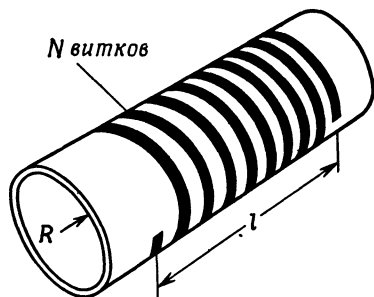
Фиг. 8.5. Индуктивность спиральных катушек.

Сплошные линии получены по классической формуле; штриховые линии — по эмпирической формуле; индуктивность квадратной катушки со стороной D_2 на 12% выше индуктивности цилиндрической катушки с внешним диаметром D_2 . Для получения максимального значения Q -фактора следует использовать $c/a=0,8$ (т. е. $D_1/D_2=0,428$).

формулу, которая в большинстве случаев якобы имеет точность до 5%:

$$L = 0,0215a N^{5/3} \lg 8a/c. \quad (14)$$

На фиг. 8.5 приведены кривые, вычерченные по двум формулам Бриана и классической формуле. На участках, представляющих практический интерес, расхождение между двумя решениями меньше, чем ошибка, которую можно было бы ожидать вследствие других возможных причин, а именно индуктивности соединительных проводов, межвитковой емкости и т. д.



Фиг. 8.6. Цилиндрическая катушка.

Интересно отметить, что при заданной индуктивности минимальная длина проводника спиральной катушки достигается при $a/c \approx 0,75$. Это условие дает также максимальный Q -фактор для данного общего размера катушки. (Другими методами

повышения Q -фактора являются: увеличение общего размера катушки и замена материала основания материалом, имеющим более низкую проводимость и меньший $\text{tg } \delta$.)

4. *Плоская квадратная спиральная катушка* (фиг. 8.1, ∂).

Следует ожидать, что в этом случае индуктивность будет та же самая, что и для круговой спиральной катушки с такой же площадью. Следовательно, если принять $2d = 2R_2$ (см. фиг. 8.1), то индуктивность квадратной катушки будет примерно на 12% выше индуктивности круговой. Это следует, по-видимому, из экспериментов Бриана [111], так как для квадратных катушек он приводит следующую формулу:

$$L = 0,0241a N^{5/3} \lg 8a/c, \quad (15)$$

где a — средняя длина стороны квадрата и c — полоса, занятая витками катушки, как и раньше.

В литературе предлагаются по крайней мере две другие формулы; одна из них слишком громоздка, а другая содержит серьезные ошибки для тех случаев, которые как раз представляют особый интерес. Однако, как и ранее, условие $a/c \approx 0,75$ оказывается оптимальным.

5. *Цилиндрическая однослойная катушка* (фиг. 8.6).

Для обычных соотношений размеров следующая формула обеспечивает точность до 1%:

$$L = N^2 \frac{R^2}{2,54(9R + 10l)}, \quad (16)$$

где l и R — соответственно средняя длина и радиус катушки.

Более точные формулы приведены в работах [115, 117, 119].

1.4. Формулы для вычисления взаимоиндукции

Все размеры даны в сантиметрах; индукция в микрогенри. Все логарифмы при основании e ; $\lg x = 2,303 \lg_{10} x$. Предполагается, что проводники немагнитные (например, медные), очень тонкие и находятся в среде с магнитной проницаемостью, равной 1 (т. е. в вакууме). Для магнитной среды с относительной проницаемостью μ нужно результат умножить на μ .

1. *Взаимоиндукция между двумя параллельными проводниками равной длины*

$$M = 0,002 \left\{ l \lg \left(\frac{\sqrt{l^2 + D^2} + l}{D} \right) - \sqrt{l^2 + D^2} + D \right\}, \quad (17)$$

где l — длина проводников и D — расстояние между их осевыми линиями. Если токи имеют противоположное направление, M будет иметь отрицательное значение.

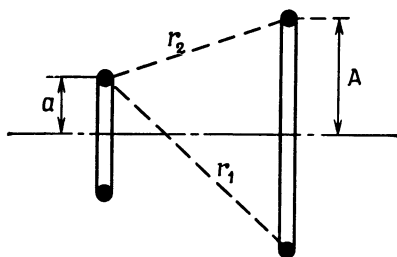
2. *Взаимоиндукция двух круговых коаксиальных петель, лежащих в параллельных плоскостях* (фиг. 8.7).

К сожалению, решение нельзя выразить в простой аналитической форме, так как оно включает в себя эл-

липтический интеграл. Тем не менее можно записать

$$M = N \sqrt{Aa}, \quad (18)$$

где N — функция r_1/r_2 , представленная графически на фиг. 8.8. Величины r_1 и r_2 выражают соответственно



Ф и г. 8.7. Взаимосвязанные одновитковые цилиндрические катушки, расположенные на одной оси параллельно друг другу.

самое длинное и самое короткое расстояние между точками на окружностях двух кругов. Они относятся к радиусам круга A и a следующим образом:

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt{\frac{(1 - a/A)^2 + D^2/A^2}{(1 + a/A)^2 + D^2/A^2}}. \quad (19)$$

3. *Взаимная индукция между двумя параллельными квадратами, один из которых является перпендикулярной проекцией другого.*

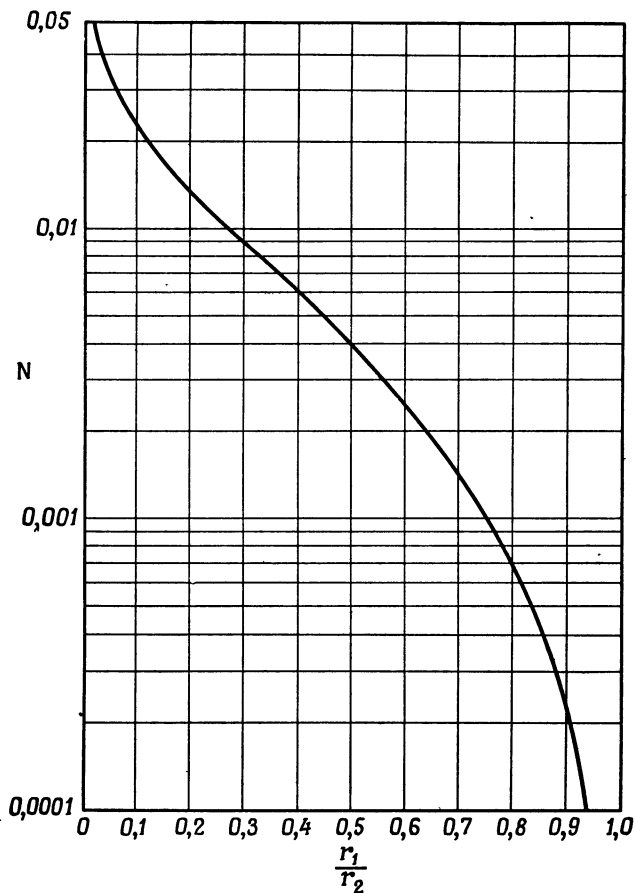
Этот случай подобен изображенному на фиг. 8.7, с той лишь разницей, что петли квадратные одинакового размера:

$$M = 0,004l \lg \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + D^2}}{l + \sqrt{2l^2 + D^2}} \cdot \frac{\sqrt{l^2 + D^2}}{D} \right) + 0,008 (\sqrt{2l^2 + D^2} - 2 \sqrt{l^2 + D^2} + D), \quad (20)$$

где l — длина стороны квадратов и D — расстояние между квадратами.

4. *Взаимоиндукция между двумя проводниками с большим поперечным сечением.*

Классический метод состоит в замене двух проводников двумя эквивалентными тонкими нитями, распо-



Фиг. 8.8. Коэффициент N для вычисления взаимной индукции между одновитковыми катушками.

женными на среднем геометрическом расстоянии. Если проводники расположены не очень близко, то для технических целей можно поместить эквивалентную нить

в центр каждого проводника, т. е. в центр круглого провода.

В том случае, где важна исключительная точность, следует обратиться к таблицам среднего геометрического расстояния для различных конфигураций, опубликованным Гровером [119].

5. Взаимоиндукция между многовитковыми катушками.

Во-первых, следует заменить эти катушки двумя нитевидными катушками, расположенными на среднегеометрическом расстоянии друг от друга. Обычно заменяют с некоторым приближением среднегеометрическое расстояние между катушками среднеарифметическим. Если взаимоиנדукция для двух нитевидных проводников M_0 , то общая индукция будет иметь вид

$$M = mnM_0, \quad (21)$$

где m и n — общее число витков в каждой катушке. (Предполагается, что витки соединены последовательно.)

2. ПЕЧАТНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ [4, 5, 22, 26, 110, 111]

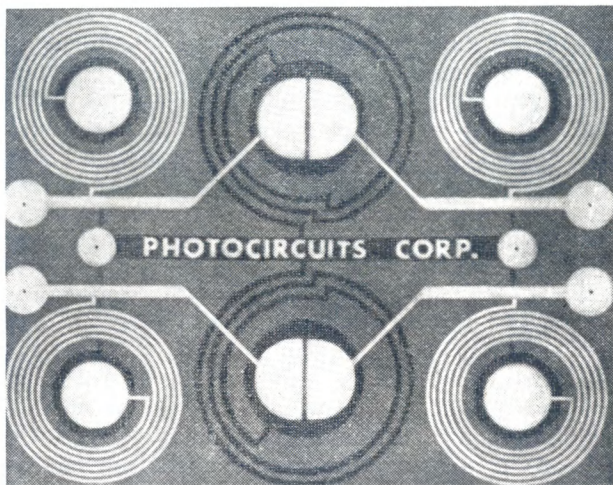
2.1. Методы изготовления

Идея изготовления печатных конденсаторов кажется заманчивой, однако по ряду технических проблем в промышленности предпочитают иметь дело либо с обычными деталями, либо с такими конденсаторами, конструкция которых несколько видоизменена, с тем чтобы облегчить прикрепление к изоляционному основанию. Тем не менее при некоторых определенных условиях печатный конденсатор может служить удовлетворительной и экономичной заменой обычной детали. Простейший печатный конденсатор состоит из двух металлических пластин, по одной на каждой стороне основания. Многие изготовители возражают против использования печатных конденсаторов, ссылаясь на дополнительные расходы при печати на обеих сторонах основания, а также на трудности, возникающие иногда при пайке по-

гружением. На самом деле существуют более серьезные проблемы. Например, если основание достаточно жесткое, то толщина его будет не меньше 1,6 мм. Если использовать для основания относительно дешевый материал, как, например, фенольный материал с бумажной основой (диэлектрическая постоянная $\epsilon \approx 5$), то емкость, которую можно получить от двух пластин площадью 6,5 см² каждая, составит 18 пф. Как правило, такие небольшие емкости используются не очень широко, за исключением случаев, когда частота достигает 50 Мгц или более. Однако при этих частотах наблюдаются довольно высокие потери, связанные с применением обычных фенольных слоистых материалов, что недопустимо. Следовательно, необходимо использовать сравнительно дорогой стеатит или один из лучших слоистых материалов из стекловолокна. Это вряд ли приемлемо, если, конечно, нет каких-либо дополнительных соображений, оправдывающих применение высокосортного материала, таких, например, как 1) необходимость печатать также катушки высокой частоты; 2) жаркий климат, требующий применения материалов с низким поглощением влаги и, возможно, высоких рабочих температур; 3) использование изготовителем метода вжигания серебра в керамику.

Для того чтобы увеличить емкость, можно уменьшить толщину основания, но за счет механической прочности и, стало быть, за счет возможности установки тяжелых деталей, например ламповых панелей, трансформаторов и т. д. Преимущество схем, полученных методом вжигания серебра в керамику, очень невелико, так как минимальная толщина из-за хрупкости материала ограничена до 1 мм. С другой стороны, при работе с тонкими листами стеклоткани, пропитанными смолой, и при использовании травленой фольги удалось добиться значительного успеха. Возможна даже толщина 0,13 мм, что дает ~ 30 пф на 1 см². Типичным примером использования этого метода является приведенный на фиг. 8.9 телевизионный фильтр против помех с 8 печатными конденсаторами и 6 печатными катушками.

При работе по методу вжигания серебра в керамику можно добиться относительно высокой емкости, если в качестве материала для основания применять титанат, диэлектрическая постоянная которого достигает 10 000. Однако эти материалы имеют следующие недостатки:



Ф и г. 8.9. Телевизионный интерференционный фильтр с 8 печатными конденсаторами и 6 печатными катушками.

Схема отпечатана методом травления фольги на одном слое стеклоткани, пропитанной фенольной смолой; толщина примерно 0,15 мм.

1) сравнительно дороги; 2) диэлектрические потери в них велики; 3) диэлектрическая постоянная может значительно изменяться в зависимости от температуры; 4) паразитная емкость для остальной части печатной схемы пропорционально возрастает.

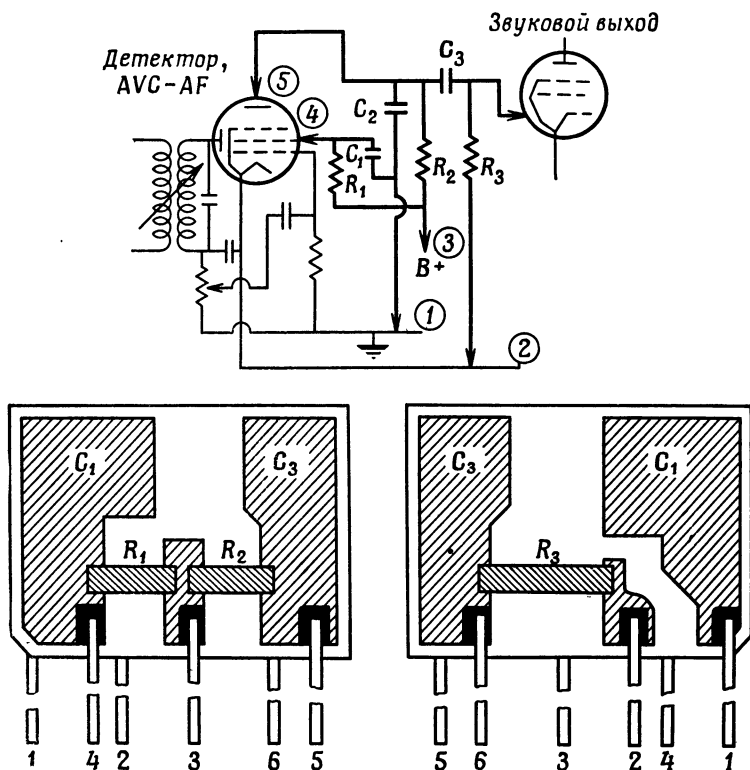
Последний фактор приводит к конструктивному ограничению, в частности, в том случае, когда в схеме имеются печатные катушки. Одной из фирм удалось преодолеть это затруднение путем использования составных керамических пластинок, прослойки в которых

состояли из материала с высокой и низкой диэлектрической постоянной [22]. Эту составную пластинку затем запечатывали способом вжигания серебра в керамику. Этот метод успешно применялся при изготовлении схем межкаскадной связи и других небольших пакетных схем, включающих от 2 до 15 деталей, в том числе и печатные сопротивления. Пример такого блока приведен на фиг. 8.10, причем весьма интересным здесь является продуманное использование паразитной емкости для получения C_3 . Эти небольшие керамические пластинки среднего формата $3,2 \times 1,9$ см снабжены соответствующими вводными проводниками; их погружают в фенольную смолу, обжигают и, наконец, пропитывают воском в вакууме. После этого подвергают обработке как обычную деталь, подлежащую включению в главную схему либо вручную, либо автоматически.

Другой метод получения большой емкости заключается в поочередном наложении слоев металла и изолирующего материала только на одну сторону картона. В одном примере, описанном в [5], говорится, что чередующиеся слои состояли из проводящей серебряной краски и стекловидной диэлектрической эмали. Методы, подобные этим, не нашли широкого промышленного применения.

Важным фактором, от которого зависит использование либо печатного, либо обычного конденсатора, является допуск на емкость. Этот допуск определяется характером печатного процесса, пределами толщины изоляционной панели и изменением диэлектрической постоянной в зависимости от изменения температуры, влажности и срока службы. Очевидно, учесть влияние этих факторов значительно легче, если конденсатор представляет собой самостоятельную деталь, изготовленную обычным способом; более того, при этом можно использовать метод отбора готовой продукции по номиналам. При определении допусков на детали точность печати имеет обычно наименьшее значение. Для небольших конденсаторов из слоистых материалов и стекловолкна возможен допуск $\pm 20\%$ и более точный, причем эта цифра определяется главным образом

изменением толщины. Для керамических материалов с большой диэлектрической постоянной фирма, изгото-



Фиг. 8.10. Телевизионная схема синхроблока с использованием составной керамической пластинки.

Участок с конденсатором C_2 имеет диэлектрическую постоянную, которая больше диэлектрической постоянной участка с конденсатором C_1 .

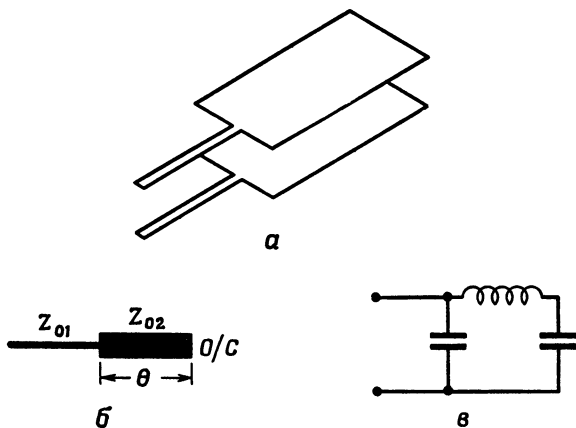
$$R_1 = 10 \text{ ком} \quad C_1 = 270 \text{ пф}$$

$$R_2 = 330 \text{ ком} \quad C_2 = 0,01 \text{ мкф}$$

$$R_3 = 2,2 \text{ Мом} \quad C_3 = 25 \text{ пф}$$

вляющая печатные блоки, изображенные на фиг. 8.10, приводит цифры $-20 + 80\%$.

В заключение важно подчеркнуть, что на электрические свойства конденсатора при высоких частотах в значительной мере влияет его форма. Так, конденсатор, изображенный на фиг. 8.11, *а*, имеет паразитную индуктивность и может быть представлен эквивалентной схемой (фиг. 8.11, *в*). Если говорить точнее, он играет роль

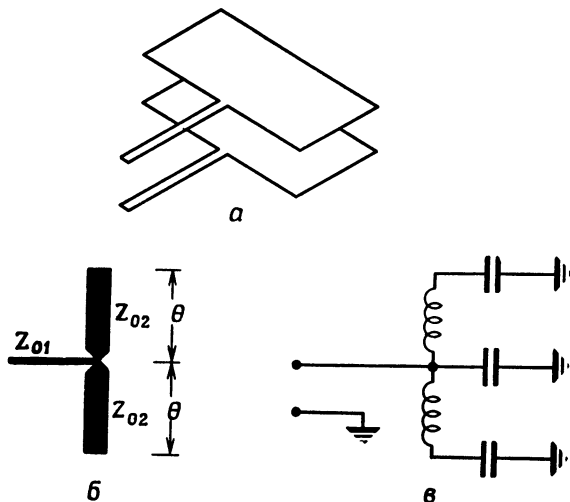


Фиг. 8.11. Свойства плоского пластинчатого конденсатора при высокой частоте.

Отводы на узкой стороне. *а* — конденсатор; *б* — эквивалентная линия передачи; *в* — эквивалентная схема.

короткого участка передающей линии (фиг. 8.11, *в*). Используя данные гл. IX (фиг. 9.9), можно рассчитать эквивалентную электрическую длину θ передающей линии и, следовательно, частоту четвертьволнового резонанса, выше которой он будет вести себя как шунтирующая индуктивность. Если же присоединение произведено к широким сторонам пластин конденсатора, то эквивалентная схема его будет подобна изображенной на фиг. 8.12. При частоте, для которой θ равна $1/4$ длины волны, схема будет находиться в резонансе и давать короткое замыкание в точке соединения с внешней цепью. Сравнение этих двух примеров показывает, что оптимальной формой для прямоугольного параллельно-

го пластинчатого конденсатора, т. е. формой, дающей возможность добиться наиболее высокой частоты резонанса, является прямоугольник с отношением сторон 2:1 и отводами на широкой стороне.



Фиг. 8.12. Свойства плоского пластинчатого конденсатора при высокой частоте.

Отводы на широкой стороне. *a* — конденсатор; *б* — эквивалентная линия передачи; *в* — эквивалентная схема.

2.2. Формулы для расчета емкости и комментарии к ним [116, 122, 124, 132, 151, 157]

Читателю рекомендуется ознакомиться с некоторыми положениями, прежде чем пользоваться формулами емкости, приведенными в разд. 2.3.

1. Приблизительная оценка емкости и диэлектрических потерь.

Емкость между параллельными пластинами может быть вычислена до первого порядка точности по следующей стандартной формуле:

$$C = 0,0884\epsilon_r A/h \text{ нф}, \quad (22)$$

где A — площадь меньшей пластины, см^2 ; h — расстояние между пластинами, см ; ϵ_r — диэлектрическая постоянная изолирующей среды относительно вакуума; она соответствует ϵ_d/ϵ_0 , используемой в гл. IX для более подробного рассмотрения этого вопроса. Значения ϵ_r для большей части материалов даны в таблицах гл. VII.

При условии, что размеры меньшей пластины больше расстояния между ними, эта формула может иметь точность до нескольких процентов. С другой стороны, в том случае, когда малый размер меньшей пластины можно сравнить с расстоянием или он меньше расстояния, неточность этой формулы может составлять 50% и более. На практике обычно оказывается, что нужная величина емкости может быть получена только при условии, что A/h значительно больше единицы, тогда формула позволяет получить достоверные результаты. Более того, несложно проконтролировать и подобрать величину емкости экспериментально в процессе проектирования. При этом условии применение более точной формулы редко оправдано.

В первом приближении диэлектрические потери конденсатора будут просто равны диэлектрическим потерям изоляционной среды, значения которых для разных материалов приведены в гл. VII. Соотношение между углом потерь δ , последовательным сопротивлением R , коэффициентами мощности $\cos \varphi$ и Q -фактором выражается формулой

$$\cos \varphi = 2\pi fRC, \quad (23)$$

где f — частота в гц ; R в Мом и C в мкф .

$$\delta + \varphi = 90^\circ, \quad (24)$$

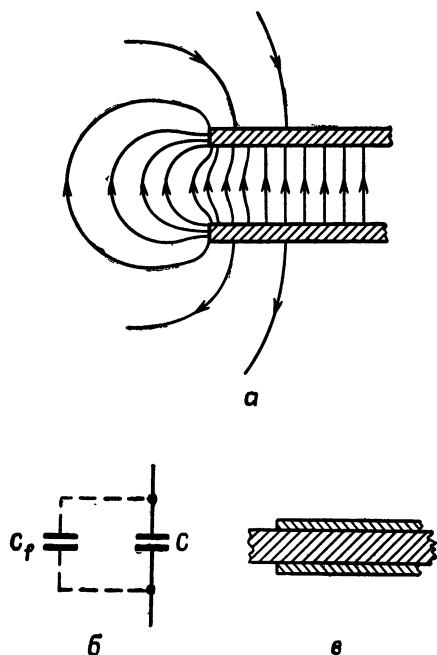
$$Q = (\cos \varphi)^{-1}. \quad (25)$$

Хорошие диэлектрики имеют низкие коэффициенты потерь; следовательно,

$$\delta \approx \text{tg } \delta \approx \sin \delta \approx \cos \varphi. \quad (26)$$

2. Точная оценка емкости с учетом краевого эффекта в однородной диэлектрической среде.

Простая формула неточна, так как в ней не учитывается краевой эффект по границам пластин (см. фиг. 8.13, *a*). Из фиг. 8.13, *б* следует, что действительная емкость всегда больше емкости C , как рассчитано выше,



Фиг. 8.13. Краевой эффект в параллельных пластинчатых конденсаторах.

a — форма поля на краях конденсатора; *б* — эквивалентная схема. Конденсатор C , емкость которого вычислена по простой формуле параллельного плоского конденсатора, шунтирован дополнительной емкостью C_f , связанной с краевым эффектом; *в* — на практике краевое поле создается в средах с различными диэлектрическими постоянными.

на величину \dot{C}_f . В качестве первого приближения C_f может быть учтено в виде поправки к фактическим размерам пластин прибавлением $0,44 h$ к прямолинейным сторонам и $0,11 h$ к радиусам круговых контуров. Фор-

мулы, приведенные ниже, дают четкое аналитическое решение для емкости с учетом краевого эффекта. Необходимо учитывать ограничения справедливости формулы.

С практической точки зрения краевой эффект вреден, так как может вызвать паразитную связь между соседними деталями.

3. Точная оценка емкости с учетом краевых эффектов и неоднородности диэлектрической среды.

Во всех формулах, приводимых ранее, принято, чтобы проводники были помещены в однородную диэлектрическую среду, простирающуюся до бесконечности. В практическом случае, показанном на фиг. 8.13, *в*, это не так. Здесь наблюдается отсутствие непрерывности в среде на границе между изоляционным основанием и окружающим свободным пространством. Это в значительной мере влияет на краевой эффект. В этом случае емкость, рассчитанная по формуле, будет точнее. Более точную оценку (в пределах 5% для широкого интервала) можно получить если:

1) вычислить приближенно емкость по любой формуле для параллельных пластин с допущением, что промежуток между ними заполнен воздухом, т. е. принимая $\epsilon_r = 1$;

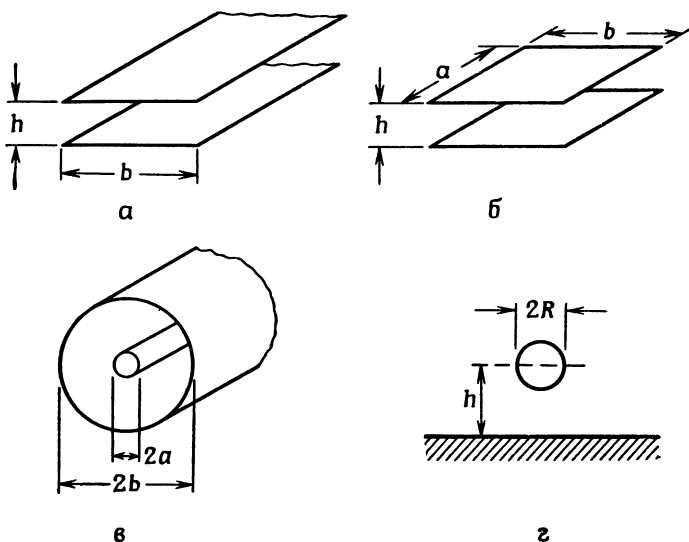
2) воспользоваться номограммой фиг. 9.9, гл. IX. Для заданных условий, т. е. для отношения b/h , и $\epsilon_r = \epsilon_d/\epsilon_0$, найти соответствующее значение λ_g/λ_0 ,

3) умножить емкость, рассчитанную выше, на коэффициент $(\lambda_0/\lambda_g)^2$. Получившаяся в результате емкость будет средней величиной между емкостью, рассчитанной для случая заполнения всего пространства воздухом, и емкостью, определенной при заполнении всего пространства диэлектриком с ϵ_r .

2.3. Формулы для расчета емкости

Все размеры даны в см, емкость в пикофарадах, все логарифмы при основании e . $\lg x = 2,303 \lg_{10} x$, ϵ_r — диэлектрическая постоянная среды. Принимается, что во всем поперечном сечении диэлектрическая среда однородна и толщина всех проводников очень мала.

1. Для двух длинных параллельных полосок одинаковой ширины (фиг. 8.14, а).



Фиг. 8.14. Различные конденсаторы.

a — длинные параллельные полоски; b — параллельные пластины; $в$ — коаксиальные; $г$ — круглый провод над металлической пластиной.

Ширина полосок b , расстояние между ними h .

Емкость на единицу длины =

$$= 0,08842 \epsilon_r \frac{b}{h} \left\{ 1 + \frac{h}{\pi b} \left[1 + \lg \frac{2\pi b}{h} \right] \right\} \text{ нф/см. } (27)$$

Это выражение точно для $h/b \ll 1$. При увеличении расстояния между проводниками точность падает до тех пор, пока при $h/b = 1$ емкость, подсчитанная по этой формуле, не станет примерно на 10% ниже. Для $h/b > 1$ нужно пользоваться следующей формулой:

$$\text{Емкость на единицу длины} = 0,278 \epsilon_r \left\{ \lg \frac{4h}{b} \right\}^{-1} \text{ нф/см. } (28)$$

2. Для системы, состоящей из длинной полоски, параллельной плоской пластине.

Ширина полоски b .

Ширина пластины $> 3b$.

Расстояние между полоской и пластиной h .

Емкость на единицу длины =

$$= 0,08842\epsilon_r \frac{b}{h} \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi b} \left[1 + \lg \frac{\pi b}{h} \right] \right\} \text{ нф/см.} \quad (29)$$

Это выражение точно при $h/b \ll 0,5$. При увеличении расстояния между проводниками точность падает до тех пор, пока емкость, рассчитанная по этой формуле, будет примерно на 10% ниже при $h/b = 0,5$. Для $h/b > 1$ нужно пользоваться формулой

$$\text{Емкость на единицу длины} = 0,556\epsilon_r \left\{ \lg \frac{8h}{b} \right\}^{-1} \text{ нф/см.} \quad (30)$$

3. Между двумя равными параллельными прямоугольными пластинами (фиг. 8.14, б).

Длина каждой пластины a .

Ширина каждой пластины b .

Расстояние между пластинами h .

Ограничение: $a \gg h$ и $b \gg h$.

Стандартное выражение для емкости без учета краевого эффекта имеет вид

$$\text{Емкость} = 0,08842\epsilon_r \frac{ab}{h} \text{ нф.} \quad (31)$$

Для достаточно длинных параллельных полос значительно лучшее приближение может быть получено из выражения

$$\begin{aligned} \text{Емкость} = 0,08842\epsilon_r \frac{ab}{h} \left\{ 1 + \frac{h}{\pi a} \left(1 + \lg \frac{2\pi a}{h} \right) \right\} \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{h}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{2\pi b}{h} \right) \right\} \text{ нф} \quad (32) \end{aligned}$$

при условии, что $a > 3h$ и $b > 3h$.

4. Между прямоугольной пластиной и металлической плоскостью. При тех же рассуждениях и тех же ограничениях

$$\begin{aligned} \text{Емкость} = 0,08842\epsilon_r \frac{ab}{h} \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a} \left(1 + \lg \frac{\pi a}{h} \right) \right\} \times \\ \times \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{\pi b}{h} \right) \right\} \text{ пф.} \quad (33) \end{aligned}$$

5. Изолированный диск в свободном пространстве.

Металлический диск диаметром d , помещенный в свободном пространстве (в отдалении от всех предметов), будет иметь собственную емкость, выражающуюся формулой

$$\text{Емкость} = 0,354d, \text{ пф.} \quad (34)$$

6. Между коаксиальными цилиндрами (фиг. 8.14, в).

Внутренний диаметр внешнего цилиндра $2b$.

Внешний диаметр внутреннего цилиндра $2a$.

$$\begin{aligned} \text{Емкость на единицу длины} = 0,105\epsilon_r (\lg b/a)^{-1} \text{ пф/см.} \\ (35) \end{aligned}$$

7. Между круглым проводом и металлической плоскостью (фиг. 8.14, г).

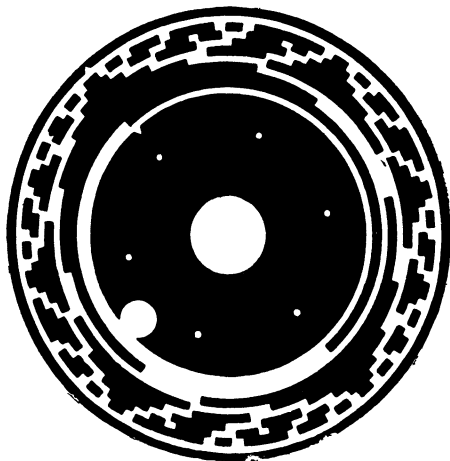
Диаметр провода = $2R$; высота над плоскостью h .

$$\begin{aligned} \text{Емкость на единицу длины} = \\ = 0,105\epsilon_r \left\{ \lg \frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a} \right\}^{-1} \text{ пф/см.} \quad (36) \end{aligned}$$

3. ПЕЧАТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ И КОММУТАТОРЫ

Техника изготовления печатных схем дает возможность получать некоторые сложные виды переключателей, создание которых любым другим способом связано со значительными трудностями технического и экономического характера. Интересным примером применения такого вида переключателя может служить кодовый диск, показанный на фиг. 8.15, который предназначен для преобразования угла поворота в кодирован-

ное двоичное число. Этот метод даже более предпочтителен и при изготовлении менее сложных переключателей, например используемых в обычных радиоприемниках, особенно в том случае, если речь идет о небольших партиях. Более того, срок службы печатного переключателя при некоторых условиях может быть более длительным, чем обычной детали.



Ф и г. 8.15. Цифровой кодовый диск.

Поверхность металлической схемы с родиевым покрытием находится в одной плоскости с поверхностью изоляционной основы.

В этой области применения наиболее предпочтительным является метод травления фольги.

Однако следует подчеркнуть, что большинство способов изготовления печатных схем сами по себе пригодны для изготовления контактов переключателя и имеют преимущества в этом случае. Основными требованиями при этом являются: хорошая сила сцепления, высокая геометрическая точность, достаточное сопротивление износу и высокая дугостойкость. Ниже описаны методы удовлетворяющие этим требованиям, которые могут быть в общем приняты и для других видов печатных схем.

Ввиду того что контакты должны иметь высокое сопротивление износу и коррозии, желательнее на медную фольгу наносить покрытие из соответствующего защитного металла. При работе по методу травления фольги это может быть достигнуто по меньшей мере тремя путями:

1) на слоистый материал с медным покрытием наращивают по всей поверхности защитный слой металла до нанесения копировального слоя, устойчивого по отношению к травящему раствору. Однако этот процесс нерационален, так как большинство рекомендуемых металлов также устойчивы к травящим растворам;

2) готовую печатную схему можно поместить в гальваническую ванну и соединить с катодом. Однако если в схеме имеется большое количество изолированных проводников, то электрическое подсоединение всех элементов схемы осуществить довольно трудно и утомительно;

3) ввиду того что нужные металлы имеют тенденцию сопротивляться действию травящего раствора, рекомендуется применять так называемый реверсивный метод печати. При этом методе само металлическое покрытие используется как защита. Некоторые изготовители применили этот метод с определенным успехом при изготовлении печатных переключателей.

Было испробовано большое количество металлов в качестве покрытий. Несомненные преимущества имеет серебро, так как оно обладает высокой устойчивостью к коррозии, а продукты коррозии, например сульфид серебра, имеют низкое сопротивление. Миграция серебра не вызывает затруднений, так как серебро не находится в непосредственном контакте с изоляционным основанием. Однако серебро относительно мягкий металл, и поэтому в тех случаях, где необходимо обеспечить длительный срок службы, т. е. для числа операций $> 10^6$, оно непригодно. Толщину слоя серебра можно регулировать в зависимости от требуемой степени износа, но толщина пленки должна быть меньше 0,025 мм, так как в противном случае качество покрытия ухудшается.

Можно, казалось бы, использовать для этой цели и другие металлы, но хром не подходит, так как образует

очень устойчивые окисные пленки; никель, будучи использован отдельно, имеет некоторые недостатки, присущие хрому; кроме того, у него наблюдается тенденция к отслаиванию при скольжении по нему контактов; родий обычно очень устойчив к коррозии, но относительно дорог; однако наносить его непосредственно на медь нельзя, так как он слабо сцепляется с медью и происходит электролитическая коррозия.

Были сделаны попытки нанести родий на серебро, но при износе контактов он сдирается. Тем не менее родий, нанесенный на никель, дает очень хорошие результаты. Поэтому на медь сначала наращивают слой никеля толщиной 0,0013—0,014 мм, а затем на никель наращивают слой родия до толщины пленки 0,25—1 мк. В этом случае схему можно еще использовать и после 10^8 операций.

Там, где допустимо короткое замыкание соседних контактов в процессе переключения, можно применять щетку, которая не затрагивает изолирующего основания. В этом случае очень хороши фенольные материалы на бумажной основе, если только при переключении не образуется электрическая дуга. В противном случае рекомендуется использовать материалы с высоким дуговым сопротивлением, например материалы из стекловолокна, пропитанного меламиновой, эпоксидной или ПТФЭ смолой. Во многих случаях необходимы такие системы переключателей, в которых контакты при переключении не замыкаются.

Такие системы переключателей можно осуществить одним из следующих способов:

1) при небольших скоростях и там, где не требуется очень длительный срок службы, можно получить удовлетворительные результаты с щеткой, движущейся по изолятору. При проектировании конструкции щетки нужно довести до минимума возможность повреждения краев контактов и перенос изолирующего материала к контакту;

2) между электрически активными контактами можно печатать пассивные металлические участки;

3) для переноса щетки с одного контакта на другой можно использовать приподнимающий механизм;

4) промежутки между контактами могут быть заполнены смолой (хотя это не рекомендуется);

5) может быть использован один из печатных процессов, описанных в гл. IV, который обычно дает гладкую поверхность;

6) в тех случаях, когда схемы напечатаны на основании из термопластичного материала, обычно после печати можно вводить проводники в основание методом горячего прессования. Однако если материал достаточно мягок для проведения такой операции, то он, как правило, не обладает нужной устойчивостью к износу. Об успешном использовании такого метода сообщалось в [108]. Применялось основание, состоящее в основном из стекловолокна, пропитанного меламиновой смолой, что обеспечивало требуемую размерную устойчивость, затем поверхность покрывалась бумагой, пропитанной меламиновой смолой, и, наконец, медной фольгой. Во время горячего прессования проводники входили в относительно мягкий слой бумаги. Переключатели, изготовленные таким способом, обладают, как сообщалось, отличной устойчивостью к износу, а именно выдерживают 10^8 млн. оборотов при скорости до 3600 об/мин.

Очень важное значение имеет отделка поверхности печатных контактов, так как они под действием щетки изнашиваются. При припрессовке медной фольги к поверхности слоистого материала фольга слегка сморщивается. Это особенно заметно при работе с некоторыми видами стекловолокна, где глубина вдавливания зависит от структуры ткани, содержания смолы в ткани и величины давления. Поэтому желательно до нанесения металла поверхность меди отполировать и отшлифовать, особенно в том случае, когда для покрытия используется твердый металл, например родий.

При работе с серебряными контактами материал щетки не имеет столь решающего значения. При нанесении никеля — родия возникают трудности, вызывае-

мые электролитическим взаимодействием между родием и обычно используемыми материалами, такими, как бериллиевая или фосфористая бронза. На эти металлы следует наносить никель и родий; в иных случаях приходится изготавливать щетки из дорогостоящих металлов.

4. ПЕЧАТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

В принципе сопротивления можно печатать теми же способами, что и металлические схемы высокой проводимости. Однако оказалось очень сложно получить достаточно воспроизводимые результаты. В основном возникают те же проблемы, что и при изготовлении обычных сопротивлений; отклонения значений от номинального могут доходить до 50% за счет неустойчивых параметров угля, смолы, цикла вулканизации и других процессов, с трудом поддающихся регулировке. Однако путем рационального отбора готовой продукции, который облегчается использованием установленного ряда номиналов, изготовитель может реализовать всю продукцию. К сожалению, в том случае, когда сопротивление печатается как часть схемы, отбор обычно не производится, так как это привело бы к высокой норме отбраковки схем в целом. Кроме того, чем больше число печатных сопротивлений на панели, тем больше будет эта норма отбраковки. Интересно отметить, что фирмы, изготавливающие схемы с печатными сопротивлениями, не печатают больше двенадцати компонентов. Ввиду ограниченного распространения этих методов здесь приведены лишь основные сведения; более детально это изложено в работах [1, 4, 5, 9, 22, 37. 105—107, 109].

4.1. Нанесение резистивной краски [1, 4, 5]

О некоторых таких красках уже говорилось выше. Они подобны металлическим краскам, но в них в качестве проводящего агента используется уголь или графит и их нанесение осуществляется при помощи трафаретной печати. В принципе все сопротивления в схеме

могут быть отпечатаны одной краской. Однако это приведет к нежелательному значительному отклонению формы, размеров и допускаемых утечек.

Поэтому чаще всего для обычного интервала сопротивлений (т. е. от нескольких *омов* до нескольких *Момов*) используют три (или более) смеси. Однако при этом увеличивается общее число печатных операций. Чтобы обеспечить постоянные свойства выпускаемой продукции, можно использовать один из следующих методов. При изготовлении по первому методу первоначальную величину всех сопротивлений делают малой, а затем ее последовательно повышают при помощи шлифовки, в процессе которой удаляется часть угольного слоя. Другой метод состоит в последовательном получении заданной величины сопротивления за несколько циклов печати. В том и другом случаях процесс может быть автоматизирован путем контроля величин омических сопротивлений. Схемы, полученные методом вжигания серебра в керамику и включающие в себя подобные сопротивления, изготавливаются серийно и имеют допуск на сопротивления $\pm 20\%$.

4.2. «Клейкие» ленты для изготовления сопротивлений [4, 5, 105]

Гибкая резистивная лента изготавливается следующим образом: на асбестовую бумагу, стеклянное волокно или подобные им материалы наносят слой соответствующей резистивной краски. Затем на ленту наносят тонкое защитное покрытие из полиэтилена, с тем чтобы ее можно было обрабатывать и хранить в виде полуфабриката. Из этой ленты вырезают отдельные сопротивления, удаляют защитный пластмассовый слой и припрессовывают к металлическим проводникам печатной схемы. Так как вырезанные из ленты сопротивления обладают высокой адгезией, они в процессе прессования прочно приклеиваются к рабочим участкам. Затем панель с сопротивлениями вулканизируют при повышенной температуре. Однако этот способ вытесняется описанным ниже «сухим».

4.3. «Сухие» ленты для изготовления сопротивлений [105]

При этом методе лента вулканизируется до ее припрессовки к панели. Затем на вулканизованную ленту шириной 31,8 мм и толщиной 0,15 мм наносят электроды. Последние обжигают и наносят на слой проводящего клеящего вещества, которое вулканизируется в две стадии. После этого ленту разрезают на отдельные полоски, которые помещают в калибрующее устройство; в этом устройстве полоски автоматически разрезаются в соответствии с требуемым номиналом сопротивления. Обычные размеры готового сопротивления: длина 11,9 мм, ширина 2,8—3,8 мм и толщина 0,23 мм. Эти сопротивления монтируют в схему при помощи специального нагретого прижимного инструмента. Затем их покрывают защитной пленкой. Известно, что разработана такая резистивная лента, которая не разрушается при полном погружении в расплавленный припой. Такие сопротивления рассчитаны на $\frac{1}{4}$ Вт и диапазон от 100 Ом до 2 Мом. При длительном сроке службы сопротивление изменяется менее чем на $\pm 4\%$.

4.4. Металлические резистивные пленки [4, 5, 22, 37, 39—41]

Некоторые методы, описанные в гл. II (разбрызгивание и напыление в вакууме), можно использовать и для получения тонких металлических пленок. Этим способом пользовались уже в течение многих лет при изготовлении сопротивлений для волноводных аттенуаторов, но он не получил широкого распространения для изготовления обычных печатных схем. Помимо трудностей общего характера, упомянутых в начале этого раздела, неудобство состоит в том, что этот процесс должен протекать в вакууме. Тем не менее сопротивления, полученные методом напыления, широко используются как элементы микроминиатюрной техники.

5. НИЗКООМНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ [22, 37]

Сопротивления, рассматриваемые в этом разделе, представляют собой печатную схему, эквивалентную проволочному сопротивлению, широко используемому в электротехнике для многих целей, в том числе для электрообогрева. В области дальней связи применение этого элемента ограничено частотой в несколько килогерц из-за относительно высокой самоиндукции; тем не



Фиг. 8.16. Низкоомное сопротивление зигзагообразной формы.

менее проволочные остеклованные сопротивления используются там, где это возможно, ввиду их высокой стабильности и относительно небольшого размера для данной номинальной мощности по сравнению хотя бы с объемными сопротивлениями. В эквивалентном элементе печатной схемы используется проводник зигзагообразной формы, подобный показанному на фиг. 8.16.

Важным фактором является характеристика рассеяния тепла печатного элемента. Омические потери в проводнике обратно пропорциональны площади поперечного сечения проводника, тогда как рассеяние тепла в сравнимых условиях пропорционально поверхности проводника. Повышение температуры ΔT проводника, расположенного в свободном пространстве, может быть выражено математически таким образом:

$$\Delta T = \frac{4\rho I^2}{\pi^2 d^3 K} \text{ для круглого провода,}$$

$$\Delta T = \frac{\rho I^2}{2ab(a+b)K} \approx \frac{\rho I^2}{2ab^2 K} \text{ для тонких полосок,}$$

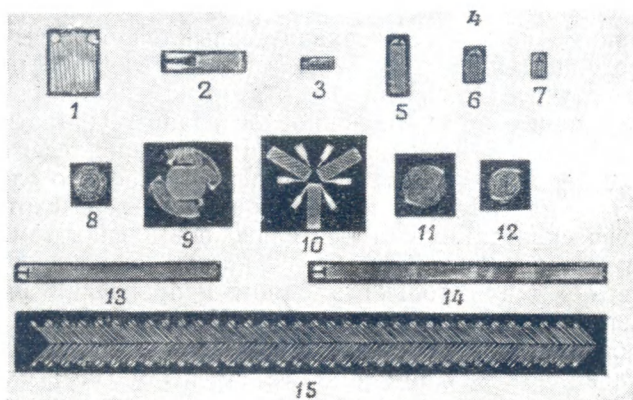
где I — ток, ρ — удельное сопротивление; d — диаметр провода; a — толщина фольги; b — ширина фоль-

ги и K — коэффициент рассеяния тепла. Из этих уравнений непосредственно следует, что сопротивление из фольги имеет тенденцию нагреваться меньше, чем сопротивление с проволочной намоткой, так как проводник из фольги обладает гораздо большей поверхностью для данного объема металла.

На практике расстояния между проводниками относительно небольшие, так что между соседними проводниками наблюдается значительный теплообмен. Кроме того, проводники должны иметь какую-либо опору; в том случае, если речь идет о печатном элементе, этой опорой является изоляционное основание. При этих условиях участок поверхности, с которого происходит рассеяние тепла, сокращается примерно вдвое, что следует учесть в приведенных выше уравнениях. (Некоторые практические данные относительно повышения температуры см. на фиг. 7.5.) Способность концентрировать рассеяние тепла только в одном направлении иногда может оказаться очень полезной. Цилиндрическая форма обычного сопротивления с намоткой из проволоки не идеальна, так как при монтаже проводник со всех сторон должен быть окружен воздушным пространством. Наоборот, печатный проводник может быть смонтирован на любой пригодной поверхности, например на стенке шасси. Изоляционный материал, на котором отпечатан элемент, играет роль эффективной преграды теплу.

Эти методы нашли практическое применение в английской авиационной промышленности для производства антиобледенителей. Один из процессов предусматривает наложение на защищаемую поверхность изолирующего покрытия из эпоксидной смолы. Затем наносится печатная металлическая сетка, которая покрывается вторым слоем смолы. Другой метод позволяет использовать заранее изготовленные гибкие прокладки, полученные способом травления фольги, и последовательно укреплять их на защищаемых поверхностях. Прокладки изготавливаются из никелевой или медно-никелевой фольги (55/45), закрепленной на гибком листе пропитанной бумаги или на листе неопренового каучука. Затем прокладку запечатывают, травят и, наконец,

наносят покрытие из смолы или синтетического каучука. Прокладка с дополнительным покрытием или без него поступает к сборщику, который прикрепляет ее к защищаемым поверхностям. В этой области применения печатных схем получены хорошие результаты, несмотря на крайне жесткие требования в отношении



Фиг. 8.17. Некоторые виды тензодатчиков.

1 — специальный датчик; 2 — стандартный датчик; 3 — 12-миллиметровый датчик; 4 — новые конструкции. Датчики изготовлены из тонкой высокоомной фольги; 5 — 25-миллиметровый датчик; 6 — 12-миллиметровый датчик; 7 — 6-миллиметровый датчик; 8 — маленький кольцеобразный датчик; 9 — большой кольцеобразный датчик; 10 — веерообразный датчик; 11 — стандартный спиральный датчик (25 мм); 12 — малый спиральный датчик (18 мм); 13 — 100-миллиметровый датчик; 14 — 150-миллиметровый датчик; 15 — кольцевой датчик.

устойчивости к коррозии, вибрациям, различным механическим воздействиям, перегреву, прочности скрепления и т. д.

Значительный интерес представляет использование этого метода в производстве тензодатчиков — устройств, преобразующих механическое напряжение в эквивалентное изменение электрического сопротивления. Обычно их изготавливают из листовой медно-никелевой фольги с температурным коэффициентом сопротивления, близ-

ким к нулю, и эпоксидной смолы. Для измерения самых разнообразных механических напряжений можно использовать разные схемы, часть из которых изображена на фиг. 8.17. Как сообщают, коэффициент преобразования датчика выше двух, а при сравнительно слабой температурной зависимости сопротивлений возможно использование большой силы тока. Так, датчик обычной конструкции размером $25,4 \times 6,4$ мм работал при мощности 104 вт в течение более 30 мин, прежде чем наступало разрушение датчика в результате ослабления сцепления. Такого типа резистивные элементы были разработаны для ряда других областей применения: для использования в быту, нагрева воды, а также для температурных датчиков и плавких предохранителей. Основная трудность во всех случаях использования, рассмотренных выше, — получение достаточно тонких пленок с высокой степенью равномерности по толщине и без механических дефектов. В связи с этим значительный интерес представляет метод химического утоньшения фольги, после того как схема отпечатана.

Глава IX

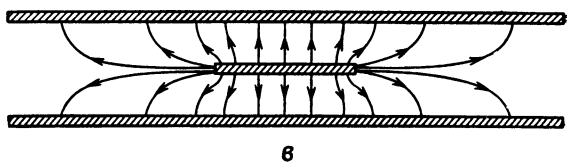
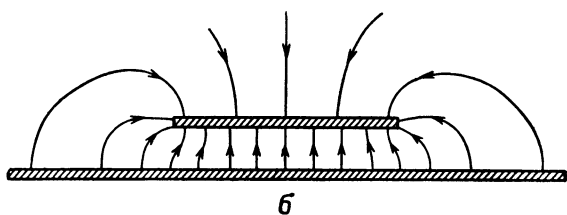
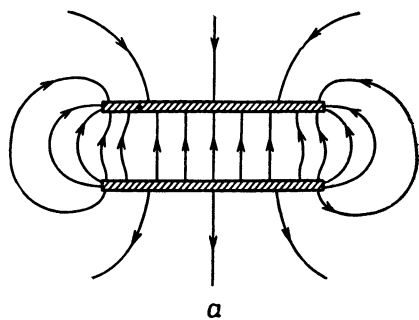
ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая стоимость, большие размеры и все возрастающая сложность конструкции обычных волноводов привели к необходимости разработки ряда других видов линий передачи. Одной из таких линий является так называемая плоскостная, или полосковая линия передачи, несколько разновидностей которой показаны на фиг. 9.1 и 9.2.

В плоскостной форме могут быть выполнены эквиваленты большинства составных частей коаксиальных волноводов, таких, как гибридные узлы, направленные ответвители и т. д. Это позволяет изготавливать весьма сложные, состоящие из многих деталей сравнительно недорогие устройства, так как в этом случае можно использовать технику печатных схем. Еще одним преимуществом сложных устройств, изготовленных таким способом, являются их сравнительно небольшие размеры и вес.

Несмотря на физическую простоту этих линий передачи, строгий математический анализ их свойств представляет значительные затруднения. Когда полосковые проводники устанавливаются в однородную диэлектрическую среду бесконечных размеров, можно допустить, что возникает равномерное распространение поперечных электромагнитных волн (ТЕМ) при условии, однако, что определенные критические размеры проводников не превышают поддающейся измерению доли дли-



Ф и г. 9.1. Три основных типа полосковых линий передачи.

a — симметричная линия; *б* — полоса над заземленной пластиной;
в — трехпластинчатая линия.

ны волны¹⁾. В этом случае задача упрощается и сводится к двумерному анализу статического поля между параллельными пластинами. Но даже в этом случае вследствие прерывистого характера металлических границ было весьма сложно найти универсальные решения. Для некоторых случаев, представляющих весьма ограниченный интерес, были найдены различные по своей строгости решения. Однако во многих практических случаях точность этих решений сомнительна. Так, например, диапазон импедансов $50 \div 150 \text{ ом}$ лежит обычно вне пределов решений с достаточной степенью точности. Кроме того, для линий, показанных на фиг. 9.1, *a*, *b* и 9.2, *b* — *г*, формулы обычно исключают все значения *a*, кроме $a = \infty$.

К сожалению, практическая применимость всех решений, основанных на допущении о существовании волн типа ТЕМ, несколько сомнительна. Это объясняется тем, что в состав реальных полосковых линий передачи, таких, как показано на фиг. 9.2, входят (в различной степени) изоляционные крепящие детали, диэлектрические постоянные которых отличаются от диэлектрической постоянной окружающего пространства. В связи с присутствием продольной диэлектрической прослойки должна существовать, как минимум, продольная составляющая электрического вектора [127, 138]. В этом случае решение в предположении волн типа ТЕМ теоретически недопустимо, и для определения природы преобладающего типа волн необходимо непосредственное применение уравнений Максвелла для данных граничных условий. Это было достигнуто лишь в одном специальном слу-

¹⁾ Волны делятся на следующие виды:

волны ТЕМ (поперечная электромагнитная волна); электрический и магнитный векторы лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны;

волны E; в этом случае имеется также и реактивная составляющая электрического поля, направление которой совпадает с направлением распространения;

волны H; имеется реактивная составляющая магнитного поля, направленная по ходу распространения;

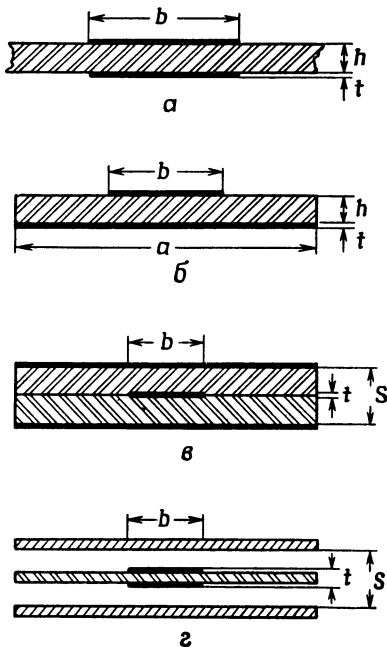
волны EH; имеются реактивные составляющие и электрического и магнитного полей, направленные по ходу распространения.

чае [129], и так как здесь было сделано много упрощающих допущений, то применимость этого решения сомнительна. Однако эксперименты показали, что различные решения для волн типа ТЕМ, упомянутые в этой главе, можно с уверенностью использовать в пределах от постоянного тока до частот, при которых расстояние между полосами становится сравнимым с длиной волны (например, $1/8 \lambda$). В этом интервале режим работы полосковых линий передачи аналогичен коаксиальному кабелю. Допуская, что электрические потери малы, мы можем определять свойства полосковой линии следующим образом.

1. Волновое сопротивление линии можно определить с помощью хорошо известных величин¹⁾:

$$Z_0 = (L/C)^{1/2} = V/I, \quad (1)$$

где L и C — соответственно индуктивность и емкость на единицу длины; V — переменный потенциал



Ф и г. 9.2. Четыре вида практически применяемых полосковых линий передачи.

a — симметричная линия; b — несимметричная полосковая линия; g — трехпластинчатая линия; z — высокодобротная трехпластинчатая линия.

¹⁾ Для типов волн, отличных от волн типа ТЕМ, существует несколько других определений, и выбор их довольно произволен. Подробное освещение этого вопроса см. Ragan G. L., *Microwave Transmission Circuits*, MIT, ser № 9, p. 51, N. Y., 1948. Есть русский перевод: «Линии передачи сантиметровых волн» под ред. Г. А. Ремеза, т. I, II, изд-во «Советское радио», 1951.

между двумя проводниками и I — общий переменный ток в каждом проводнике (при передаче без отражений).

2. Фазовая скорость равна групповой скорости и не зависит от частоты:

$$v = (\mu\epsilon)^{-1} = (LC)^{-1}, \quad (2)$$

где μ и ϵ соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемость среды. Если эта среда неоднородна, то приведенная выше формула будет верна лишь при условии, когда известны эквивалентные действующие значения μ и ϵ . Практически скорость v обычно легче определить путем вычисления или измерения L и C .

3. Длина волны λ_g в линии определяется простым уравнением

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0 v}{c}, \quad (3)$$

где λ_0 — длина волны в вакууме, равная

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}, \quad (4)$$

c — скорость света в вакууме и f — частота.

2. ТИПЫ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

На фиг. 9.1 показаны три разновидности проводников, применяющихся в настоящее время. Они эквивалентны соответственно воздушной симметричной двухпроводной линии, однопроводной линии и коаксиальному кабелю. Практические разновидности этих трех систем показаны на фиг. 9.2. Первый тип мы будем называть «симметричной полосковой линией», второй известен теперь повсюду под названием «несимметричная полосковая линия» («микрострин») [124]. В названиях линий фиг. 9.2, *в* и *г* существует некоторая путаница. Вариант, показанный на фиг. 9.2, *в*, называют и «плоской полосой» [151], и «сэндвичем», и «трехпластинчатой линией» [153], и «экранированной параллельнопла-

Таблица 9.1

Сравнительные характеристики различных полосковых линий

	Симметричная полосковая линия	Несимметрич- ная полосковая линия	Трехпластин- чатая линия	Высокодоброт- ная трехпла- стинчатая линия
Легкость изготовле- ния	2 ¹⁾	1	3	4
Размеры и вес	1	1	2	3
Легкость испытания	2	1	4	3
Легкость анализа	3	3	1	2
Потери от рассеяния	2	2	3	1
Потери от излучения	2	2	1	1
Ограниче- ния, вызы- ваемые кон- фигурацией	Затруднено питание от несиммет- ричной ли- нии пере- дачи	Опрокиды- вание фазы невозможно, но легко су- живаю- щаяся за- земленная пластина дает пере- ход в сим- метричную линию пере- дачи	Затруднены последова- тельные соединения в плоскости <i>E</i> . Опроки- дывание фазы невоз- можно. Неоднород- ности должны быть в принципе симмет- ричными	

Продолжение табл. 9.1

	Симметричная полосковая линия	Несимметрич- ная полосковая линия	Трехпластин- чатая линия	Высокодоброт- ная трехпла- стинчатая линия
Области применения	Широкопо- лосные гиб- ридные узлы, вклю- чая устрой- ства для оп- рокидыва- ния фазы	Широкопо- лосные узлы с низким Q -фактором	Широкопо- лосные узлы и фильтры со средней доброт- ностью (на- пример, фильтры верхних и нижних частот)	Широкопо- лосные и уз- кополосные узлы, филь- тры, обычно включаю- щие высоко- добротные резонаторы
Используй- ются в на- стоящее время ²⁾	Незначи- тельно	Широко	Значительно	Широко

¹⁾ Цифры обозначают порядковое место по качеству.

²⁾ Этот пункт определяет лишь положение в области полосковых линий. По ряду причин пока еще нельзя сказать, в какой степени полосковые линии будут вытеснять существующие коаксиальные линии и волноводы.

стинчатой линией» [157]. Термин «трехпластинчатая линия» представляется нам наиболее удачным, этим термином мы и будем пользоваться в нашей книге. На фиг. 9.2, г показан случай, когда диэлектрик находится в области слабого поля; таким образом, эта форма позволяет получить более высокие значения Q -фактора, чем три других типа линий. Одна из полос может быть опущена, но это нарушает симметрию поперечного сечения и, в результате несколько увеличиваются диэлектрические потери [131]. В этой книге линию, показанную на фиг. 9.2, г, мы будем называть «высокодобротной трехпластинчатой линией», хотя некоторые авторы

называют ее «высокодобротной полосковой линией» [152]. Последнее определение не совсем удачно, так как термин «полосковая линия» имеет более общее значение и охватывает целый ряд полосковых линий передачи.

Достоинства этих принципиальных форм кратко описаны в табл. 9.1; некоторые из пунктов таблицы рассматриваются ниже более подробно. Следует отметить, что фиг. 9.1 и 9.2 не охватывают всех возможных вариантов линий, однако предполагается, что именно эти формы найдут самое широкое применение.

3. ЕДИНИЦЫ И РАЗМЕРНОСТИ

Мы исходим из того, что читатель достаточно хорошо знаком с элементарной теорией линий передачи. Однако, чтобы помочь ему практически использовать сведения, содержащиеся в данной главе, мы приводим табл. 9.2 и 9.3, где даны единицы, размерности и символы. Повсюду используется система МКС.

В табл. 9.2 приведены основные величины и единицы. К символам добавляются индексы со следующими значениями:

0 — принадлежащий свободному пространству (за исключением Z_0);

d — принадлежащий диэлектрической среде;

m — принадлежащий металлическому проводнику;

n — по нормали к поверхности;

t — по касательной к поверхности.

В табл. 9.3 приведены некоторые важные числовые постоянные. Следует заметить, что здесь использовано абсолютное значение диэлектрической проницаемости или диэлектрической постоянной, тогда как в других разделах этой книги (например, в гл. VII) подразумевается величина, относящаяся к вакууму. Таким образом, для полистирола, относительная диэлектрическая проницаемость которого равна 2,54, абсолютная диэлектрическая проницаемость будет равна

$$\epsilon_d = 2,54\epsilon_0 = 2,54 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ ф/м.}$$

Таблица 9.2

Единицы и размерности (в системе МКС)

	Величина	Символ	Единицы измерения	Эквивалент
Основные единицы	Длина волны	λ	<i>м</i>	v/f
	Масса	—	<i>кг</i>	
	Время	<i>t</i>	<i>сек</i>	
	Электрический заряд	—	<i>к</i>	
Действующие силы и электрические явления	Частота	<i>f</i>	<i>гц</i>	v/λ
	Мощность	—	<i>вт</i>	VI , активные
	Электродвижущая сила (или потенциал)	<i>V</i>	<i>в</i>	ZI
	Напряженность электрического поля (или градиент)	<i>E</i>	<i>в/м</i>	dV/dx
	Электрический ток	<i>I</i>	<i>а</i>	
	Напряженность магнитного поля Магнитная индукция	<i>H</i> <i>B</i>	<i>а/м</i> <i>вб/м</i>	μH
Постоянные среды	Диэлектрическая проницаемость (или диэлектрическая постоянная)	ϵ	<i>ф/м</i>	
	Магнитная проницаемость	μ	<i>гн/м</i>	
	Электропроводность	σ	$1/ом \cdot м$	
	Волновое сопротивление	η	<i>ом</i>	$(\mu/\epsilon)^{1/2}$
	Скорость распространения	<i>v</i>	<i>м/сек</i>	$(\mu\epsilon)^{-1/2}$ или $(LC)^{-1/2}$
	Высокочастотное удельное поверхностное сопротивление	R_s	<i>ом/единица площади</i>	$(\pi f \mu_m / \sigma_m)^{1/2}$

	Величина	Символ	Единицы измерения	Эквивалент
Константы, определяемые геометрией среды и проводника	Емкость	C	ϕ (или $\phi/м$)	
	Индуктивность	L	$гн$ (или $гн/м$)	
	Импеданс входной	Z	$ом$	V/I
	Волновое сопротивление линии ¹⁾	Z_0	$ом$	$(L/C)^{1/2}$
	Затухание	α	$непер/метр$	$\alpha_m + \alpha_d$

¹⁾ Допускаем распространение волн типа ТЕМ

Таблица 9.3

**Некоторые существенные числовые константы
(в системе единиц МКС)**

Величина	Символ	Числовое значение
Диэлектрическая проницаемость (или диэлектрическая постоянная) вакуума	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \phi/м$
Магнитная проницаемость вакуума	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6} гн/м$
Волновое сопротивление вакуума	$\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$	377 ом
Скорость распространения в вакууме	$c = (\mu_0/\epsilon_0)^{-1/2}$	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$
Электропроводность меди	σ_m	$5,8005 \cdot 10^7 \text{ см}^3/ом$
Высокочастотное поверхностное удельное сопротивление меди	R_s	$8,24 \cdot 10^{-3} \text{ ом/единица площади поверхности проводника при } 10^3 \text{ Мгц}$
Магнитная проницаемость меди	μ_m	$= \mu_0 \text{ гн/м}$

4. УПРОЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Удобнее всего начинать рассматривать полосковые линии передачи с бесконечной параллельнопластинчатой линии. Обе пластины этой линии имеют бесконечную протяженность в положительном и отрицательном направлениях оси x , и предполагается, что волна распространяется равномерно в направлении z . Кроме того, допустим, что расстояние между пластинами мало по сравнению с длиной волны. Линия передачи имеет, разумеется, нулевое волновое сопротивление, и при конечных значениях E и H передаваемая мощность бесконечна.

Первое приближение к параллельнопластинчатой линии передачи, показанной на фиг. 9.1, a , можно получить, если взять отрезок бесконечной параллельнопластинчатой линии и обвести обнажившиеся концы этого отрезка воображаемыми магнитными границами, как показано на фиг. 9.3. Благодаря такому искусственному приему величина и ориентация электрического и магнитного векторов остаются неизменными. Решение для предполагаемой линии будет следующим:

$$E = \eta H \text{ в/м}, \quad (5)$$

$$Z_0 = \frac{\eta h}{b} \text{ ом}, \quad (6)$$

$$\alpha_m = R_s (\eta h)^{-1} \text{ непер/м}, \quad (7)$$

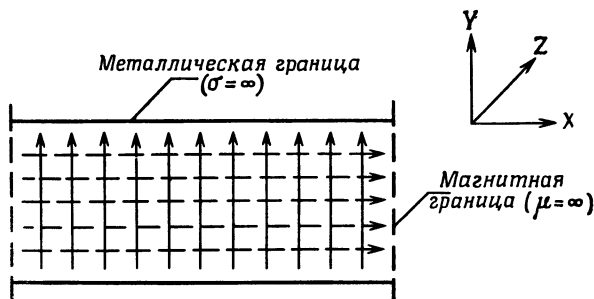
$$\alpha_d = \pi \lambda_g^{-1} \text{ tg } \delta \text{ непер/м}, \quad (8)$$

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_g \text{ непер/м}, \quad (9)$$

$$\lambda_g = \lambda_0 \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_d} \right)^{1/2} \text{ м}, \quad (10)$$

где символы имеют те же значения, что и в табл. 9.2. Члены, переменные по времени, типа $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ опущены в целях упрощения, а под символами E_n , H_t , V и I повсюду будут подразумеваться эффективные значения соответствующих величин.

Эта воображаемая линия представляет собой удобный объект сравнения, параметры которого легко вычисляются. В качестве примера рассмотрим линию, состоящую из двух тонких медных проводников шириной 1 см каждый, разделенных листом полистирола толщиной 0,5 см, и работающую с частотой 1000 МГц. В табл. 9.3 приведены все необходимые числовые константы,



Фиг. 9.3. Воображаемая параллельнопластинчатая линия передачи, используемая в качестве линии сравнения.

↑ силовые линии напряженности электрического поля E ;
 — → силовые линии напряженности магнитного поля H .
 Волна распространяется в направлении Z .

кроме диэлектрической постоянной и угла потерь полистирола, которые следует взять из табл. 9.5. Читатель может проверить получающиеся результаты:

$$Z_0 = 118 \text{ ом},$$

$$\alpha_m = 6,02 \cdot 10^{-2} \text{ дб/м},$$

$$\alpha_d = 2,90 \cdot 10^{-2} \text{ дб/м},$$

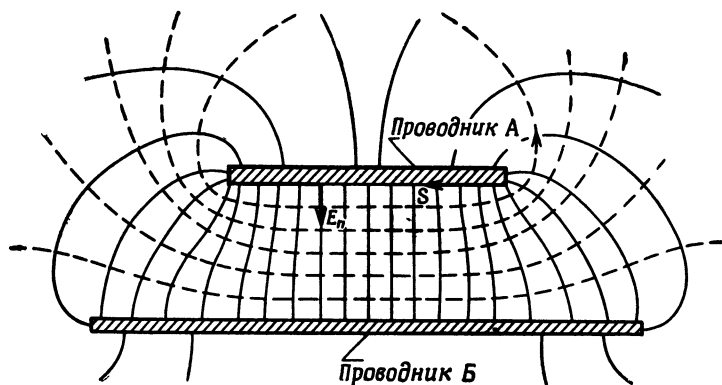
$$\alpha_m + \alpha_d = 8,92 \cdot 10^{-2} \text{ дб/м},$$

$$\lambda_g = 18,8 \text{ см}.$$

В дальнейшем затухание линии любой данной конфигурации мы будем относить к затуханию воображаемой линии, имеющей те же значения h и b и сделанной из таких же материалов. Волновое сопротивление и

затухание этой линии сравнения обозначаются соответственно символами Z'_0 и α'_m .

Если мы теперь удалим боковые стенки такой воображаемой линии и, чтобы сделать картину более общей, изменим размер одного проводника, то поле примет приблизительно такую форму, как показано на



Фиг. 9.4. Схематическое изображение поля типичной плосковой линии.

E_n — градиент потенциала на поверхности проводника (допускаем, что он направлен по нормали к проводнику). Жирной линией показаны замкнутые контуры интегрирования вокруг поверхности проводника.

фиг. 9.4. Очевидно, что по внешним поверхностям плосковых проводников будет протекать часть тока высокой частоты.

Чтобы вычислить волновое сопротивление и затухание такой линии, воспользуемся следующими зависимостями:

$$Z_0 = \eta M, \quad (11)$$

$$\alpha_m = \frac{R_s N}{\eta} \text{ непер/м}, \quad (12)$$

где M — безразмерная константа, зависящая только от геометрии системы и определяемая выражением

$$M = \frac{V}{\oint_A E_n ds} = \frac{V}{\oint_B E_n ds}, \quad (13)$$

а N — величина, по размерности обратная расстоянию и зависящая частично от геометрии и частично от размеров системы:

$$N = \frac{1}{2} \frac{\left(\oint_A E_n^2 ds + \oint_B E_n^2 ds \right)}{\left(V \oint_A E_n ds \right)}. \quad (14)$$

В приведенных выше уравнениях E_n — градиент электрического поля на поверхности проводника (предполагается перпендикулярным поверхности), а индексы A и B обозначают соответствующие проводники (фиг. 9.4). Интегралы берутся по замкнутому контуру, показанному жирной линией у проводника A . Для уединенных проводников

$$\oint_A E_n ds = \oint_B E_n ds.$$

Для линии, показанной на фиг. 9.1, *в*, уравнения (13) и (14) должны быть изменены с учетом дополнительного проводника. Характер этого изменения будет ясен, если рассмотреть влияние произвольного разделения одного из проводников (например, проводника A на фиг. 9.4) на два.

Уравнения (13) и (14), определяющие M и N , выглядят обманчиво просто, и поэтому следует дать некоторые разъяснения. Практически изменение E_n вокруг поверхности проводника неизвестно заранее. Вывести его аналитически довольно сложно; для этого требуется математический аппарат, рассмотрение которого выходит за рамки нашей книги. Однако, возможно, стоит отметить, что числовое значение E_n для данной частной конфигурации можно получить весьма просто с помощью аналога потенциала. Подробнее этот метод, в котором используется электролитическая ванна, описан автором в работе [138].

5. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Для ряда полосковых линий передачи с воздушным диэлектриком были выведены аналитические выражения (ниже мы приводим некоторые из них). Однако в

большинстве случаев результаты представляются графически. Их можно применить к любой из линий, показанных на фиг. 9.1, а также к высокодобротной трехпластинчатой линии (фиг. 9.2, *з*) при условии, что $t \ll s$ и что диэлектрическая постоянная изоляционной прокладки ненамного отличается от диэлектрической постоянной свободного пространства. Графики для трехпластинчатой линии применимы к линии, заполненной диэлектриком, (фиг. 9.2, *в*) при условии, что $a \gg b$; в этом случае значение волнового сопротивления, найденное по кривым, должно быть умножено на $(\epsilon_0/\epsilon_d)^{1/2}$.

5.1. Симметричная линия

Две верхние кривые фиг. 9.5 вычерчены с помощью соотношений, приведенных Ассадурианом и Римэ [124] для параллельных пластин с нулевой толщиной. Первое соотношение получено из уравнений Максвелла и формул (5)–(10):

$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{2}{\{1 + h/(\pi b) [1 + \lg(1 + \pi b/h)]\}}, \quad (15)$$

где Z'_0 — волновое сопротивление воображаемой линии фиг. 9.3. Вторая кривая рассчитана по формуле Пальмера:

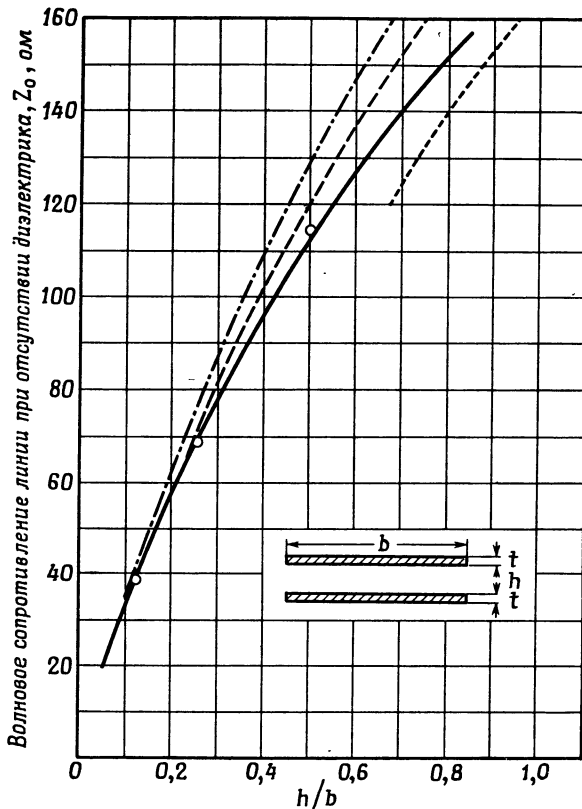
$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{2}{\{1 + h/(\pi b) [1 + \lg(2\pi b/h)]\}}. \quad (16)$$

Однако оба эти решения справедливы только при $h/b \ll 1$. Для двух узких полос Ассадуриан и Римэ дают следующее выражение, которое также представлено графически на фиг. 9.5:

$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \left(\frac{2b}{\pi h}\right) \lg\left(\frac{4h}{b}\right). \quad (17)$$

Как и следует ожидать, кривая, получаемая путем измерений в электролитической ванне, при увеличении h/b графически представляет тенденцию перехода от одного решения к другому.

Недавно Блэк и Хиггинс [132] предложили новое решение. Их метод основан на весьма усложненном



Фиг. 9.5. Волновое сопротивление симметричной линии с воздушным зазором.

— измерения в электролитической ванне при $b/t=32, 64$ или 96 ;
 --- решение по уравнениям Максвелла; - - - решение Пальмера;
 ····· узкая полоса над заземленной пластинкой;
 ○ по Блэку и Хиггинсу

применении преобразования Шварца — Кристоффеля и дает более точные результаты. На фиг. 9.5 показаны некоторые числовые данные, взятые из их работы. Как

можно видеть, точки лежат весьма близко к кривой, полученной при измерении. В связи с большой точностью измерения ($\pm 3\%$ для импеданса) можно полагать, что погрешности формулы незначительны.

5.2. Полоса над заземленной пластиной

Используя метод подобия, можно преобразовать приведенные выше выражения и получить решения для полоскового проводника над заземленной пластиной бесконечной ширины. В результате уравнения (11)—(17) принимают вид:

$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{1}{\{1 + 2h/(\pi b) [1 + \lg(1 + \pi b/2h)]\}}, \quad (18)$$

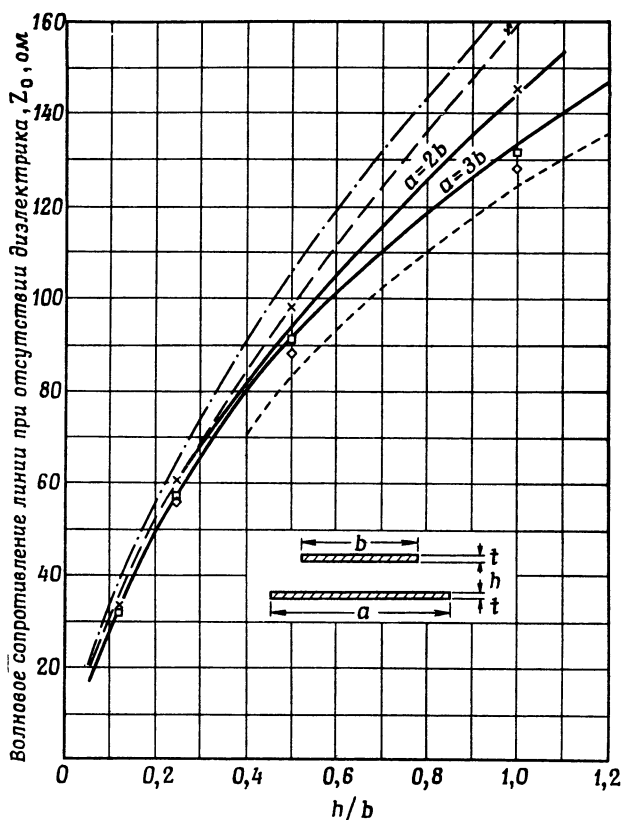
$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \frac{1}{\{1 + 2h/(\pi b) [1 + \lg(\pi b/h)]\}}, \quad (19)$$

$$\frac{Z_0}{Z'_0} = \left(\frac{b}{2\pi h}\right) \lg\left(\frac{8h}{b}\right). \quad (20)$$

Эти три решения представлены графически на фиг. 9.6, на этом же графике нанесены и результаты, полученные измерением для двух случаев полоскового проводника над заземленной пластиной конечной ширины. Здесь отклонение уже больше, так как, во-первых, уравнения (18) и (19) верны лишь при $h/b \ll 1$ и, во-вторых, они применимы только тогда, когда ширина заземленной пластины значительно больше ширины полоскового проводника.

Блэк и Хиггинс [132] приводят несколько числовых значений, полученных для линий с заземленной пластиной конечной ширины. Эти результаты также нанесены на график фиг. 9.6, и здесь снова наблюдается удивительное соответствие с результатами, полученными измерением в электролитической ванне. Следует отметить, что Блэк и Хиггинс также вычисляли нижний предел для $a/b = \infty$ и что этот нижний предел стремится приблизиться к измеренной кривой при $a/b = 3$. То, что результаты, соответствующие $a/b = 4$ и 8 , ложатся ниже указанного нижнего предела, объясняется

определенными приближениями, сделанными Блэком и Хиггинсом для того, чтобы можно было производить



Ф и г. 9.6. Волновое сопротивление полосковой линии при отсутствии диэлектрика над заземленной пластиной.

— измерения в электролитической ванне при $b/t=32$; ···· — решение по уравнениям Максвелла; - - - решение Пальмера; - - - - - взкая полоса над заземленной пластиной; x — по Блэку и Хиггинсу при $a=2b$; □ — по Блэку и Хиггинсу при $a=4b$; ◇ — по Блэку и Хиггинсу при $a=8b$.

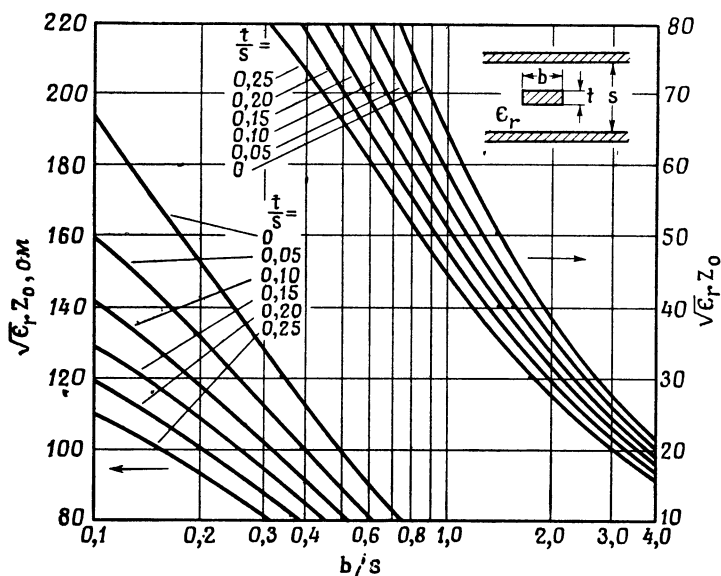
вычисления на обычном цифровом счетно-решающем устройстве.

5.3. Трехпластинчатая линия

Для сравнительно простого случая — полосковый проводник с нулевой толщиной ($t = 0$) и $a \gg b$ — справедлива следующая точная формула:

$$Z_0 = \frac{30\pi K(k)}{K(k')}, \quad (21)$$

где $K(k)$ и $K(k')$ — сложные эллиптические интегралы первого рода; $k = \sec \pi b/2s$ и $k' = \operatorname{tg} \pi b/2s$. Соответ-



Фиг. 9.7. Волновое сопротивление трехпластинчатой линии. [Вычислено С. Б. Коном, воспроизводится по *Trans. IRE*, МТТ-3, р. 199 (1955)].

ствующие таблицы эллиптических интегралов можно найти в работах [114, 118, 120].

Кон [128] построил семейство кривых (фиг. 9.7) для практического случая, когда полосковый проводник имеет конечную толщину. Эти кривые основаны на ана-

литических решениях, полученных независимо друг от друга рядом авторов (например, Беговичем, Пизом, Олинером, Фостером и др.), для двух ограничивающих условий: $b \gg s$ и $b \ll s$; и в том, и в другом случаях $a \gg b$. Экспериментальные данные для частных случаев $a = b$, $a = 2b$ и $a = 3b$ можно найти в работе [138]. Волновое сопротивление линии при $a = 3b$ настолько мало отличается от волнового сопротивления при $a = \infty$, что этим расхождением можно пренебречь.

Если эти кривые используются применительно к трехпластинчатой линии с низким Q -фактором (фиг. 9.2, в), то волновое сопротивление линии, найденное по кривой, должно быть умножено на $(\epsilon_0/\epsilon_d)^{1/2}$.

6. ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ

Как было сказано во введении к данной главе, линии передачи, показанные на фиг. 9.1, а и б и в меньшей степени на фиг. 9.1, в, очень трудно строго проанализировать. Однако эксперименты показали, что решение для волн типа ТЕМ, основанное на низкочастотных параметрах индуктивности и емкости для линии, пригодно для любых практических целей вплоть до частот, при которых h и s становятся равными значительной доле длины волны (например, $1/8 \lambda$). В этих случаях индуктивность точно такая же, как у линии с воздушной прослойкой, но емкость находится между двумя крайними значениями, соответствующими ϵ_d и ϵ_0 .

6.1. Симметричная и несимметричная полосковые линии

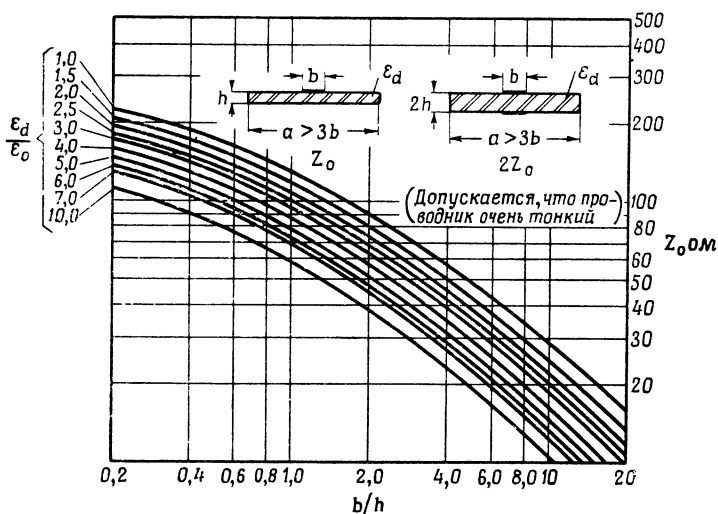
Приблизительное решение для этих случаев было найдено автором в работе [138]; полученные результаты представлены графически на фиг. 9.8. Их точность, очевидно, прогрессивно снижается с увеличением ϵ_d/ϵ_0 и уменьшением b/h , однако при средних значениях этих отношений (например, $b/h = 2$ и $\epsilon_d/\epsilon_0 = 3$) результаты измерений согласуются с вычисленными значениями с точностью около 2%.

6.2. Трехпластинчатая линия с низкой добротностью

При $a/b > 3$ эту линию можно считать однородной и использовать результаты разд. 5. Для $a/b < 3$ никаких данных не имеется.

6.3. Высокودобротная трехпластинчатая линия

На практике обычно можно сделать t таким малым, что волновое сопротивление линии будет меньше того,



Фиг. 9.8. Волновые сопротивления несимметричной и симметричной полосковых линий (решение для псевдо-ТЕМ; см. [138] и [169]).

которое показано на фиг. 9.7 (всего лишь на несколько процентов). Поправочный коэффициент равен λ_g/λ_0 , а эти значения можно вывести экспериментально или найти по кривым фиг. 9.10—9.12. Во всех случаях обычно допускают, что два полосковых проводника эквивалентны сплошному бруску толщиной t . Теоретическое исследование этого вопроса имеется в работе [142].

7. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ФАЗОВАЯ СКОРОСТЬ

В однородных линиях фазовая скорость равна скорости распространения. Она определяется выражением $(\mu_d \epsilon_d)^{-1/2}$ и постоянна независимо от частоты при условии, что потери малы (например, доля децибелла на длину волны). Экспериментальным путем было найдено, что неоднородная линия ведет себя аналогично для всех частот вплоть до той частоты, при которой h или s становится равным значительной доле длины волны (например, $1/8 \lambda$). Согласно этому, для практических целей достаточно вычислить скорость по индуктивности и емкости на единицу длины при низкой частоте.

7.1. Симметричная и несимметричная полосковые линии

Пользуясь тем же методом, который был описан в разд. 6, получаем результаты, графически представленные на фиг. 9.9. При этом следует принимать во внимание, что $v/c = \lambda_g/\lambda_0$.

7.2. Трехпластинчатая линия с низкой добротностью

Если $a/b > 3$, то такую линию можно рассматривать как однородную и скорость будет определяться выражением $(\mu)^{-1/2}$. Для $a/b < 3$ данных не имеется.

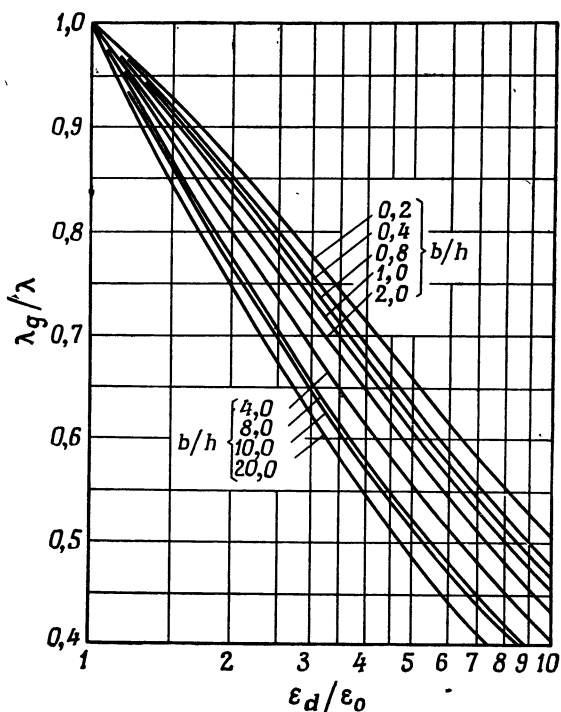
7.3. Высокодобротная трехпластинчатая линия

На практике часто представляется возможным поддерживать t таким малым, что скорость лишь на несколько процентов меньше скорости в свободном пространстве. Некоторые типичные результаты измерений показаны на фиг. 9.10—9.12. Этот вопрос был изучен теоретически Фостером [142], который построил кривые (фиг. 9.12), представляющие в некоторых случаях определенный интерес.

8. ЗАТУХАНИЕ И ДОБРОТНОСТЬ

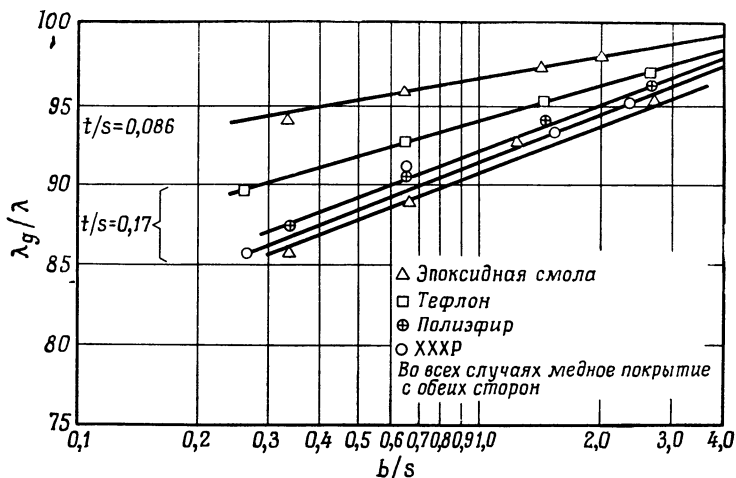
Уравнения (12) и (14) позволяют сделать строгий расчет потерь в проводнике для полосковых линий передачи любой формы. Но это слишком утомительный

расчет, и в данных обстоятельствах он не оправдывает себя. При $b/h > 5$ потери в проводнике составляют лишь несколько процентов от того значения, которое получается при расчете по уравнению (7) для идеализированной линии (см. фиг. 9.3) и при тех же значениях h .



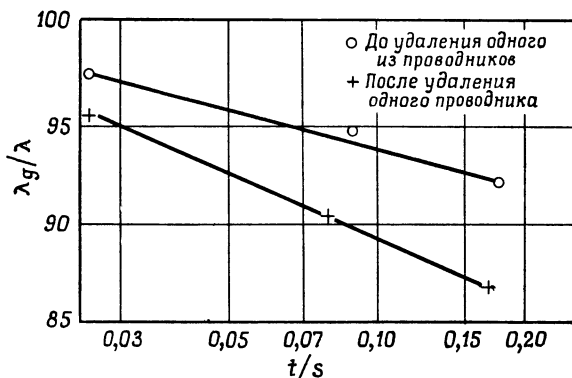
Фиг. 9.9. Длина волны в несимметричных и симметричных полосковых линиях (решение для псевдо-ТЕМ, см. [138] и [169]).

(Заметьте, что в это уравнение не входит величина b .) Чем уже становится полоса, тем выше потери, и при $b = h$ превышение затухания по сравнению со значением, получаемым из уравнения (7), может достигать порядка



Фиг. 9.10. Длина волны в высокочастотной трехпластинчатой линии при различных клеящих материалах и различной ширине полосы.

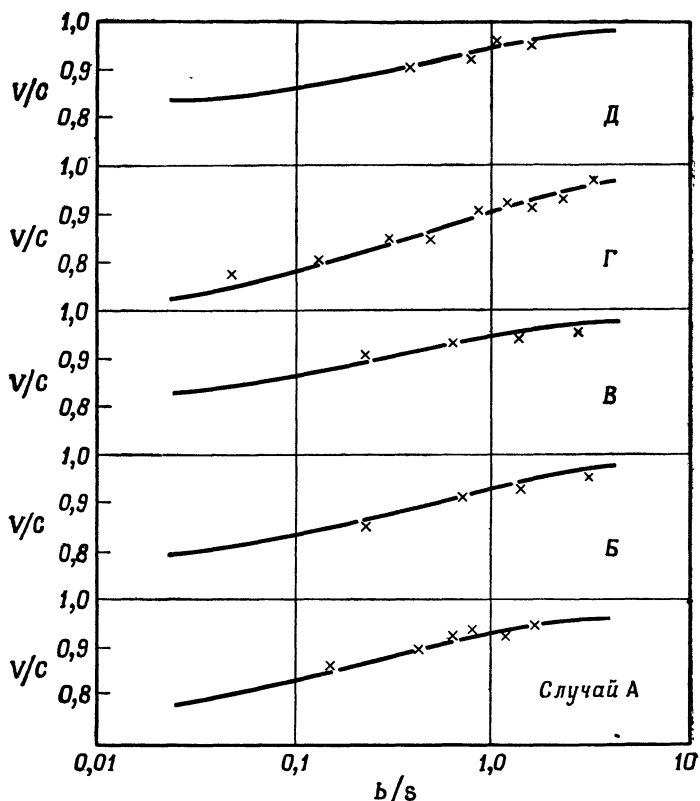
Измерения Купера и Рингенбаха; воспроизводится по работе [131].



Фиг. 9.11. Длина волны в высокочастотной трехпластинчатой линии на слоистом материале из эпоксидной смолы и стекловолкна.

Верхняя кривая соответствует симметричным полосковым проводникам, показанным на фиг. 9.2, г. Нижняя кривая получена после удаления одного из проводников, $b/s=13,3$ Измерения Купера и Рингенбаха; воспроизводится по [131].

70%. (Подробное исследование этого вопроса см. в работе [138].)



Фиг. 9.12. Сравнение теоретических и экспериментальных данных для высокочастотных трехпластинчатых линий (по Фостеру [142]).

А — силиконовое стекловолокно при 3000 МГц, $t/b=0,125$; Б — ХХР при 1000 МГц, $t/b=0,17$; В — ПТФЭ стекловолокно, при 1000 МГц, $t/b=0,17$; Г — силиконовое стекловолокно, при 9000 МГц, $t/b=0,25$; Д — полиэтилен, при 3000 МГц, $t/b=0,50$.

Приближенная оценка диэлектрических потерь может быть сделана таким же образом с помощью уравнения (8). В случае, показанном на фиг. 9.2, г, этими

потерями можно пренебречь при условии, что t/s достаточно мало и используется хороший изоляционный материал с малыми потерями.

При проектировании фильтров для линии передачи важно знать эффективную добротность этой линии. Эта величина связана с затуханием следующей зависимостью:

$$Q = \pi (a\lambda_g)^{-1}. \quad (22)$$

Добротность полосковой линии передачи в большой степени зависит от типа этой линии. Так, линии передачи, показанные на фиг. 9.2, *a* — *b*, обеспечивают добротность порядка нескольких сот в сантиметровом диапазоне (3000 *Mc*). В отличие от них линия, показанная на фиг. 9.2, *г*, может быть выполнена таким образом, что ее добротность при той же частоте составит несколько тысяч *Mc*. Учитывая этот и ряд других факторов, которые будут перечислены в разд. 10, схемы с фильтрами почти всегда изготавливают в виде высокодобротных трехпластинчатых линий.

9. ПЕРЕХОДНАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ПОЛОСКОВЫМИ ЛИНИЯМИ

Если два полосковых проводника помещены рядом над одними и теми же заземленными плоскостями или между ними, то из одной линии в другую будет переноситься небольшое количество энергии. Эта связь, являющаяся одновременно и индуктивной, и емкостной, значительно меньше, чем можно было ожидать. Таким образом, если требуется передать значительную долю энергии, то в сантиметровом диапазоне расстояние между проводниками должно быть меньше 0,5 *мм* на отрезке, равном по крайней мере длине волны. Возникновение этого явления связано со сравнительно быстрым поперечным затуханием поля. Этот вопрос, по-видимому, слабо изучен теоретически [133, 139], однако в литературе приводятся результаты измерений для ряда типичных устройств [147, 151, 154]. В общем можно сказать, что расстояние между проводниками,

в несколько раз большее ширины полосы, обеспечивает коэффициент переходной связи порядка $-30 \div -40$ дБ при условии, что проводники идут параллельно на отрезке, не превышающем нескольких длин волн.

С другой стороны, получить без специальных предосторожностей коэффициенты связи меньше -40 дБ очень трудно. Причины этого будут ясны из разд. 10, где рассматривается распространение с учетом рассеяния. В случаях несимметричной и симметричной полосковых линий мало что можно сделать, чтобы свести к минимуму паразитную связь, возникающую из-за неоднородности цепи. Однако при использовании трехпластинчатой линии правильно расположенные штыри, соединяющие две заземленные плоскости, подавляют распространение волн высшего типа, и связь между соседними цепями можно без особых затруднений сохранять в пределах менее -60 дБ.

10 ВОЛНЫ ВЫСШИХ ТИПОВ, ПОБОЧНЫЕ ВОЛНЫ И АНОМАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В любом случае желательно сократить ширину полоскового проводника настолько, чтобы она была несколько меньше $1/2 \lambda$ в диэлектрической среде, так как в противном случае может возникнуть распространение волн следующего высшего типа с нулевым электрическим полем в центре полоскового проводника. Для трехпластинчатой линии критическая длина волны этого типа определена точно [130], но для несимметричной полосковой линии эта величина еще не установлена. Аналогичным образом желательно ограничить расстояние между полосковым проводником и соседней заземленной плоскостью до величины, меньшей $1/4 \lambda$ в диэлектрической среде. Обычно оба эти требования нетрудно выполнить в пределах до частот порядка 12000 Мгц.

Более серьезным затруднением при работе с полосковыми линиями передачи является случай побочного распространения волн, которое не связано с преобладающим типом волн. Еще большие трудности вызывает возможность (при определенных неблагоприятных усло-

виях) прямого излучения. В случае трехпластинчатой линии распространение побочных волн обычно зависит от граничных условий и перехода в несимметричные волны типа ТЕМ между двумя заземленными пластинами или, если боковые стороны закрыты, в волны типа H_{0n} . Эти волны возникают либо из-за небольшого продольного перегиба полоскового проводника, либо из-за асимметричной неоднородности и вызывают излучение с боковых сторон линии до тех пор, пока цепь не будет полностью закрыта. Затруднения, связанные с волнами этих типов, можно устранить путем замыкания двух заземленных плоскостей накоротко в области неоднородности при помощи решетки, образованной соответствующим образом расположенными металлическими остриями [149, 152, 153].

В случае несимметричной полосковой линии наблюдается несколько иная картина. Для линии с воздушной прослойкой, у которой $h < 1/2\lambda$ и $b < 1/2\lambda$, граничные условия не допускают никакого другого решения, кроме того, при котором преобладающим типом волн является ТЕМ. Аналогичное заключение справедливо, по-видимому, и для случая, изображенного на фиг. 9.2, б, при условии, что ширина диэлектрика не превышает около $1/2\lambda$ в диэлектрике, хотя фактически в этом случае волна должна обладать небольшими составляющими как E , так и H , направленными по ходу распространения. Если же, как это часто встречается на практике, ширина прокладки равна нескольким длинам волн, то положение становится довольно неясным. Так, например, может происходить распространение целой серии волн, по своим свойствам почти идентичных волнам преобладающего типа, но с другим распределением поля в отдаленных участках на любой стороне полоскового проводника. Существует и другая возможность возникновения побочного распространения типов волн, которые можно поддерживать независимо от преобладающего типа. Возьмем плоский лист стекловолнистого пластика ПТФЭ толщиной 1,6 мм, покрытый с одной стороны фольгой. В этом случае при обычных сантиметровых частотах известен единственный возможный вариант:

поперечная магнитная поверхностная волна низшего типа. Наличие неоднородностей у краев листа или в любом другом месте приводит к тому, что излучение этого типа волн становится довольно сильным. Определенные виды неоднородностей в системе полоскового проводника, такие, например, как индуктивный шунтирующий штырь, будут давать непосредственное излучение без промежуточного перехода. В этой связи следует подчеркнуть, что при оценке степени излучения того или иного компонента несимметричной полосковой линии, необходимо быть очень осторожным. Так как несимметричная полосковая линия является открытой системой, то в этом случае поле простирается (теоретически) до бесконечности, и энергия будет переходить в любую цепь, расположенную поблизости от линии передачи. Так как основная часть энергии распространяется в области между полосковым проводником и заземленной пластиной, то энергия, улавливаемая датчиком, расположенным над электрической прокладкой, обычно очень мала. При больших импульсах возможно прямое излучение. Это проверяется исследованием изменения энергии связи с изменением расстояния датчика от линии. Если наблюдается затухание, обратно пропорциональное квадрату расстояния, то это дает основание предполагать наличие излучения [153].

Несмотря на этот перечень трудностей, несимметричная полосковая линия может быть на практике выполнена таким образом, что она будет работать вполне удовлетворительно. Однако область применения таких линий обычно ограничивается широкополосными деталями с низкой добротностью (подобные случаи будут описаны ниже). В пределах этой области несимметричные полосковые линии имеют, несомненно, много преимуществ перед трехпластинчатыми линиями как с точки зрения настройки, так и с точки зрения изготовления.

В заключение следует отметить еще одно явление, общее для всех полосковых линий передачи. Переход от волновода или коаксиального кабеля неизбежно влечет за собой значительное изменение структуры поля. Следовательно, поле в полосковой линии вблизи перехода

будет состоять из волны преобладающего типа и волн высшего типа в количестве, достаточном для удовлетворения граничных условий при переходе. (При неблагоприятных условиях может иметь место и некоторая доля излучения.) Интенсивность волн высшего типа быстро убывает, так как они обычно находятся вне пределов пропускания, и на достаточном расстоянии от перехода остается только преобладающий тип волн. Это явление особенно заметно у несимметричных полосковых линий, для которых было найдено, что коэффициент затухания волн высшего типа является функцией расстояния от перехода. На расстоянии, не превышающем 5λ , он растет весьма быстро и в конце концов на расстоянии порядка 20λ и более от перехода достигает асимптотического предела.

11. ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ЧАСТОТЫ

Как было показано выше, большое значение имеет сохранение определенных соотношений между размерами b , h и длиной волны. Следовательно, максимальный размер поперечного сечения определяется как f^{-1} . Подставляя это значение в уравнение (7) и считая, что $R \sim f^{1/2}$, получаем, что минимальная возможная потеря в проводнике на единицу длины изменяется как $f^{3/2}$. Кроме того, необходимо учитывать, что диэлектрические потери будут изменяться линейно с изменением f , а основные размеры в направлении распространения волн элементов схемы будут уменьшаться как f^{-1} . На основании этих соображений можно вывести закон, что

$$\text{Минимальные потери в цепи} = m + nf^{1/2} \text{ дБ}, \quad (23)$$

где m и n — постоянные, зависящие от используемых материалов и типа полосковой линии передачи. Для трехпластинчатой высокочастотной линии m очень мало (при условии, что используются высококачественные материалы), и, следовательно, главную роль играет второй член уравнения. У несимметричной полосковой линии, напротив, более важным показателем являются

диэлектрические потери и второй член приобретает значение только в верхней части сантиметрового диапазона.

До настоящего времени техника полосковых линий ограничивалась обычно частотами ниже 12 000 Мгц. Приведенные выше соображения позволяют предположить, что область применения этой техники можно расширить до значительно более высоких частот, где потери все еще не будут чрезмерно большими. Практически предел частоты может определяться трудностями изготовления очень мелких панелей для печатных схем с достаточной степенью точности, хотя эти трудности характерны не только для полосковых линий передачи.

12 ИЗМЕРЕНИЯ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Измерения в области сверхвысоких частот можно разделить на два вида: первичные, дающие подробное описание электромагнитного поля, и вторичные, связанные с измерениями параметров на клеммах (например, измерение волнового сопротивления линии или затухания). Техника определения этих параметров полосковой линии или ее отдельных составных частей ничем существенно не отличается от техники, применяемой к другим системам сверхвысокочастотных передач. Практиковалось, насколько это возможно, использование существующего оборудования, изготавливаемого для коаксиальных линий или полых волноводов. Это облегчается тем, что можно достаточно хорошо подобрать схему под коаксиальный кабель в довольно широком диапазоне частот. Кроме того, нет никаких оснований полагать, что конструирование специальных прецизионных приборов с использованием полосковых линий сколько-нибудь легче. На самом деле, за исключением одного-двух случаев, здесь встречаются еще большие трудности.

Для исследования действующего поля в линии не существует никаких других способов, кроме прорезания щелей или введения пробников. Результаты, получаемые таким способом, часто могут ввести в заблуждение, осо-

бенно в случае несимметричных полосковых линий. Исследование поля в воздушном пространстве над полосковым проводником дает плохое представление о распределении поля в зоне между полосковым проводником и заземленной пластиной. С другой стороны, попытка ввести пробники в зону между полосковым проводником и заземленной пластиной может вызвать серьезные нарушения поля. Надежность производимых таким способом измерений весьма сомнительна [125]. Так, например, измерения стоячих волн в несимметричной полосковой линии наводят на мысль о существовании значительной интерференции различных типов волн, тогда как измерения по методу Дешампса¹⁾ не обнаруживают побочных волн при условии, что в структуре линии нет никаких серьезных неоднородностей.

¹⁾ См., например, Deschamps G. A., «Determination of Reflection Coefficients and Insertion Loss of a Waveguide Junction», *J. Appl. Phys.*, **24**, 1046 (1953).

Dukes J. M. C., «Waveguides and Waveguide Junctions—Geometrical Analysis of their Properties», *Wireless Engineer*, **32**, 65 (March 1955).

Altschuler H. M., Oliner A. A., «Microwave Measurements with a Lossy Variable Termination», *Proc. IEE*, Monograph № 179R, 103 С р. 392 (May 1956).

См. также работы [147, 154].

Глава X

ПЕЧАТНЫЕ СХЕМЫ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

К сожалению, в таком небольшом объеме, который занимает эта глава, невозможно достаточно полно осветить различные изобретения в области печатных схем на сантиметровых волнах. Не удастся также подробно рассмотреть принципы различных конструкций. Мы ограничимся лишь кратким обзором этой области и проиллюстрируем его некоторыми примерами. Читатель, желающий глубже изучить вопрос, может воспользоваться литературой, ссылки на которую даются в тексте.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ УЗЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Существенным различием между сверхвысокочастотной и низкочастотной техникой является использование распределенных цепей, а не контуров с сосредоточенными параметрами. Последние не используются, потому что они должны были бы иметь чрезмерно малые размеры, а это, помимо конструктивных затруднений, приводит еще и к неразумно низким значениям допустимой мощности и добротности. Поэтому схемы изготавливаются из участков линии передачи, которые могут иметь форму коаксиального кабеля, полого волновода или, как в данном варианте, полосковой линии передачи. В общих чертах эти составные части можно разделить на следующие группы.

1. Узлы, представляющие собой комбинацию отрезков однородной линии передачи. Таким способом можно

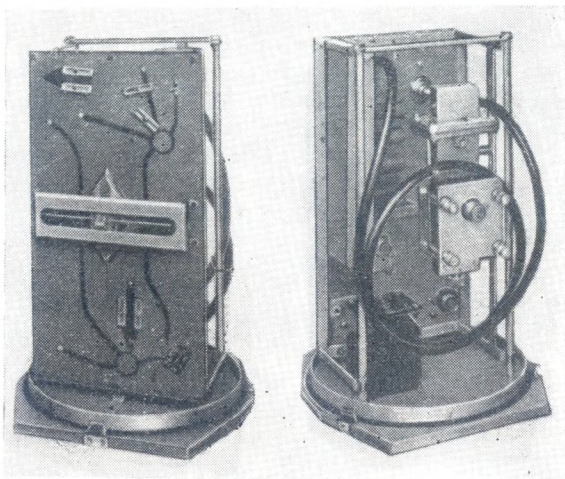
получить самые разнообразные функциональные узлы. Свойства каждого такого узла зависят от способа комбинации линий передачи и могут быть определены с помощью обычных уравнений для линий передачи. Принципиально никаких сведений о поле внутри линии не требуется. Примерами таких узлов могут служить гибридные узлы кольцевого типа, фильтры, составленные из резонансных отрезков линии передачи, и устройства для деления мощности.

2. Узлы, образованные путем введения пассивной неоднородности в линию передачи, которая до этого была однородной. Примерами таких неоднородностей являются зазоры в проводниках или поперечные штыри. Такие элементы реактивны, и их поведение при изменении частоты аналогично поведению сосредоточенного реактивного сопротивления. Так, например, зазор будет вести себя почти так же, как последовательная емкость, а шунтирующий штырь эквивалентен параллельной индуктивности. Фильтры могут быть получены в результате соответствующей комбинации различных неоднородностей. В этот класс включаются также преобразователи, служащие для соединения физически разнородных линий передачи (например, для соединения коаксиальной линии с полосковой линией передачи), так как соединение неизбежно вызвало бы нарушение электромагнитного поля даже в том случае, когда волновое сопротивление двух линий одинаковое.

3. Атенюаторы и согласованные нагрузки. Устройства такого типа можно получить путем введения в линию передачи элемента с большим затуханием, который поглощает мощность. Так как этот элемент изменяет волновое сопротивление линии, его следует вводить постепенно, чтобы не вызвать отражений.

4. Узлы, включающие в себя активные элементы, смонтированные как часть линии передачи. К ним относятся держатели с кристаллом (или в виде детектора, или в виде преобразователя частоты в супергетеродинном приемнике), термисторные держатели (для измерений мощности) и различные ферритовые устройства.

За последние два десятилетия был создан достаточно полный набор различных деталей, в которых используются либо коаксиальные линии, либо полые



Фиг. 10.1. Дуплексная сверхвысокочастотная головка для испытания распространения волн в сантиметровом диапазоне.

Используя общий генератор, это устройство передает и принимает на разделенных частотах с разницей в 60 Мгц на полосе частот в 4000 Мгц . Панель несимметричной полосковой линии толщиной $3,2 \text{ мм}$ изготовлена из слоистого материала — стекловолокна ПТФЭ методом травления фольги. Панель содержит следующие основные детали: 2 гибридных узла типа „мышеловка“, 1 активную согласованную нагрузку (плюс 1 резервную для проверки), 1 регулируемый аттенюатор, 1 настраиваемый удлинитель линии (в центре панели), 1 держатель с кристаллом (на задней стороне панели), 5 трансформаторов от несимметричной полосковой линии к коаксиальной линии и 1 постоянный и 2 переменных согласующих элемента. Характеристики этой головки сравнимы с характеристиками аналогичного устройства на волноводах, а преимуществами ее являются меньшие толщина и вес и более легкая настройка. (Более подробно см [169].)

волноводы. Кроме того, были точно определены принципы их проектирования. По сравнению с работами в этой области работы над печатными схемами на сантиметровых волнах проводились в относительно небольшом

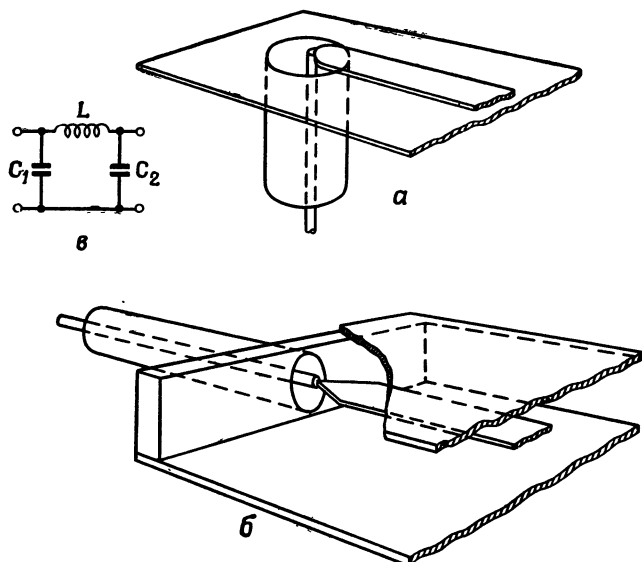
объеме и были начаты позднее¹⁾). Тем не менее и здесь был создан довольно широкий ряд составных узлов (схем), демонстрирующий возможности нового направления в этой технике. Однако область практического применения этих узлов была сравнительно ограничена. Основные причины этого заключаются в следующем. Во-первых, предельно допустимая мощность этих узлов значительно ниже той, на которой обычно работают радиолокационные системы средней и высокой мощности. Во-вторых, техника печатных схем связана с рядом практических трудностей: возникают препятствия при строгой математической обработке (результатов), так как необходимо принимать во внимание определенные побочные явления; усложняется техника измерений. В-третьих, очень трудно добиться такой высокой добротности, какую дает полый волновод. Однако печатные схемы сверхвысокой частоты имеют определенные преимущества перед полыми волноводами. Они меньше, легче и производство их намного дешевле. Кроме того, при определенных благоприятных условиях они могут работать в значительно более широкой полосе частот. Действительно, некоторые узлы, описанные ниже, работают удовлетворительно на полосе шириной по меньшей мере в три октавы.

2. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Переходные трансформаторы от волноводов или коаксиальных линий к полосковым линиям могут быть

¹⁾ Интересный патент был представлен Д. К. Роджерсом в 1940 г. Здесь описан фильтр плоского типа, который в определенных отношениях превзошел более поздние изобретения. Позднее, во время войны, было начато изготовление распределительных устройств антенн с использованием плоских проводников для Военно-морского флота США. Приблизительно в это же время проф. Майнке подготовил для своих студентов в Мюнхене рукопись, в которой приводились формулы и описывались некоторые детали. Но тем не менее только после войны эти два изобретения — плоские электрические схемы и техника изготовления схем печатанием — были объединены и привели к созданию таких систем полосковых линий передачи, какими мы их знаем теперь. Это изобретение связано с именами многих ученых, наиболее выдающимися из которых являются Григ, Энгельман и Баррет [143, 144, 151].

присоединены либо как продолжение линии, либо под прямым углом к ней. На фиг. 10.2 в упрощенной форме показано по одному примеру каждого соединения для двух основных видов полосковой линии передачи. Для



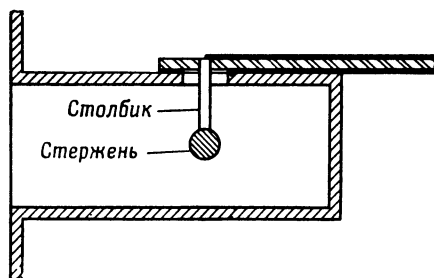
Фиг. 10.2. Виды перехода с коаксиальной на полосковую линию передачи.

Для упрощения изоляторы не показаны.

a — соединение под прямым углом (для несимметричной линии); b — соединение в одну линию (для трехпластинчатой линии); $в$ — эквивалентная схема этих двух соединений.

трехпластинчатой линии соединение под прямым углом не рекомендуется, так как это может вызвать возникновение нежелательного типа волн, параллельных пластинам, между двумя заземленными плоскостями. Но в некоторых случаях этот способ соединения может, очевидно, быть с успехом использован [155]. Для несимметричной полосковой линии было найдено, что соединение под прямым углом дает лучшее согласование на более широкой полосе частот, и поэтому оно было принято как универсальное [154].

Так как на практике полосковые линии передачи в рабочем диапазоне являются фактически нерассеивающими, то их волновое сопротивление не зависит от частоты. То же самое наблюдается и у коаксиальных кабелей, следовательно, устройства типа показанных на фиг. 10.2 — широкополосные, без нижнего предела частоты. Однако физическая неоднородность вводит между двумя системами реактивный элемент, определяющий верхний предел частот. Путем подбора конструкции



Фиг. 10.3. Устройство для перехода от волновода к несимметричной полосковой линии.

этот предел может быть приближен к верхнему пределу частот самой полосковой системы, который практически составляет 10 000—15 000 *Мгц*. Например, для соединения под прямым углом (фиг. 10.2) последовательная индуктивность L выступающего стержня может быть согласована в очень широком диапазоне частот соответствующей регулировкой емкостей C_1 и C_2 , где C_1 — емкость неоднородности входного отверстия в заземленной пластине, а C_2 — краевая емкость полоскового проводника. В одном из примеров, приведенных Ардити [154], достигается согласование лучше 0,7 фактически по всему сантиметровому диапазону до частоты порядка 11 000 *Мгц*. Такая же эквивалентная схема применяется и в случае трехпластинчатого соединения, показанного на фиг. 10.2, б.

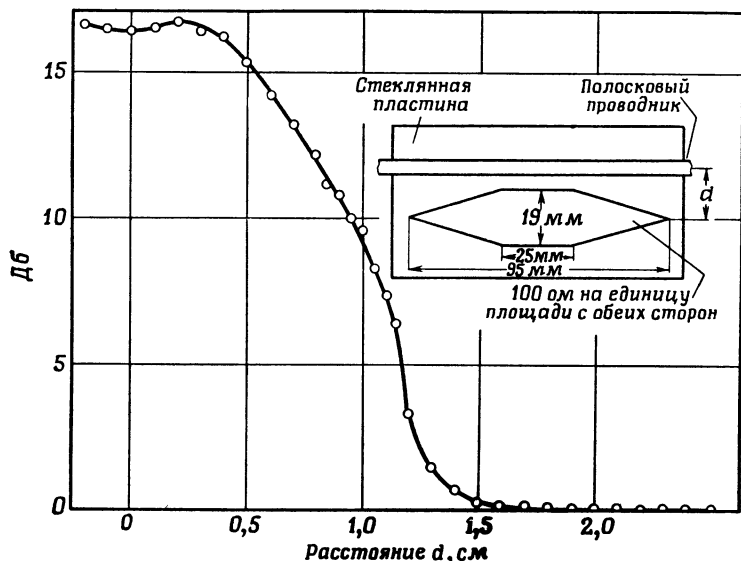
Связь между волноводом и полосковой линией может быть осуществлена различными способами. На фиг. 10.3 показано устройство простейшей конструкции, аналогичной переходным устройствам от волновода к коаксиальной линии. В этом случае доля стоячих волн того же порядка, что и в прототипе. Аналогичная конструкция может быть использована и для трехпластинчатой линии, но для того чтобы обеспечить симметричное возбуждение, рекомендуется монтировать трехпластинчатую линию под прямым углом к широкой стенке волновода, а присоединительный зажим и полосковый проводник соединять затем по прямой линии. Если требуется лучшее согласование в более широком диапазоне частот, можно использовать клиновидное устройство такого типа, как описано у Ардити [154].

3 НАГРУЗКИ И АТТЕНЮАТОРЫ

Удовлетворительная широкополосная нагрузка, имеющая коэффициент стоячей волны напряжения выше 0,9 по всему сантиметровому диапазону, легко осуществляется путем присоединения к полосковому проводнику клиновидного куска картона, на который нанесено угольное покрытие. Если положение картона определяет количество поглощенной энергии, то устройство представляет собой регулируемый аттенюатор. Это обычно достигается путем перемещения картона поперек линии в горизонтальной плоскости. Но если горизонтальное пространство ограничено, можно с успехом применить устройство с откидной заслонкой.

Картон с угольным покрытием, хотя и пригоден в качестве нагрузки, однако он не является идеальным материалом для аттенюаторов: во-первых, его свойства изменяются в зависимости от влажности и температуры, а, во-вторых, картон, если он не прикреплен к какой-либо более плотной подложке, имеет недостаточную твердость. Вместо картона были испытаны аттенюаторы, изготовленные из металлизированного стекла такого типа, какое используется в полых волноводах. Результаты измерений, полученные с таким аттенюатором, приведены

на фиг. 10.4. Коэффициент стоячей волны напряжения для максимального затухания составлял 0,8. Для получения воспроизводимых результатов необходимо, чтобы стеклянная вставка оставалась на неизменном расстоянии над полосковым проводником, а чтобы затухание



Фиг. 10.4. Атенюатор со стеклянной вставкой ($f = 4000$ Мгц).

было максимальным, вставка должна фактически касаться полоскового проводника. (При этом условии и были проведены измерения, иллюстрируемые фиг. 10.4.) Однако это не удовлетворяет механическим требованиям, так как непрерывное истирание металлического покрытия приводит к изменению характеристики аттенюатора.

Был испытан другой вариант, когда элемент из металлизированного стекла помещается между полосковым проводником и заземленной пластиной. Максимальное затухание в этом случае составляло только 5 дб. Этот результат и то, что на фиг. 10.4 максимальное

затухание достигается тогда, когда элемент слегка смещен от центра, подтверждают, что поверхностные аттенюаторы действуют путем поглощения энергии краевого поля. У краев проводника силовые линии идут приблизительно по горизонтали и, следовательно, лежат в плоскости поглощающей поверхности.

Аттенюаторы и нагрузки, в состав которых входит материал с большими потерями, помещаемый между полосковым проводником и заземленной пластиной, работают удовлетворительно лишь в том случае, когда материал однороден и заполняет все пространство между заземленной пластиной и полосковым проводником. Недостатком такого аттенюатора являются некоторые механические трудности.

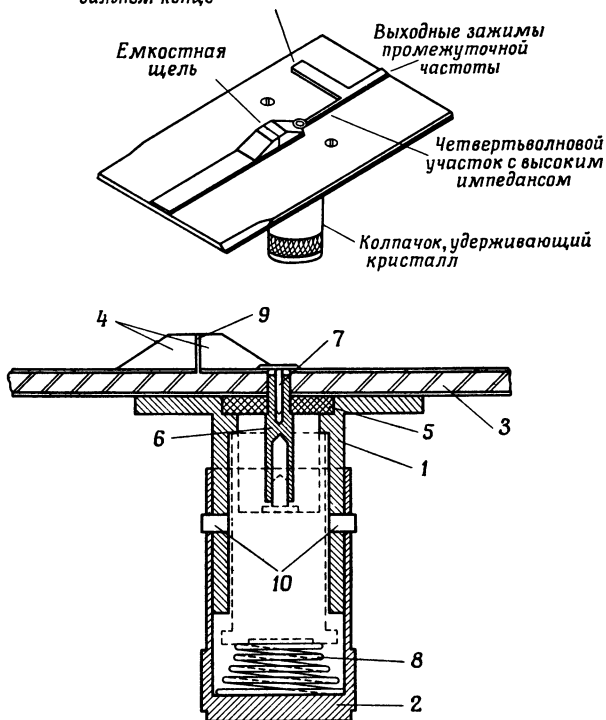
Был разработан еще один тип аттенюатора [169], в котором пластина материала с потерями прикреплена к нижней стороне заземленной пластины. Энергия поглощается через соответствующим образом расположенные щели в заземленной пластине.

4 ДЕРЖАТЕЛИ КРИСТАЛЛОВ

Обычные капсулы с кристаллом предназначаются чаще всего для установки в коаксиальных системах. Поэтому, за одним лишь исключением [125], держатели кристаллов составлялись фактически из коаксиальных держателей, связанных соответствующим трансформатором с системой полосковой линии. Такие держатели имеют лишь то преимущество перед обычными коаксиальными, что все необходимые согласующие элементы могут быть включены непосредственно в систему полосковой линии. На фиг. 10.5 показан держатель, в котором максимально использованы эти возможности [169]. Эта схема отличается от обычного устройства тем, что кристалл непосредственно шунтирует линию передачи. Следовательно, со стороны подачи высокой частоты обязательно должен быть предусмотрен последовательный конденсатор, имеющий низкий импеданс на радиочастотах и высокий — на средних. Преимуществом такого устройства является то, что сигнал промежуточной

частоты можно снять непосредственно с полоскового проводника, а не с металлического патрона кристалла,

Четвертьволновый отрезок с низким импедансом, разомкнутый на дальнем конце



Ф и г. 10.5. Широкополосный держатель с кристаллом.

1 — корпус держателя кристалла; 2 — колпачок, удерживающий кристалл (штыковое крепление); 3 — панель несимметричной полосковой линии; 4 — емкостные выступы; 5 — шайба из стирола; 6 — центральный штырь; 7 — винт, удерживающий центральный штырь; 8 — пружина, удерживающая кристалл; 9 — слюдяная прокладка; 10 — фиксирующие выступы.

что позволяет легко вынимать кристалл. Кроме того, выходной фильтр можно печатать на поверхности панели, вместо того чтобы изготавливать его как часть коаксиального держателя.

Практически последовательный конденсатор выполняет двойную функцию: изоляцию и высокочастотное согласование. С этой целью конденсатор помещают в такую точку линии, где импеданс кристалла носит индуктивный характер. Так как кристалл плохо согласуется с линией, то здесь достаточна весьма малая емкость. В частном случае, показанном на фиг. 10.5 для полосы 2500—4100 *Мгц*, требуется емкость 2—3 *пф*. Проводились эксперименты при частоте 4000 *Мгц*, которые должны были показать, можно ли получить такую емкость с помощью простой поперечной щели в полосковом проводнике. Для данных размеров и материалов при ширине щели 0,13 *мм*, что считается практически лимитирующим размером, последовательная емкость составила всего лишь 0,33 *пф*. В другом варианте к полосковому проводнику припаивалась небольшая бронзовая колодка, в которой выфрезировывалась щель шириной 0,25 *мм*, расположенная на соответствующем расстоянии от места присоединения кристалла. Совершенно очевидно, что с производственной точки зрения было бы выгоднее получать требуемую емкость путем печатания спиральной щели, которая вполне осуществима.

Это устройство имеет низкую шунтирующую емкость к выходным клеммам промежуточной частоты (в рассмотренном случае только 6 *пф*) и поэтому пригодно для детектирования сигналов с очень широкой полосой: верхний предел частоты около 200 *Мгц*. Без последовательного конденсатора входной коэффициент стоячей волны напряжения держателя составляет в среднем около 0,2 на большей части полосы. При введении конденсатора согласование достигает максимума порядка 0,8 при частоте 3420 *Мгц*, постепенно падая до исходного значения 0,2 при частотах 2500 и 4100 *Мгц*. Такие кристаллы, хотя и имеют весьма низкое согласование, очень надежны, что является существенным преимуществом при конструировании балансных смесителей. Благодаря простоте конструкции печатных схем и собственной им воспроизводимости держатели в целом отличаются также хорошим качеством.

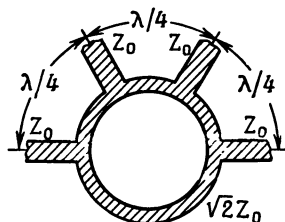
5. ГИБРИДНЫЕ УЗЛЫ

Обычную Т-образную схему, в которой используются конгруэнтные последовательные и параллельные соединения, нелегко выполнить в виде полосковой линии. Однако эквивалентную характеристику можно получить другими средствами. Во-первых, существует множество различных схем кольцевого типа, которые обеспечивают решение задачи с помощью взаимосвязанных четвертьволновых линий передачи. Такие схемы легко выполняются в виде полосковых линий, и единственным ограничением в этом случае является частотная зависимость, характерная для четвертьволновых участков. Во-вторых, имеются различные виды направленных ответвителей на 3 дБ. Если механизм связи направленного ответвителя состоит из четвертьволновых участков, то различия между двумя последними видами схем исчезают. Следовательно, можно рассмотреть эти схемы в данном параграфе, объединив их под общим названием «кольцевые схемы».

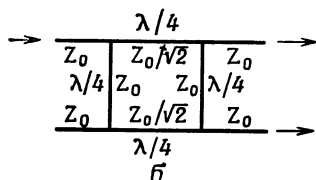
Наилучшей из известных кольцевых схем является так называемая «мышеловка» (фиг. 10.6, а). Был изготовлен и испытан целый ряд таких соединений в форме несимметричной полосковой линии. Обычно наблюдалось развязывание более чем в 20 дБ при ответвлении мощности около 1 дБ в полосе частот порядка 20% [154]. При более узких полосах возможно развязывание свыше 30 дБ при условии, что данная деталь изготовлена с достаточной точностью. В качестве другого варианта можно использовать устройство для связи в виде разветвленного плеча (фиг. 10.6, б). Так как здесь отсутствует отрезок $\frac{3}{4} \lambda$, то можно ожидать снижения частотной зависимости, что и подтверждается экспериментально. В связи с очень большой шириной проводников с малым импедансом точная электрическая длина разветвленных плеч становится весьма неопределенной, поэтому для удобства схема была преобразована в соответствии с фиг. 10.6, в.

Следует отметить, что фиг. 10.6, а и в даны в одном и том же масштабе для следующих одинаковых

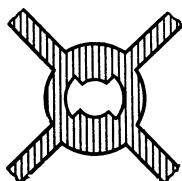
условий: расчетная средняя частота 3300 Мгц, волновое сопротивление 50 ом, толщина диэлектрической прокладки 1,6 мм. Если, сохраняя все прочие параметры неизменными, увеличивать расчетную среднюю частоту, то внутренняя окружность кольца в конце концов уменьшится до нуля. Следовательно, такие кольцевые схемы имеют верхний предел частоты, который при применении устройства связи в виде разветвленного плеча на 3 дб достигается быстрее, чем при использовании схемы «мышеловка».



а



б



в

Фиг. 10.6. Простые гибридные схемы.

а — обычная «мышеловка»; б — схематическое изображение устройства связи с разветвленным плечом на 3 дб; в — применяемое на практике видоизменение схемы б.

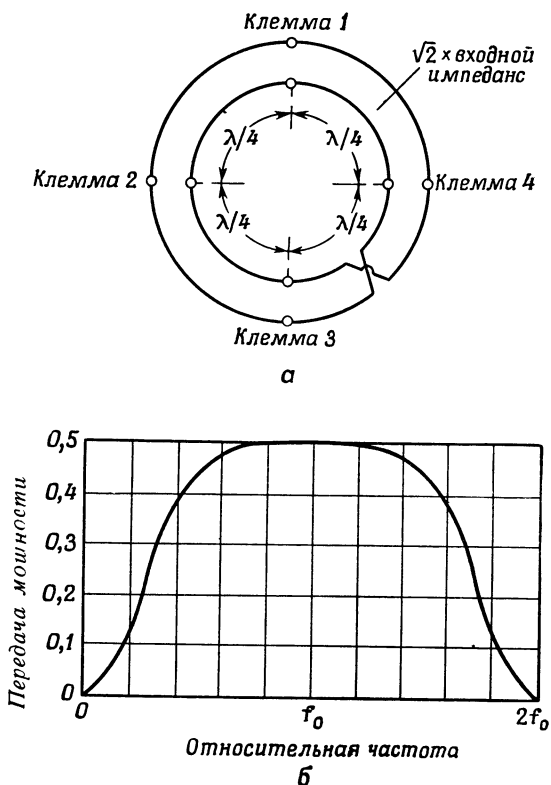
Масштабы соответствуют расчетной частоте 3200 Мгц, входному сопротивлению 50 ом и толщине прокладки 1,5 мм (слоистый изолятор из стекловолкна ПТФЭ).

равной длине средней окружности и необходимо введение небольшой поправки.

Чтобы расширить рабочую полосу устройства связи с разветвленным плечом, можно увеличить число ветвей до трех и более. Однако импеданс внешних ветвей ста-

Если, сохраняя все прочие параметры неизменными, увеличивать расчетную среднюю частоту, то внутренняя окружность кольца в конце концов уменьшится до нуля. Следовательно, такие кольцевые схемы имеют верхний предел частоты, который при применении устройства связи в виде разветвленного плеча на 3 дб достигается быстрее, чем при использовании схемы «мышеловка». Этот недостаток можно преодолеть путем увеличения волнового сопротивления или путем уменьшения толщины диэлектрической прокладки. Предпочтение отдается обычно второму способу при условии, что допустимо небольшое повышение затухания. Далее следует отметить, что при малом внутреннем диаметре кольца эффективная электрическая длина перестает быть

новится при этом невыполнимо высоким, поэтому рекомендуется использовать щелевую связь, описание которой приведено ниже.

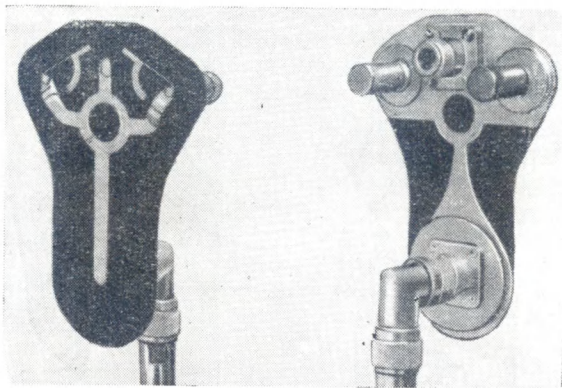


Ф и г. 10.7. Гибридное кольцо с опрокидыванием фазы.

а — схематическое изображение; б — теоретическая кривая передачи мощности

Обычную схему «мышеловка» можно значительно улучшить, заменив участок $\frac{3}{4} \lambda$ участком $\frac{1}{4} \lambda$ с одновременным опрокидыванием фазы. Такое устройство, известное под названием «гибридное кольцо с опрокиды-

ванием фазы»¹⁾, схематически показано на фиг. 10.7, а. Можно показать, что такая схема обеспечивает безупречное развязывание и разделение мощности в бесконечно широкой полосе частот. Однако и в этом случае согласованность входа остается функцией частоты, и

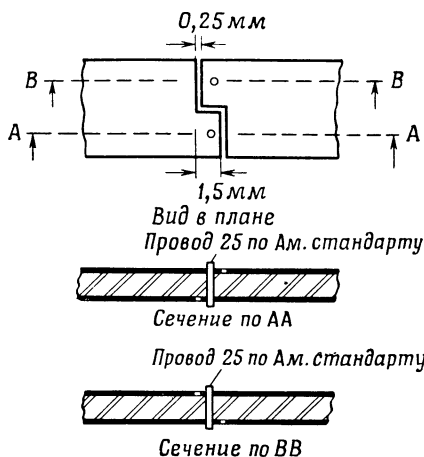


Фиг. 10.8. Балансный смеситель для гетеродинного приемника, включающий в себя гибридное кольцо с опрокидыванием фазы, два держателя с кристаллами, в которые входят согласующие конденсаторы и выходные фильтры, и два трансформатора от коаксиальной к несимметричной полосковой линии.

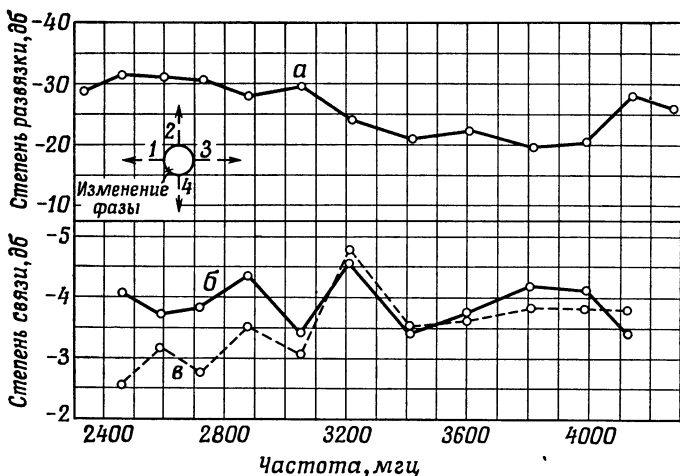
если рабочая частота не совпадает с расчетной средней частотой, происходит увеличение потерь мощности вследствие отражения.

На фиг. 10.8 показан образец экспериментального балансного смесителя, изготовленного на основе такой кольцевой схемы. Смеситель выполнен частично как несимметричная, частично как симметричная полосковая линия. Опрокидывание фазы, происходящее в той части кольца, которая выполнена в виде симметричной линии, более подробно показано на фиг. 10.9. Реактивная про-

¹⁾ Tyminski W., «A Wide-Band Ring for UHF», *Proc. IRE*, 41, № 1, 81 (1953).



Ф и г. 10.9. Механические детали фазоинвертора, использованного в смесителе фиг. 10.8.



Ф и г. 10.10. Результаты, полученные при испытаниях гибридного кольца с опрокидыванием фазы, показанного на фиг. 10.8.

а — степень развязки между плечами 1 и 3; б — связь между плечами 1 и 2; в — связь между плечами 1 и 4.

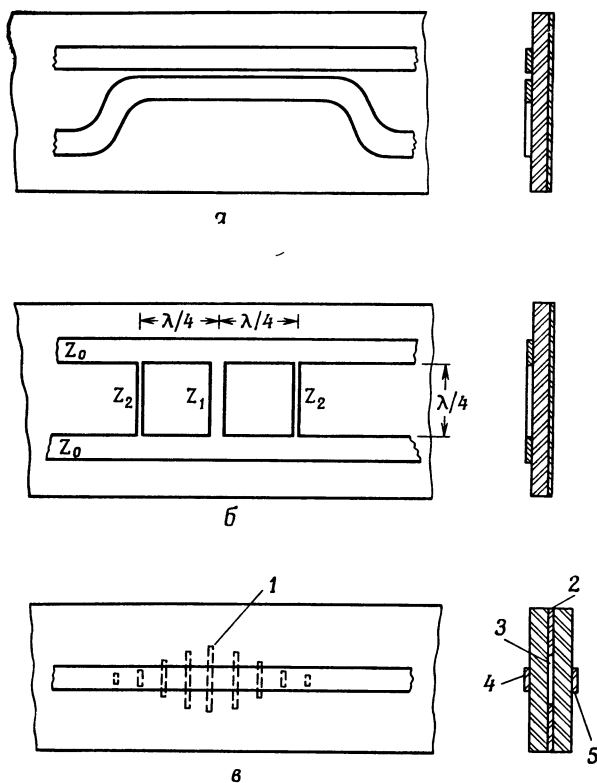
водимость неоднородности фазоинвертора очень мала, и сколько-нибудь значительное излучение отсутствует. Характеристика кольцевой схемы, за исключением держателей с кристаллом и коаксиальных цепей, показана на фиг. 10.10. Для того чтобы упростить монтаж коаксиального соединителя нижнего входного плеча, нижний полосковый проводник расширен таким образом, что он образует заземленную плоскость для верхнего полоскового проводника. Однако здесь существует опасность, что малые токи, текущие по нижней стороне этого проводника, могут пойти вдоль внешней поверхности коаксиального кабеля и в конечном счете достигнут главной заземленной плоскости через внешнюю поверхность другого коаксиального выхода или через держатели кристаллов; чтобы этого не произошло, вводится плоский радиальный дроссель.

Подробнее это описано в работе [169].

6. НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ

В литературе описаны три основных типа направленных ответвителей. Первый тип [151, 154] показан на фиг. 10.11, *a*. Два полосковых проводника проходят рядом. Необходимая связь осуществляется через краевое поле. Преимуществом этой системы является ее простота, однако она имеет и ряд недостатков. Во-первых, трудно получить сильную связь; для этого необходимо, чтобы проводники располагались очень близко (например, на расстоянии менее 0,5 мм) или чтобы участок связи был очень длинным (например, несколько длин волн). Во-вторых, вполне очевидно, что участок связи может войти в резонанс с колебаниями симметричной двухполосковой линии. В связи с этим возникают ошибочные изменения направленности, которые получаются также в волноводах при непосредственной связи с помощью длинных щелей. Был найден метод для преодоления и этого недостатка. Однако осталось в силе третье, наиболее серьезное возражение: управлять связью каким-либо определенным способом очень трудно.

Второй тип ответвителя, показанный на фиг. 10.11, б, известен под названием «ответвитель с разветвленным плечом»



Фиг. 10.11. Различные виды направленных ответвителей (для несимметричных полосковых линий).

a — параллельнолинейный ответвитель; *б* — ответвитель с разветвленным плечом; *в* — ответвитель, сложенный обратными сторонами, со связью через щели.

1 — поперечные щели в общей заземленной пластине; 2 — общая заземленная пластина; 3 — поперечная щель; 4 — полосковой проводник № 1; 5 — полосковой проводник № 2.

плечом» [152]. Эта разновидность имеет определенные преимущества перед ответвителем из параллельных

линий. Однако в тех случаях, когда требуется высокая степень направленности в широкой полосе, число ветвей становится слишком большим (т. е. более 3) и импеданс внешних плеч больше того значения, которое можно легко реализовать в такой или подобной ей конструкции (т. е. более 150 ом).

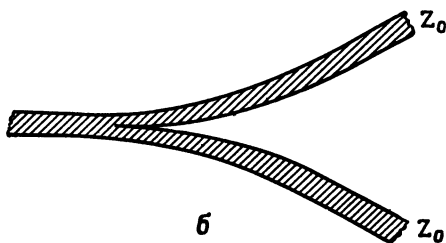
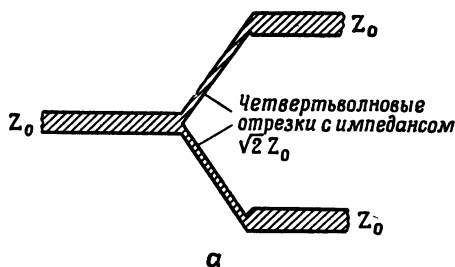
С целью устранения различных недостатков первых двух конструкций был разработан направленный ответвитель, состоящий из двух несимметричных полосковых линий передачи, смонтированных оборотными сторонами друг к другу и связанных с помощью щелей, расположенных в общей заземленной плоскости. Этот тип ответвителя показан на фиг. 10.11, в. Соответствующим подбором размера, расположения и числа связывающих отверстий можно варьировать степень связи. Кроме того, в зависимости от формы отверстия можно получить либо прямую, либо обратную направленность. И, наконец, изменяя фазовую скорость одной из двух линий, можно настолько расширить полосу частот ответвителя, что он обеспечит практически постоянную связь на ширине полосы порядка 1,6 : 1. Конструкция таких ответвителей рассмотрена подробно в работе [170], где приведены также важные данные о коэффициентах связи изолированных щелей.

7. СХЕМЫ ДЕЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Большие возможности обещает использование полосковых линий передачи в конструкциях схем деления мощности, где от одного входа ответвляются несколько выходов. Обычно такие схемы собираются в форме разветвлений на базе одного из простых двухканальных делителей, показанных на фиг. 10.12. В первом делителе согласование достигается при помощи четвертьволновых трансформаторов, во втором для этого используется постепенный переход. Качество конструкции последнего зависит от правильности учета краевого поля в точке деления. Этот вопрос кратко рассмотрен в работе [169].

Некоторые интересные примеры использования многоканальных делителей мощности в конструкциях сан-

тиметровых антенн приведены в работах [151] и [160]. Речь идет об антеннах, в состав которых входит большое число излучающих элементов, каждый из которых должен питаться равным количеством синфазной мощности. При условии, что все ответвления выполнены так,



Ф и г. 10.12. Двухканальные делители мощности.

а — с четвертьволновыми трансформаторами; б — с постепенным переходом.

что имеют равную длину, можно получить остронаправленную антенну с очень широкой полосой частот

8. ФИЛЬТРЫ

Принципиальной технической разницы между фильтрами с использованием полосковых линий и фильтрами с линиями передачи других типов не существует. Однако, для того чтобы можно было максимально исполь-

зовать все преимущества техники печатных схем, необходимо, чтобы все элементы схемы имели плоскую форму. Само по себе это требование не вызывает затруднений, так как имеется достаточный выбор таких элементов. Но с другой стороны, проектировщик может оперировать в этом случае лишь двумя размерами, поэтому диапазон возможных электрических величин часто оказывается ограниченным. В качестве примера можно привести уже описанный вариант использования последовательного конденсатора на широкополосном держателе с кристаллом. Аналогичные трудности возникают и при использовании параллельных конденсаторов, так как размеры полоскового проводника часто достигают недопустимо больших долей длины волны. В этом случае можно, конечно, прибегнуть к местному уменьшению расстояния от заземленной плоскости, однако механические осложнения такого рода нежелательны.

Эти трудности становятся особенно заметными при проектировании фильтров с секциями постоянных k или m . Здесь для получения требуемой точной предельной частоты необходима весьма длительная экспериментальная настройка. Кроме того, часто оказывается невозможным устранить побочное пропускание на достаточно большой ширине полосы. Но несмотря на эти трудности, ясно, что в тех случаях, когда требования эксплуатации не слишком строгие, применение плоских фильтров дает значительные преимущества [149, 151, 152, 155, 161].

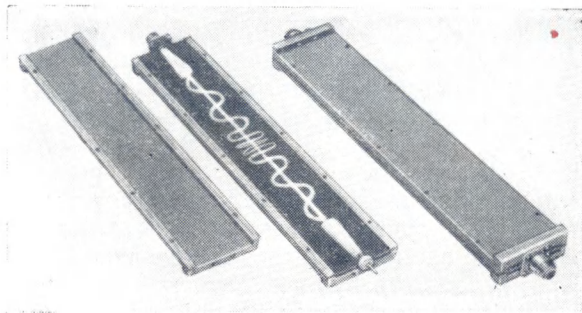
Еще одним важным моментом является добротность элементов. С этой точки зрения высокодобротные трехпластинчатые линии определенно превосходят линии другого типа. Во-первых, они имеют значительно меньшие потери на рассеяние, а во-вторых, в этом случае легче ограничить потери от излучения или от преобразования вида волн. (Важно при этом, чтобы все неоднородности были симметричны по отношению к полосковому проводнику.) Это не исключает, однако, возможности получения удовлетворительных фильтров из несимметричных полосковых линий. В случае фильтров нижних частот высокая добротность элементов не

обязательна, поэтому достаточно иметь необходимый подбор соответствующих элементов, у которых отсутствовала бы сколько-нибудь заметная тенденция к излучению. Так, например, для заграждающих полосовых фильтров было найдено, что данная проблема может быть разрешена путем изготовления элементов в виде закрытых резонаторов, которые затем соответствующим образом присоединяются к несимметричной полосковой линии.

В процессе исследования путей преодоления различных недостатков и одновременно наилучшего использования характерных свойств печатных полосковых линий передачи было рассмотрено несколько новых типов фильтров [163, 164, 168, 171, 172]. Эти фильтры имеют ряд общих черт. Прежде всего в них используются сравнительно большие отрезки линий, которые можно рассматривать, скорее, как линии передачи, а не как приближение к элементу с сосредоточенными параметрами. Кроме того, требуемые свойства схемы достигаются посредством сосредоточенной или распределенной связи между параллельными участками линии передачи. В некоторых случаях интерференция принимает форму распределенной связи и фильтр становится похожим на направленный ответвитель, изображенный на фиг. 10.11, *a*. По другому методу звено фильтра составляется из двух участков линии передачи неравной длины, соединенных с обоих концов. Звенья такого вида были впервые описаны Элфордом в связи с вопросом о согласовании воздушных фидеров¹⁾; впоследствии эта техника была доработана и дополнена автором [171]. На фиг. 10.13 показан 15-звенный фильтр нижних частот, все звенья которого обладают одной и той же предельной частотой, но различными характеристиками затухания в полосе заграждаемых частот. Некоторые типичные результаты, полученные с таким фильтром, показаны на фиг. 10.14. Крутизна подъема кривой в предельной точке чрезвычайно велика —

¹⁾ Alford A., «Transmission Line Networks», *Electrical Communication*, 17, № 3, 301 (January 1939).

приблизительно 50 дБ на 100 МГц. При частоте 8600 МГц наблюдается небольшое падение затухания до 28 дБ, но на всех остальных частотах, вплоть до максимальной измеренной частоты 12 000 МГц, затухание выше 30 дБ. Отличительной особенностью таких фильтров является, как это видно из фиг. 10.14, высокая воспроизводимость в полосе пропускания; разброс для четырех



Ф и г. 10.13. Многозвенный фильтр нижних частот.

идентичных фильтров меньше 0,5 дБ вплоть до предельной точки. Для достижения этой высокой воспроизводимости не применяли никакой специальной техники, кроме точной подгонки кожуха фильтра и использования комплекта специальных деревянных шпилек для обеспечения точной приводки отрисков на двух сторонах пластинки из стекловолокна.

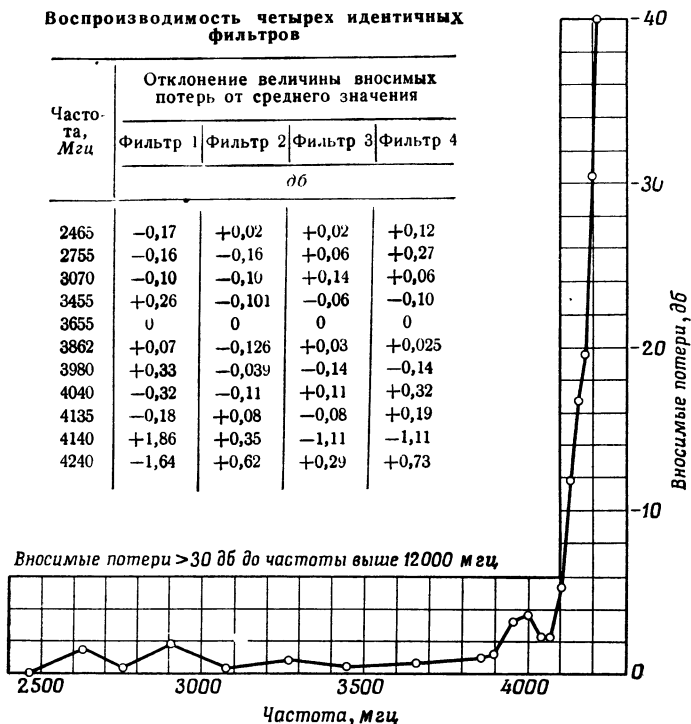
Следует отметить, что в приведенном примере была применена высокочастотная трехпластинчатая форма конструкции. Фильтры такого типа, сконструированные в виде несимметричной полосковой линии, давали такую же высокую крутизну подъема при предельной частоте и такие же эквивалентные характеристики вносимого затухания в полосе пропускания. Однако экранирование фильтров из несимметричных полосковых линий сопровождается большими трудностями из-за склонности к возбуждению на собственной резонансной

частоте экранирующего кожуха, нарушающего частотную характеристику фильтра.

Нам не удастся здесь рассмотреть достаточно полно теоретические принципы проектирования этих фильтров.

Воспроизводимость четырех идентичных фильтров

Частота, Мгц	Отклонение величины вносимых потерь от среднего значения			
	Фильтр 1	Фильтр 2	Фильтр 3	Фильтр 4
	<i>дб</i>			
2465	-0,17	+0,02	+0,02	+0,12
2755	-0,16	-0,16	+0,06	+0,27
3070	-0,10	-0,10	+0,14	+0,06
3455	+0,26	-0,101	-0,06	-0,10
3655	0	0	0	0
3862	+0,07	-0,126	+0,03	+0,025
3980	+0,33	-0,039	-0,14	-0,14
4040	-0,32	-0,11	+0,11	+0,32
4135	-0,18	+0,08	-0,08	+0,19
4140	+1,86	+0,35	-1,11	-1,11
4240	-1,64	+0,62	+0,29	+0,73



Фиг. 10.14. Результаты измерений, полученные для фильтра, изображенного на фиг. 10.13.

Стоит отметить, однако, что, несмотря на некоторую сложность теории таких фильтров, их техническое исполнение весьма простое. Так, измеренная предельная частота первой модели отличалась от теоретической не более чем на 1%, и, следовательно, никакой повторной регулировки не требовалось. Основным недостатком

этих фильтров является то, что общая длина на каждый децибелл затухания больше, чем у обычных k -фильтров.

Были изготовлены также фильтры такого типа с более высокими предельными частотами в диапазоне 7000—8000 Мгц; они работали не менее удовлетворительно.

9. ФЕРРИТОВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Такой изолятор представляет собой устройство, которое распространяет электромагнитную энергию лишь в одном направлении. Этот эффект достигается путем помещения куска гирромагнитного материала (соответствующего феррита) в тот участок волновода, где поле поляризовано по кругу. Создают магнитное поле постоянного тока; величину его регулируют в соответствии с частотой высокочастотного сигнала, тогда полярность определяет направление передачи без потерь. Изолятор может быть использован для поглощения отражений от несогласованной нагрузки, а также в качестве переключателя или модулятора¹⁾.

В полосковой линии передачи, осуществляющей в основном передачу волн типа ТЕМ, нет, естественно, области, в которой существовало бы поле с поляризацией по кругу. Этим она отличается, например, от прямоугольного волновода, у которого обычно такие области существуют.

В литературе описано несколько способов создания таких областей [165—166]; обращает на себя внимание описанный ниже очень простой и изящный метод Левина.

Если к главному полосковому проводнику присоединить под прямым углом шлейф длиной L (фиг. 10.15), то в нем возникает ток с амплитудой, например, I_1 . Если напряжение в точке ответвления равно V , то пе-

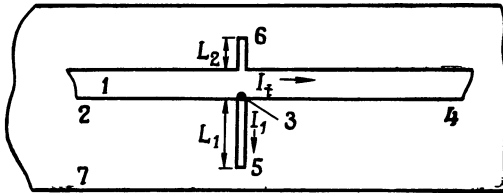
¹⁾ Более подробное описание теории и практики применения таких устройств читатель может найти в работе «Convention on Ferrites», *Proc. IEE*, 104, Pt. B, № 6 (1957).

редаваемый ток I_t в главной полосе и ток I_1 в шлейфе определяются следующим образом:

$$I_t = VY_0,$$

$$I_1 = VjY'_0 \operatorname{tg} k' L_1,$$

где Y_0 — характеристическая комплексная проводимость главной полосы; Y'_0 — характеристическая комплексная



Ф и г. 10.15. Изолятор в форме несимметричной полосковой линии.

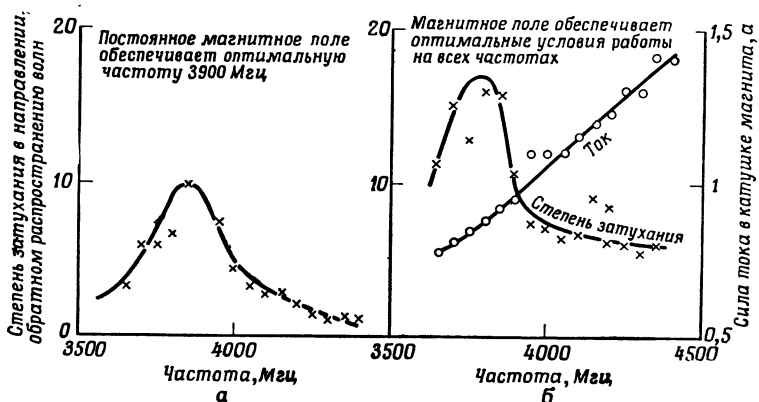
Схема помещена между полюсами подковообразного постоянного магнита. 1 — главная полоса; 2 — генератор; 3 — феррит; 4 — нагрузка; 5 — главный шлейф; 6 — согласующий шлейф; 7 — заземленная пластина.

проводимость бокового шлейфа; $k' = 2\pi/\lambda_g$; λ_g — длина волны в боковом шлейфе.

Если мы выберем $Y'_0 \operatorname{tg} k' L_1 = Y_0$, то ток в шлейфе будет равен передаваемому со сдвигом фазы в 90° . Следовательно, можно ожидать, что непосредственно рядом с точкой ответвления возникнет область, в которой магнитное поле в основном поляризовано по кругу и в которую следует поместить небольшую ферритовую вставку. Но недостатком описанного устройства является несогласованность, возникающая вследствие реактивной проводимости бокового шлейфа. Поэтому вводится еще один шлейф длиной L_2 (разность между L_1 и L_2 равна $\lambda_g/4$), расположенный на противоположной стороне главной полосы. Этот шлейф обеспечивает компенсирующее реактивное сопротивление, которое согласовывает устройство в средней полосе.

Было изготовлено несколько экспериментальных изоляторов, в которых использовался небольшой кусочек никелевоцинкового феррита диаметром около 1 мм. Бы-

ло найдено, что точность установки феррита не критична. Наилучшие результаты были получены с боковыми шлейфами длиной $\lambda_g/8$ и $3\lambda_g/8$, импедансы которых были несколько больше, чем у главной линии передачи. На фиг. 10.16, а показана типичная частотная характеристика для степени затухания в направлении, обратном распространению волны. Выбор величины магнитного поля соответствовал оптимальным условиям схемы



Фиг. 10.16. Частотная характеристика изолятора, показанного фиг. 10.15.

а — оптимальная работа на частоте 3900 МГц, достигаемая за счет магнитного поля;
б — оптимальная работа на всех частотах за счет подбора соответствующего магнитного поля.

при частоте 3900 МГц. Если варьировать магнитное поле для обеспечения оптимума на каждой частоте в отдельности, то получается график с максимумом при 3800 МГц, который показан на фиг. 10.16, б. Вид графика определяется влиянием собственной частотной характеристики бокового шлейфа и возникающих в схеме рассогласований. Таким образом, затухание в обратном направлении не менее 6 дБ, тогда как в прямом — оно примерно равно 0,3 дБ. Конечно, можно добиться увеличения затухания путем последовательного каскадного включения нескольких аналогичных секций.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

На предприятии, изготавлиющем печатные схемы, обычно проводится определенный цикл испытаний, цель которых заключается в обеспечении соответствующего качества готового изделия и снижении экономических потерь на брак. Эти испытания можно разделить на три вида:

- 1) контроль поступающего сырья (например, слоистых материалов с медным покрытием);
- 2) технологический контроль на промежуточных стадиях изготовления;
- 3) функциональные испытания и визуальный контроль готовых изделий.

Первые два вида контроля обычно проводятся выборочно, но подкрепляются весьма тщательным визуальным контролем. В отличие от этого функциональным испытаниям почти всегда подвергают все готовые изделия. Кроме обеспечения обязательных общепринятых требований производства, изготовитель должен проводить и другие программы испытаний. Необходимость новых испытаний может возникнуть в результате создания нового оборудования, внедрения новых материалов или изменения технологического процесса.

Вполне очевидно, что технологический контроль в каждом отдельном случае носит особый характер, поэтому его можно рассматривать только применительно к конкретному процессу. Но с другой стороны, контроль материалов и испытания готовых изделий касаются, по-

мимо изготовителя и поставщика сырья, и будущего покупателя. В связи с этим необходимы два вида технических условий. Условия первой группы, согласуемые между изготовителем и его поставщиками, определяют качество материалов. Условия второй группы согласуются с покупателем и определяют качество и рабочие характеристики готового изделия. Вся радиопромышленность в целом заинтересована в том, чтобы эти условия были максимально стандартизированы. Вытекающее отсюда сокращение ряда требований способствует повышению рентабельности производства.

Ряд авторитетных учреждений уже выпустил или подготовил к выпуску технические условия на печатные схемы, которые можно разбить на следующие виды:

- 1) технические условия на основное сырье;
- 2) технические условия на сложные или специальные материалы для печатных схем (например, слоистые материалы с медным покрытием);
- 3) технические условия, стандартизирующие размеры и качество печатных монтажных схем и методы монтажа отдельных деталей на изоляционном основании;
- 4) технические условия, относящиеся к электронному оборудованию вообще (например, испытания на воздействие климатических условий и окружающей среды).

Основное содержание таких технических условий составляет описание различных испытаний и сведения о допустимых отклонениях. В большинстве случаев требуется также, чтобы в технических условиях были описаны методика проведения испытаний и необходимые для этого приборы. Так как эти технические условия можно без всякого труда получить у соответствующих организаций, было бы излишним подробно излагать их содержание. Ведь один только вопрос испытания материалов требует для своего разбора отдельной книги. Поэтому мы ограничимся лишь перечнем соответствующих технических условий с краткими комментариями относительно их целей и применения.

1. ОРГАНИЗАЦИИ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ (ТУ)

В Великобритании технические условия на промышленное и потребительское использование печатных схем разработаны следующими организациями:

Британское Управление стандартизации: British Standards House, 2 Park Street, Lnd., W. 1 (индекс BS).

Совет радиопромышленности: 21 Tothill Street, Lnd., S.W.1. (индекс RIC).

Федерация фабрикантов радиодеталей и ламп (The Radio Industry Council), 21 Tothill Street, Lnd., S.W.1.

Технические условия для Британской армии, флота и военной авиации выпускает Комитет стандартизации радиодеталей: Министерство авиации (бывш. Министерство снабжения), 77/91 New Oxford Street, Lnd., W.C.1 (RCS — для стандартов и RCG — для руководств).

Некоторые из военных технических условий перепечатаны в виде «Технических условий» (или «Руководств») Her Majesty's Stationery Office, Your House, Kingsway, Lnd., W.C.2 (индекс DEF или DG).

Международные технические условия выпущены Международной электротехнической комиссией: Central Office, 39, Ronte de Malangon, Geneva (индекс IEC). Их можно получить также в Британском управлении стандартизации.

Американские организации также выпустили технические условия, которые за отсутствием эквивалентных британским ТУ иногда использовались британскими фирмами в качестве основания при заключении договоров.

Национальная ассоциация электротехнических промышленников: 155 East 44th Street, N.Y. 17, N.Y.

Американская ассоциация по стандартам: Grand Central Terminal Building, 70 East 45th Street, N.Y. 17, N.Y.

Американское общество по испытанию материалов: 1916 Race Street, Philadelphia 3, Pennsylvania.

Ассоциация электронной промышленности (до не-

давнего времени известная под названием Ассоциация фабрикантов радио-, электронного и телевизионного оборудования): 11 West 42nd Street, N.Y. 36, N.Y.

Военные технические условия США имеют индекс либо JAN (Joint Army Navy), либо MIL (Military), за которым следует буква, обозначающая класс (например, для органических пластиков — P), и номер шифра.

2 ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА СЫРЬЕ

Наиболее полные технические условия на слоистые термозакрепляющиеся материалы изданы Американским обществом по испытанию материалов под обозначением D709-55T. Здесь приводится описание как характера испытаний, так и допусков для большого числа различных слоистых материалов, включая стекловолокно. Классификация идет под обозначением NEMA (см. разд. 1), и даются ссылки на соответствующие технические условия MIL — P. Эти технические условия охватывают:

Виды, сорта и формы.

Материал, обработку, отделку и цвет.

Механические свойства.

Допуски на размерную деформацию (включая коробление).

Свойства при пробивании отверстий.

Электрические свойства (например, диэлектрическая постоянная, коэффициент потерь в диэлектрике, сопротивление изоляции, электрическая прочность и дугостойкость).

Впитывание воды (погружение на 24 часа при 23° С).

Более подробное описание электрических испытаний дано в дополнительных технических условиях: D149-55T, D150-54T, D229-49, D257-54T, D495-48T, D570-54T, D618-54 и D669-42T.

В Великобритании таких полных технических условий не имеется. Были выпущены отдельные ТУ, но в них до сих пор не включены стекловолокнистые материалы. Ниже приводится перечень британских технических условий, который был расширен в результате вклю-

чения керамики и других термопластичных материалов.

BS 972 (1941). Листовой материал со связующим на тканевой основе из синтетических смол для случаев, где имеют важное значение электрические и механические свойства (электрические свойства определяются стандартом BS 2966).

BS 1137 (1949). Бумажные листовые материалы со связующим из синтетических смол для использования на промышленных частотах.

BS 1432 (1953). Медь для электрических целей. Листовая и ленточная.

BS 1493 (1948). Полистирольные профильные материалы.

BS 1540 (1949). Профильные электроизоляционные материалы для использования на радиочастотах.

BS 1958 (1949). Керамические материалы для теле-связи и смежных целей.

BS 2076 (1954). Изоляционный листовой материал из бумаги со связующим из термозакрепляющейся синтетической смолы для использования на радиочастотах.

BS 2572 (1955). Фенольный слоистый листовой материал.

BS 2689 (1956). Рекомендуемые методы оценки влияния вредных веществ, содержащихся в волокнистых электроизоляционных материалах.

BS 2757 (1956). Классификация изоляционных материалов для электрооборудования и приборов по принципу их термической стабильности в процессе эксплуатации.

BS 2782 (часть I — 1956, часть II — 1957). Методы испытания пластиков.

BS 2844 (1957). Памятная записка о стандартных условиях, в которых проводятся испытания и предварительная подготовка электроизоляционных материалов.

BS 2966 (1958). Листовой материал на тканевой основе со связующим из фенольных смол.

RIC/1000/A. Выбор материалов для радио- и электронного оборудования и относящихся к нему деталей.

Британские и американские технические условия во многом различны, в особенности по технике электрических измерений.

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА СЛОИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

К моменту написания данной книги был издан, как нам кажется, только один вариант таких технических условий. Это — технические условия NEMA (Национальная ассоциация владельцев электротехнических предприятий) на слоистый материал с медным покрытием ХХХР, вырабатываемый в течение нескольких последних лет. Эти технические условия включают в себя следующие пункты.

Обработка и отделка.

Сорт фольги, толщина, чистота и отсутствие мелких отверстий.

Допуски на размерную устойчивость (включая коробление).

Сцепление медной фольги.

Теплостойкость при испытании в печи.

Теплостойкость при испытании расплавленным припоем.

Потери в диэлектрике и сопротивление изоляции.

Аналогичные, но более полные технические условия рассматривались в течение некоторого времени RESMF — Федерацией фабрикантов радиодеталей и ламп, — но ко времени написания этой книги они еще не были изданы.

Как в Европе, так и в Америке широко обсуждался вопрос о том, достаточны ли объем и строгость испытаний, установленных техническими условиями NEMA.

Наибольшие возражения вызывает тот факт, что испытания на прочность сцепления (изоляционных пропиток), на сопротивление изоляции и на потери в диэлектрике проводятся на материалах только в том состоянии, в каком они получены. Однако в связи с плохой тепло- и влагостойкостью некоторых материалов считают, что эти испытания следует повторять после ответствующего кондиционирования материала.

При измерении прочности сцепления это кондиционирование может состоять в погружении испытуемого материала на несколько секунд в пальмовое масло при температуре 240°; таким образом имитируется погружение в ванну с припоем. Испытания электрических свойств следует повторять на образцах, предварительно подвергнутых ускоренному испытанию во влажной и горячей атмосфере, как это утверждено стандартом BS 2011. Кроме того, некоторые фирмы предпочитают несколько иную методику испытаний, особенно для оценки прочности сцепления. Считают также, что нижний предел прочности сцепления, составляющий по техническим условиям NEMA 0,5 кг на 1 см ширины, слишком мал и должен быть увеличен, например, до 1 кг/см. Серьезные возражения вызвали также испытания в ванне с припоем. Практически пайка погружением требует более высоких температур, чем указано в технических условиях NEMA (200° С). И помимо всего прочего, сама методика испытаний не свободна от недостатков, так как часто получаются несогласующиеся результаты. Подробно с этими интересными материалами обсуждения различных пунктов технических условий можно ознакомиться в работах [38, 93, 97, 104], особенно в последней.

Надеются, что технические условия RECMF позволяют разрешить многие из этих трудностей и получить таким образом ТУ, пригодные для применения в гражданском и, возможно, военном производстве, а также и для чисто потребительских целей. Если эти технические условия оправдают себя в промышленности, они, возможно, будут утверждены в качестве Британского стандарта.

Еще большие трудности, чем в случае со слоистым материалом с медным покрытием ХХХР, возникают при стандартизации других материалов. В Великобритании делались попытки составить технические условия на слоистые материалы из стекловолокна, покрытого медью, но они не представляют особого интереса.

4 ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ

Недавно был выпущен Британский стандарт BS 3081 «Основные размеры для печатного монтажа». В него включены следующие пункты: ширина проводников, расстояние от плоскости заземления, толщина оснований и фольги, размер отверстий, основные модули и монтирование деталей. Существуют также аналогичные технические условия IEC 97 «Рекомендации по основным параметрам печатного монтажа».

Имеется и еще один ценный документ: DG5007 «Практическое руководство по применению печатного монтажа в электротехнике». Это значительно более специфический материал, охватывающий дополнительные вопросы: материалы, предельные напряжения, максимальные температуры проводников, расстояние между отверстиями, влияние вибраций и ударов, размер оснований, монтаж на основании, уход за изоляцией, маркировку и ремонт.

Подобные технические условия существуют в военной промышленности США: MIL-STD 275 (Ships) «Печатный монтаж для электронного оборудования».

5. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В ЦЕЛОМ

Существуют технические условия на электронное оборудование в целом, которыми можно пользоваться и при работе с печатными схемами.

RIC/1000/B. «Выбор отделки для радио- и прочего электронного оборудования и его различных деталей».

RCS 11. Технические условия на испытания деталей служебного электронного оборудования на климатическую устойчивость и долговечность.

DEF 5011. Испытания деталей служебного электронного оборудования на климатическую устойчивость и долговечность (вместо RCS 11).

RCS 1000. Общие требования к служебному электронному оборудованию.

DEF 5000. Общие требования к служебному оборудованию для телесвязи (вместо RCS 1000, вып. 3).

**Классификация деталей по влаго- и теплостойкости
Британского управления стандартизации BS 2011 (1954)**

Температура		Влажность					
категория	интервал температур окружающей среды, С°	класс	условия				
			1-я группа	2-я группа			
40/100 40/85 40/70	от —40 до +100 от —40 до +85 от —40 до +70	Н1	6 ускоренных циклов увлажнения горячим паром (16 час при 55° и относительной влажности 95%)	84 дня в тропических условиях (циклическое изменение от 20 до 35°, относительная влажность 95%)			
25/70	от —25 до +70				Н2	2 ускоренных цикла увлажнения горячим паром	28 дней в тропических условиях
25/55 25/40	от —25 до +55 от —25 до +40						
		Н3А	—	7 дней в тропических условиях			

Рекомендуемые сочетания

Службное и прочие назначения		Для профессиональных, коммерческих и бытовых целей	
40/100	Н1, Н2 и Н3	25/70	Н1 и Н2
40/85	Н1, Н2 и Н3	25/55	Н3А
40/70	Н1, Н2 и Н3	25/40	Н3А

BS 2011 (1954). Основные испытания на климатическую устойчивость и на долговечность деталей для радио- и смежного электронного оборудования.

IEC 68. Основная технология испытаний деталей для радиосвязи на климатическую и механическую прочность.

Из перечисленных выше документов чаще всего используется, вероятно, стандарт BS 2011. Здесь описаны методы испытаний, основанные на циклических изменениях температуры и влажности, что позволяет эффективно классифицировать по сортам различные материалы и детали. Эта классификация производится по двум показателям: по категории температуры и по классу влажности. Подробно эта классификация приведена в таблице.

В заключение можно отметить, что эти различные организации выпустили ряд технических условий на отдельные детали, например на постоянные конденсаторы, цоколи ламп, ламповые панели, сопротивления, припои и т. д. Хорошо знать все эти технические условия очень важно по многим причинам. Так, например, изделие, предназначавшееся вначале для промышленных целей, может быть впоследствии затребовано для армии. Если все материалы, детали, размеры и отделки будут всегда находиться в соответствии с военными техническими условиями, можно будет избежать расходов на изменение конструкции.

НЕКОТОРЫЕ РАННИЕ ПАТЕНТЫ ПО ПЕЧАТНЫМ СХЕМАМ

Вполне возможно, что изучение патентов может дать больше сведений о технике печатных схем, чем чтение технических журналов. Но, с другой стороны, журналы позволяют с большим успехом следить за прогрессом техники, так как слишком часто патенты являются отражением возможностей самого изобретателя, а не предмета изобретения. В историческом обзоре в начале первой главы были даны ссылки на ряд ранних патентов, ниже приводятся некоторые из них. Эти патенты выбраны независимо от их значимости, перечень их отнюдь не является исчерпывающим и даже показательным.

Британский патент № 4681 (1903) (Хансен)

Описываются резиновые кабели; отмечается, что проводники могут быть получены путем электролитического или механического осаждения.

Британский патент № 14699 (1913) (Берри)

Зигзагообразный электронагревательный элемент изготавливается путем покрытия металлической фольги изоляционным материалом по зигзагообразной линии и последующего травления незащищенных участков.

Британский патент № 267172 (1926) («Парагон Раббер Мэньюфекчуринг К°»)

Соединения схемы на изоляционном основании выполняются путем: а) тиснения металлической фольгой; б) заливки канавок низкоплавким металлом; в) распыления металла; г) электролитического осаждения с применением трафаретов.

Американский патент № 1647474 (1927) (Сеймур)

Емкостные и индуктивные элементы схемы изготавливаются методом электролитического осаждения.

Британский патент № 327356 (Литлдейл)

Воздушные провода, катушки и трансформаторы получают травлением из листового металла, которые затем монтируют на изоляционном основании.

Британский патент № 331991 (1930) (Лекер)

Лист металла укрепляют на изоляционном основании, монтаж выполняют путем механического удаления участков металла.

Приведенный перечень патентов показывает, что основные положения о печатных электрических схемах были сформулированы еще в начале тридцатых годов. В течение последних десяти лет было сделано много заявок на различные патенты, а после войны их число неизмеримо возросло. Полезные сведения о патентах, заявленных ранее 1946 г., имеются в работах [1] и [5], а список американских патентов по 1956 г. включительно можно найти в журнале *Electronics Industries and Tele-Tech*, p. 66 (March 1957).

БИБЛИОГРАФИЯ¹⁾

Статьи по печатным схемам общего характера

1. Sargrove J. A., «New Methods of Radio Production», *Brit. IRE*, 7, № 1, 2 (1947).
- 2 «Stamped Wiring», *Electronics*, 20, № 6, 82 (1947).
3. Brewster F. R., «British-Metal Spray Circuits», *Electronics*, 20, № 7, 158 (1947).
- 4 Brunetti C., Curtis R. W., Printed Circuit Techniques, NBS, Circ. № 468, November 1947.
5. New Advances in Printed Circuits. Proc. of the First Technical Symposium on Printed Circuits, October 1947; NBS, Miscellaneous Publ. № 192, November 1948.
6. Barney K. H., Machlin S., «Printed Circuits Used in Development Models», *Electronics*, 25, № 4, 106 (1952).
7. Danko S. F., Gerhold R. A., «Printed Circuitry for Transistors», *Proc. IRE*, 40, № 11, 1524 (1952).
- 8 Eisler P., «Printed Circuits and Miniaturization», *Electron. Engng.*, 25, № 6, 234 (1953).
- 9 Dummer G. W. A., Johnston D. L., «Printed and Potted Electronic Circuits», *Proc. IEE*, Pt. III, 100, 177 (1953).
10. Dummer G. W. A., Johnston D. L., «New Constructional Techniques», *Electron. Engng.*, 25, № 10, 417 (1953); № 11, 456 (1953).
- 11 Eisler P., «Printed Circuits: Some General Principles and Applications of the Technique», *J. Brit. IRE*, 13, № 11, 523 (1953).
12. Henry R. L., Rayburn C. C., «Mechanized Production of Electronic Equipment», *Electronics*, 26, № 12, 160 (1953).

¹⁾ Данная библиография содержит 173 названия, но не претендует на полноту. Она включает только те статьи и работы, в которых описывается что-либо новое, касающееся данной темы, и которые сравнительно легко можно достать в Англии. Для ознакомления с полной библиографией по этому вопросу автор советует обратиться к работе [37] данной библиографии, под которой указан материал, являющийся по существу отредактированной библиографией, составленной К. Буртон и впервые опубликованной в 1956 г. «Телевижн сосайти» в Лондоне.

13. Henesian A., Remington R. W., «Simplifying Fabrication of Printed Circuits», *Electr. Mfg.*, 122 (February 1954).
14. Nichol A. V., Consideration of Conversion of an AC-DC Receiver to Printed Circuit Design, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 8, 1955.
15. Eisler P., Current Status and Recent Progress of Printed Circuits in England, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 13, 1955.
16. Roman R. J., A Subminiature Printed Circuit System (Design Phase). Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 23, 1955.
17. Maynard A. F., Production Design of an Airborn Indicator Unit Using Printed Wiring, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 29, 1955.
18. Hughes A. R., Review of Products Incorporating Printed Circuit Construction, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 32, 1955.
19. Johnson M. R., Printed Wiring—A Challenge to Management, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 57, 1955.
20. Cottle D. W., Status of Printed Circuit Standardization, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 62, 1955.
21. Techniques for Production of Printed Wiring Boards. (Panel Discussion), Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 65, 1955.
22. Khouri A. S., Ceramic Based Printed Circuits. Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 90, 1955.
23. Roman R. J., A Subminiature Printed Circuit System (Production Phase), Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 99, 1955.
24. Blitz D., Three—Dimensional Printed Circuits Construction, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 106, 1955.
25. Heywood J. P., Quality Control of Printed Circuit Manufacturing, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 118, 1955.
26. Swiggett R. L., Introduction to Printed Circuits, N. Y., 1956.
27. Shortt H. L., Eisler P., «Printed Foil Electronic Components», *Tele-Tech*, 14, № 6, 102 (1955)
28. Manfield H. G., «Etched Foil Printed Circuits», *Wireless World*, 61, № 9, 436 (1955).

29. Benzuly H. J., «Printed Deflection Yoke Design», *Tele-Tech*, 14, № 12, 72 (1955).
30. Flack W. I., «Printed Circuits», *Electr. Manufacturer*, 1, № 3, 12 (1956).
31. Heck C. R., «The Flexible Printed Circuit Cable», *Electr. Manufacturer*, 1, № 8, 14 (1957).
32. Darrel B., Szpak S., «Printed Circuits by Electrostatic Methods», *Electr. Manufacturer*, 130 (February 1957).
33. Rajchman J. A., «Ferrite Apertured Plate for Random Access Memory», *Proc. IRE*, 40, № 3, 325 (1957).
34. Guditz E. A., «Three Dimensional Printed Wiring», *Electronics*, 30, № 6, 160 (1957).
35. Proc. of the National Telemetering Conference, 1957.
36. Roberts W. G. F., «Heavy Duty Printed Circuits», *Electr. Manufacturer*, 3, № 4, 8 (1958).
37. Eisler P., Technology of Printed Circuits, Lnd., 1959.
38. Chemical Aspects of Printed Wiring. A Symposium of seven papers published by *Industrial and Engineering Chemistry*, 51, 281, March 1959.
39. Prugh T. A., Nall J. R., Doctor N. J., «The DOFL Microelectronics Programme», *Proc. IRE*, 47, № 5, 882 (1959).
40. Danko S. F., Doxey W. L., McNaul J. P., «The Micro—Module: A Logical Approach to Microminiaturization», *Proc. IRE*, 47, № 5, 894 (1959).
41. Dummer G. W. A., «British Approaches to Microminiaturization», *Electronics*, 71 (January 1, 1960).

Навесные элементы печатных схем

42. Tally S. K., Lalmond H. W., Resistors and Mylar Capacitors for Printed Circuits, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 74, 1955.
43. Pennie D. F., Components for Printed Wiring and Component Packaging for Automated Assembly, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 84, 1955.
44. Goodman G. H., Component Consideration for Printed Wiring in Automation, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 86, 1955.
45. «New Printed Circuits, Component and Equipment», *Tele-Tech*, 14, № 12, 92 (1955)
46. Dummer G. W. A., Fixed Capacitors, Ser. «Radio and Electronic Components», Vol. 3, Lnd., 1956.

47. Sharp L. W. D., «Components for Printed Circuits», *Brit. Commun. a. Electronics*, 202 (April 1957).
48. Dummer G. W. A., «Components for Use with Transistor Techniques», *Brit. Commun. a. Electronics*, 422 (June 1959).

Механизированная сборка и испытания

49. Hannahs W. H., «Automatic Production for Electronics», *Electr. Mfg.*, 116 (July 1954).
50. Lawson A. A., «Mass Production of Electronic Subassemblies», *Electr. Mfg.*, 134 (October 1954).
51. Graham J. J., Problems of Mechanization of Printed Circuits, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 109, 1955.
52. Iles F. B., Standards Required for Automation, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 111, 1955.
53. Ward D. D., Automatic Testing of Printed Assemblies, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., p. 113, 1955.
54. Markus J., «Mechanized Production of Electronic Equipment», *Electronics*, 28, № 9, 137 (1955).
55. Stones A. E., «Low Cost Automatic Assembly System», *Tele-Tech*, 14, № 12, 70 (1955).
56. «Modular Assembly System», *Tele-Tech*, 14, № 12, 75 (1955).
57. McKee K. M., «Automatic Component Assembly for Printed Circuits», *J. IEE*, 2, 515 (September 1956).
58. Dummer G. W. A., «Automation in the Assembly of Electronic Sub—Units», *Brit. Commun. a. Electronics*, 3, № 12, 642 (1956).
59. Begun S. J., Rosenthal F., Krejci R. F., Galati V. J., «Wrapped Electrical Connections Made Automatically», *Electr. Mfg.*, 126 (December 1956).
60. «Electronic Automatic Production Standardization by RETMA», *Electr. Mfg.* (April 1957).
61. Markus J., «Mechanized Production of TV Wiring Boards», *Electronics*, 30, № 4, 138 (1957).
62. Klippel W. H., «Packaging Considerations with Semi-Conductors», *Electr. Mfg.*, 112 (June 1957).
63. Gipps L. H., McKee K. M., «Recent Advances in Automatic Assembly», *Proc. IRE*, 17, № 9, 501 (1957).
64. McKee K. M., «Components, Printed Wiring and Machine Assembly», *Brit. Commun. a. Electronics*, 5, № 9, 728 (1958).
65. Buckelew J. W., Knab E. D., «Through Connections for Printed Wiring», *Bell Lab. Rec.*, 36, № 10, 368 (1958).

66. Proc. Symposium on Automatic Production of Electronic Equipment, Stanford Res. Inst., April 1954.
67. Proc. RETMA Symposium on Automation, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., N. Y., 1955.

Пайка погружением

68. Bang M. W., «Edge Dip Soldering of Printed Circuits», *Tele-Tech*, 14, № 12, 74 (1955).
 69. Strauss R., Barnes A. F. C., «The Flowsolder Method of Soldering Printed Circuits», *Electron. Engng.*, 28, № 345, 494 (November 1956).
 70. Miller E. S., Johns A. A., «Dip Soldering Printed Circuits», *Electr. Mfg.*, 124 (February 1957).
 71. Miller E. S., Johns A. A., «Evaluation of Dip Soldering Joints», *Electr. Mfg.*, 157 (March 1957).
 72. Gates T., «Semi-Automatic Dip Soldering Machine», *Electr. Mfg.*, 147 (August 1957).
 73. Proc of Second RETMA Conference on Reliable Electrical Connections, Engng. Publ., N. Y., 1957.
- См. также работы [23, 54, 61, 97].

Защита

74. Kronstein M., «Know the Chemical Reactions when Specifying Organic Finishes», *Electr. Mfg.*, 98 (November 1954).
 75. Javitz A. E., «Epoxy—Resin System for Embedded Circuits and Components», *Electr. Mfg.*, 74 (April 1955).
 76. Black R. G., «Polyester Casting Resins for Rigid Insulating Parts», *Electr. Mfg.*, 139 (October 1955).
 77. Manfield H. G., «Problems in Casting Electronic Components», *Electr. Mfg.*, 142 (October 1955).
 78. Hannahs W. H., «Protecting and Packaging Electronic Equipment», *Tele-Tech*, 15, № 6, 84; № 7, 58 (1956).
 79. Lewis D. W., «High Temperature Solventless Encapsulating Resins», *Electr. Mfg.*, 141 (March 1957).
 80. Communication and Electronics Buyers' Guide, Who's Who and Reference Book, Heywood, Ltd., 1958.
 81. Manfield H. G., «Recent Advances in Potted and Printed Circuits», *J. Brit IRE*, 19, № 5, 289 (1959).
- См. также работы [9, 10].

Материалы для печатных схем

- 82 Reference Data for Radio Engineers, Federal Telephone and Radio Corp., N. Y., 1949.

83. Chapman J. J., Frisco L. J., «Dielectric Strength of Solid Insulation», *Electr. Mfg.*, 136 (May 1954).
84. Hippel A. R., *Dielectric Materials and Applications*, N. Y., 1954.
85. Place S. W., «Evaluating Properties of Plastic Laminates», *Electr. Mfg.*, 95 (October 1954).
86. Javitz A. E., «Impact of High — Energy Radiation on Dielectrics», *Electr. Mfg.*, 85 (June 1955).
87. Hannahs W. H., «Review of Special Clad Materials for Printed Circuits», Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., 94, 1955; см. также *Tele-Tech*, 14, № 12. 78 (1955).
88. *Electrical Insulation and Dielectrics, An Electrical Manufacturing Design Manual*, Gage Publ. Co., 1250, N. Y., October 1955.
89. Hoynes D. S., «Characteristics of Metal — Clad Laminates», *Electr. Mfg.*, 104 (April 1957).
90. Javitz A. E., «Integration of Dielectric Materials Processes, Components», *Electr. Mfg.*, 90 (July 1957).
91. Allen L. B., McElroy D. E., Stein S. J., «Composite Fluorocarbon Laminates for Printed Wiring», *Electr. Mfg.*, 124 (October 1957).
92. McElroy D. E., Stein S. J., «Direct Bonded Copper — Clad Teflon High Temperature Laminate», *Electr. Mfg.*, 126 (October 1957).

**Влияние климатических условий и окружающей среды:
надежность, испытание материалов**

93. Hannahs W. H., Caffiauz J., Stein N., «Standardization of Printed Circuit Materials», *Tele-Tech*, 13, № 2, 68 (1954).
94. Berberich L. J., «Deteriorating Influences on Dielectric Materials», *Electr. Mfg.*, 103 (July 1954).
95. Goulder M. E., Results of Environmental and Operational Service Tests on MDE Equipment, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television—Manufacturers' Ass., 37, 1955.
96. Staudaher F. M., Results of Military Environmental Tests of Equipment using Printed Wiring, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., 42, 1955.
97. Martin L. F., Mell C. W., Vavra M. J., Factors Determining the Reliability of Electrical Wiring, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., 45, 1955.
98. Yost D. E., Silver Migration in Printed Circuits, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., 53, 1955.

99. Williams J. C., Herrman D. B., «Surface Resistivity of Non-porous Ceramic and Organic Insulating Materials at High Humidity with observations of Associated Silver Migration», *IRE Trans. Profess. Group on Reliability and Quality Control*, № PGRQC-6, 11 (February 1956).
 100. Winans R. R., Fried N., Hand W., «Effects of Water Immersion and Humidity on Thermosetting Laminates», *Electr. Mfg.*, 106 (July 1955).
 101. Chaikin S. W., «Surface Contamination of Dielectrics», *IRE Trans. Profess. Group on Reliability and Quality Control*, № PGRQC-6, 57 (February 1956).
 102. Gascoyne D. N., Reinforced Plastics — Electrical Behaviour in the Tropics; T. T. E. Rep. № 470, Ministry of Supply, June 1956.
 103. Spaulding J., «Investigation of the Effects of Humidity and Temperature», *Proc. Nat. Electron. Confer.*, 13, 673 (1957).
 104. Schlachach T. D., Wright E. E., Broyer A. P., Rider D. K., Testing of Foil Clad Laminates for Printed Circuitry, *ASTM Bull.* № 222, 25—30, May 1957; см. также Bell Telephone System Monograph № 2863.
- См. также работы [9, 23, 38, 83, 85, 87, 89].

Печатные схемы для низких и средних частот

105. Davies B. L., Printed Circuit Techniques: An Adhesive Tape Resistor System, NBS circular № 530, February 1952.
106. Hannahs W. H., Eng J. W., «Production Control of Printed Resistors», *Electronics*, 25, № 10, 106 (1952).
107. Bayha J., «Automatic Production Machine for Close Tolerance Printed Resistors», *Tele-Tech*, 12, № 9, 78 (1953).
108. Swiggett R. L., Printed Circuit Switches and Commutators, Proc. Symposium on Printed Circuits, Radio—Electronics—Television Manufacturers' Ass., 79, 1955.
109. Marty R. S., Davies E. M., Franklin P. J., «A New Injection — Moulding Process for Printed Resistors», *Electr. Mfg.*, 56 (January 1955).
110. Davies E. M., Marty R. S., Franklin P. J., «A New Compression — Molding Process for Printed Capacitors», *Electr. Mfg.*, 100 (February 1955).
111. Bryan H. E., «Printed Inductors and Capacitors», *Tele-Tech*, 14, № 12, 68 (1955).
112. Ruth L., «Etched IF Amplifier Pares Color TV Cost», *Electronics*, 31, № 11, 135 (March 1958).

- 113 Fabricius J. H., Smith A. B., «Design Considerations for Ceramic Printed Circuit Packaging», *IRE WESCON Conv. Rec.*, 1, Pt. 6, 59 (1957).
См. также работы [1, 3, 4, 5, 9, 15, 21, 22, 24, 39, 40].

**Формулы для расчета емкости и индуктивности;
математические таблицы**

114. Peirce B. O., *A Short Table of Integrals*, N. Y., 1899.
115. *Radio Instruments and Measurements*, NBS Circ. № 74, March 1918.
116. Love A. E. H., «Some Electrostatic Distributions in Two Dimensions», *Proc. of the Lond. Math. Soc.*, 22, Ser. 2, 335—369 (1922—1923).
117. Терман F. E., *Radio Engineer's Handbook*, N. Y., 1943.
118. Jahnke E., Emde F., *Tables of Functions*, N. Y., 1945; русский перевод: Янке Э., Эмде Ф., *Таблицы функций, с формулами и кривыми*, перев. с немецкого, изд 2-е, М.—Л., Гостехиздат, 1948.
119. Grover F. W., *Inductance Calculations*, N. Y., 1946.
120. Spenceley G. W.; Spenceley R. M., *Smithsonian Elliptic Function Tables*, Washington, D. C., 1947.
121. Magnus W., Oberhettinger F., *Formulas and Theorems for the Special Functions of Mathematical Physics*, N. Y., 1949.
122. Snow C., *Formulas for Computing Capacitance and Inductance*, NBS Circ., № 544, September 1954.
- См также работу [111].

Полосковые линии передачи

123. Omar Y. A., Miller F. C., «Characteristic Impedance of Rectangular Coaxial Transmission Lines», *Trans. AIEE*, 71, Pt. 1, *Communications and Electronics*, 81 (January 1952).
124. Assadourian F., Rimai E., «Simplified Theory of Microstrip Transmission Systems», *Proc. IRE*, 40, 1651 (December 1952).
125. Sciegieny J., «Strip above Ground Plane Transmission System», *Quart. Progress. Rep. Res. Lab. Electronics MIT*, Pt. X, 53, January 1953.
126. Sciegieny J., Schetzen M., «Strip Transmission Systems and Theoretical Analysis of a Strip Transmission System», *Quart. Progress Rep. Res. Lab. Electronics, MIT*, Pt. XI, 83, April 1953.
127. Deschamps G., «Theoretical Aspects of Microstrip Waveguides», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, № PGMTT-2, 100 (April 1954).

128. Cohn S. B., «Characteristic Impedance of the Shielded Strip Transmission Line», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, № PGM-TT-2, 52 (July 1954).
129. Schetzen M., Printed Microwave Systems, Techn. Rep. 289, Res. Lab. Electronics, MIT, September 1954.
130. Oliner A. A., «Theoretical Developments in Symmetrical Strip Transmission Line», Proc. Symposium on Modern Advances in Microwave Techniques, Polytech. Inst. Brooklyn, 379, November 1954.
131. Ringenbach M. E., Warren Cooper H., «Measurement of Attenuation and Phase Velocity of Various Laminates at L-Band», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 87 (March 1955).
132. Black K. G., Higgins T. J., «Rigorous Determination of the Parameters of Microstrip Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 93 (March 1955).
133. Hayt W. H., «The Mutual and Input Impedance of Dipole Strips between Parallel Planes», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 114 (March 1955).
134. Pease R. L., Mingins C. R., «A Universal Approximate Formula for Characteristic Impedance of Strip Transmission Lines with Inner Conductors», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 144 (March 1955).
135. Park D., «Planar Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, № 3, 8 (April 1955).
136. Hayt W. H., «Potential Solution of a Homogeneous Strip — Line of Finite Width», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT, № 4, 16 (July 1955).
137. Bates R. H. T., «The Characteristic Impedance of the Shielded Slab Line», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-4, № 1, 28 (January 1956).
138. Dukes J. M. C., «An Investigation into Some Fundamental Properties of Strip Transmission Lines with the Aid of an Electrolytic Tank», *Proc. IEE*, Pap. № 1991R, 319 (May 1956 (103B)).
139. Horgan J. D., «Coupled Strip Transmission Lines with Rectangular Inner Conductors», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-5, № 2, 92 (April 1957).
140. Wu T. T., «Theory of the Microstrip», *J. Appl. Phys.*, 28, 299 (1957).
141. Brodwin M. E., «Propagation in Ferrite — Filled Microstrip», *Trans. IRE*, MTT-6, № 2, 150 (1958).

142. Foster K., «The Characteristic Impedance and Phase Velocity of High—Q Triplate Line», *J. Brit. IRE*, 18, № 12, 715 (1958).

Печатные схемы сверхвысокочастотного диапазона

143. Barrett R. M., «Etched Sheets Serve As Microwave Components», *Electronics*, 25, 114 (June 1952).
144. Grieg D. D., Engelmann H. F., «Microstrip—A New Transmission Technique for the Kilomegacycle Range», *Proc. IRE*, 40, № 12, 1644 (December 1952).
145. Kostriza J. A., «Microstrip Components», *Proc. IRE*, 40, № 12, 1658 (1952).
146. «Manufacture of Microstrip», *Electr. Commun.*, 29, № 4, 251 (1952).
147. Arditi M., «Experimental Determination of the Properties of Microstrip Components», *IRE Conv. Rec.*, Pt. 10, Microwaves, 27 (1953).
148. Fubini E., Fromm W., Keen H., «New Technique for High—Q Strip Microwave Components», *IRE Conv. Rec.*, Pt. 8, 91 (1954).
149. Fubini E., Fromm W., Keen H., «Microwave Applications of High—Q Strip Components», *IRE Conv. Rec.*, Pt. 8, 98 (1954).
150. Packard K. S., «Machine Methods Make Strip Transmission Line», *Electronics*, 27, 148 (September 1954).
151. Barrett R. M., «Microwave Printed Circuit—A Historical Survey», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 1 (March 1955).
152. Fromm W. E., «Characteristics and Some Applications of Strip Line Components», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 13 (March 1955).
153. Wild N. R., «Photoetched Microwave Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 21 (March 1955).
154. Arditi M., «Characteristic and Application of Microstrip for Microwave Wiring», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 31 (March 1955).
155. Torgow E. N., Griemsmann J. E., «Miniature Strip Transmission Line for Microwave Applications», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 57 (March 1955).
156. Zublin K. E., «Strip Type Components for 2000 Mc. Receiver Head End», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 57 (March 1955).

157. Cohn S. B., «Problems in Strip Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 119 (March 1955).
158. Oliner A. A., «Equivalent Circuits for Discontinuities in Balanced Strip Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 134 (March 1955).
159. Fubini E. G., «Stripline Radiators», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 149 (March 1955).
160. Sommers D. J., «Slot Array Employing Photoetched Triplate Transmission Lines», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 157 (March 1955).
161. White D. R., Bradley E. H., «Band — Pass Filters Using Stripline Techniques», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-3, 163 (March 1955).
162. Bowness C., «Strip Transmission Lines», *Electron. Engng.*, 28, № 335, 2 (January 1956).
163. Jones E. M. T., Bolljahn J. T., «Coupled Strip Transmission Line Filters and Directional Couplers», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-4, № 2, 75 (April 1956).
164. Bradley E. H., «Design and Development of Strip Line Filters», *IRE Trans. Profess. Group on Microwave Theory and Techniques*, MTT-4, № 2, 86 (April 1956).
165. Fix O. A., «A Balanced Strip — Line Isolator», *IRE Conv. Rec.*, Pt. 5, 99 (1956).
166. Lewin L., «A Resonance Absorption Isolator in Microstrip for 4 Gc/s», *Proc. IEE*, 104B, Suppl. № 6, 364 (1956).
167. Pascalar H. G., «Strip Line Hybrid Junction», *Proc. IEE*, MTT-5, № 1, 23 (1957).
168. Seidel H., «Synthesis of a Class of Microwave Filters», *IRE Trans. Microwave Theory and Techniques*, MTT-5, 107 (April 1957).
169. Dukes J. M. C., «The Application of Printed — Circuit Techniques to the Design of Microwave Components», *Proc. IRE*, (Pap. № 2401R), 105, B, № 20, 155 (March 1958).
170. Dukes J. M. C., «Broad Band Slot — Coupled Directional Couplers», *Proc. IEE* (Pap. № 2402 R), 105, B, № 20, 147 (1958).
171. Dukes J. M. C., «Re — Entrant Transmission Line Filter Using Printed Conductors», *Proc. IEE* (Pap. № 2444 R) 105 B, № 20, 173 (1958).
172. Ozaki H., Ishii J., «Synthesis of a Class of Strip Line Filters», *IRE Trans., Profess. Group on Circuit Theory*, CT-5, № 2, 104—109 (June 1958).
173. Harvey A. F., «Parallel-Plate Transmission Systems for Microwave Frequencies», *Proc. IEE*, (Pap. № 2770 E), 106 B, № 26, 129 (1959).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие автора	11

Глава I

Введение

1. Определение понятия «печатная схема»	17
2. Исторический обзор	18
3. Классификация способов изготовления печатных схем	23
4. Способ трафаретной печати	24
5. Другие способы монтажа	28
6. Некоторые общие замечания по автоматическому производ- ству	33
7. Микроминиатюризация [39—41]	39

Часть I

ПРОИЗВОДСТВО

Глава II

Нанесение металлической цепи непосредственно на поверхность изоляционных материалов

1. Штампование схем [4, 5, 21, 26]	46
2. Окрашивание серебряной краской [4, 5, 22, 26]	48
3. Изготовление схем способом горячей запрессовки порошка [4, 26]	53
4. Напыление жидкого металла [1, 4, 5, 25, 26]	55
5. Вакуумные способы [4, 38—40]	56
6. Изготовление схем электролитическим осаждением металла [4, 26, 38]	57

Глава III

**Избирательное удаление металла с предварительно
металлизированной поверхности**

- | | |
|--|----|
| 1. Механическое гравирование | 63 |
| 2. Способ травления фольги (фиг. 3.2) [37, 38, 97] | 66 |

Глава IV

**Изготовление печатной схемы одновременно с изготовлением
изоляционного основания**

- | | |
|---|----|
| 1. Схемы, отпечатанные серебряной краской и скрепленные со
слоистым основанием в процессе вулканизации | 79 |
| 2. Штампованные схемы [26] | 82 |
| 3. Способ переноса схемы, полученной электролитическим оса-
ждением, на изоляционное основание [26] | 83 |
| 4. Способ переноса двойного слоя фольги [26] | 83 |
| 5. Заполнение металлом пазов в изоляционном основании [1—5] | 84 |

Глава V

**Монтаж элементов схемы, пайка в ванне и окончательная
защита**

- | | |
|--|-----|
| 1. Элементы для печатных схем [43, 47, 54] | 89 |
| 2. Автоматические сборочные машины | 93 |
| 3. Пайка в ванне [23, 54, 61, 68—73, 97] | 103 |
| 3. Защитные покрытия [9, 74, 80] | 108 |

Часть II

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Глава VI

Подготовка оригинала печатной схемы

- | | |
|--|-----|
| 1. Обычный метод вычерчивания печатных схем | 114 |
| 2. Другие методы вычерчивания печатных схем | 116 |
| 3. Разметка схемы | 117 |
| 4. Дополнительные сведения, которые следует включить в чер-
теж | 120 |
| 5. Аппараты и техника фотографирования | 120 |

Глава VII

Материалы для печатных схем

- | | |
|--|-----|
| 1. Керамические материалы [84] | 126 |
| 2. Листовые пластиковые материалы [84] | 132 |
| 3. Слоистые пластики с покрытием из медной фольги и смоляными связующими | 139 |
| 4. Проводящие материалы | 166 |

Глава VIII

Печатные детали для низких и средних частот

- | | |
|---|-----|
| 1. Печатные катушки | 178 |
| 2. Печатные конденсаторы [4, 5, 22, 26, 110, 111] | 194 |
| 3. Печатные переключатели и коммутаторы | 206 |
| 4. Печатные сопротивления общего назначения | 211 |
| 5. Низкоомные сопротивления [22, 37] | 214 |

Глава IX

Полосковые линии передачи

- | | |
|--|-----|
| 1. Введение | 218 |
| 2. Типы полосковых линий передачи | 222 |
| 3. Единицы и размерности | 225 |
| 4. Упрощенная теория полосковых линий передачи | 228 |
| 5. Волновое сопротивление однородных полосковых линий передачи | 231 |
| 6. Волновое сопротивление неоднородных линий | 237 |
| 7. Скорость распространения и фазовая скорость | 239 |
| 8. Затухание и добротность | 239 |
| 9. Переходная связь между соседними полосковыми линиями | 243 |
| 10. Волны высших типов, побочные волны и аномальные явления | 244 |
| 11. Верхний предел частоты | 247 |
| 12. Измерения в полосковых линиях передачи | 248 |

Глава X

Печатные схемы сантиметрового диапазона

- | | |
|--|-----|
| 1. Классификация узлов и их применение | 250 |
| 2. Трансформаторы | 253 |
| 3. Нагрузки и аттенюаторы | 256 |
| 4. Держатели кристаллов | 258 |
| 5. Гибридные узлы | 261 |
| 6. Направленные ответвители | 266 |

7. Схемы делителей мощности	268
8. Фильтры	269
9. Ферритовые изоляторы	274

Приложение 1

Методика испытаний и технические условия

1. Организации, разрабатывающие технические условия (ТУ) . . .	279
2. Технические условия на сырье	280
3. Технические условия на слоистые материалы с медным покрытием	282
4. Технические условия на печатный монтаж	284
5. Технические условия на электрическое оборудование в целом	284

Приложение 2

Некоторые ранние патенты по печатным схемам

Библиография	289
------------------------	-----

Дж. М. Дьюкс

Печатные схемы

Редактор Л. ТРОИЦКАЯ
Художник Л. Ларский
Технический редактор В. Сизова
Корректор И. Цветкова

Сдано в производство 15/XI 1962 г.

Подписано к печати 15/III 1963 г.

Бумага 84×108¹/₃₂ 4,8 бум. л.

15,6 печ. л.

Уч.-изд. л. 13,8. Изд. № 20/1442

Цена 1 р. 12 к. Зак. 850

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Типография № 2 им. Евг. Соколовой
УЦБ и ПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29.

