

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

---

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

(Учебное пособие)

Часть I

Москва-1971



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

---

Барканов Н.А., Ефимов И.Е., Козырь И.Л.,  
Митрофанов О.В., Самохвалов Г.К., Шер Ю.А.

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ

(Учебное пособие)

Часть I

Под редакцией проф. И.Е.Ефимова

Москва-1971

**ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ  
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ  
(Учебное пособие)**

**Редактор Т.Н.Камнева**

---

**Л-44225      Тираж 500      Заказ № I**  
**Подписано к печати 22/II-71 г.    Объем 12,33 уч.изд.л.    Цена 53 коп.**

---

**Редакционно-издательский отдел  
Московского института электронной техники**



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание высоконадежных, малогабаритных и высокопроизводительных радиоэлектронных вычислительных устройств стало возможным благодаря развитию новых методов конструирования микроминиатюрной радиоэлектронной аппаратуры. Из различных направлений микроминиатюризации особенно эффективной оказалась интегральная микроэлектроника, основанная на последних достижениях физики пленок и полупроводников, функционально-узловом методе конструирования и групповой технологии изготовления микросхем. В настоящее время микроэлектроника развивается по трем основным направлениям – пленочные ИС, полупроводниковые ИС и функциональные схемы.

Традиционные принципы и методы проектирования радиоэлектронной аппаратуры оказались непригодными для конструирования микросхем, для изготовления которых появились новые технологические процессы.

Внедрение микросхем в ряд областей техники связано с переподготовкой и обучением большого числа специалистов по микроэлектронике.

В учебных планах некоторых вузов микроэлектроника вылилась в отдельно изучаемую дисциплину. При подготовке инженерных кадров по этой специальности необходимы знания в области физики пленок, конструирования и технологии производства микросхем. Поскольку в настоящее время нет единого литературного источника, где бы полностью были отражены эти вопросы, то данное пособие, явилось попыткой систематизировать материал по некоторым вопросам микроэлектроники.

Пособие состоит из двух частей (7 глав – в первой части, 5 – во второй). Первая часть посвящена рассмотрению функционально-узлового метода конструирования, микроминиатюризации, физическим основам, конструированию и технологии изготовления ИС на основе тонких, толстых и магнитных пленок. Во второй части описаны физические основы полупроводниковой электроники, технологии изготовления и проектирования полупроводниковых ИС, дана общая характеристика метода контроля и испытаний ИС, указаны пути дальнейшего развития микроэлектроники.

Пособие рассчитано на студентов и аспирантов, специализирующихся по микроэлектронике, а также инженеров, работающих в данной области.

При написании пособия использованы материалы, опубликованные в периодической печати, некоторые работы авторов, а также материалы курсов лекций по микроэлектронике, прочитанных авторами в 1968-1970 гг. студентам всех факультетов МИЭТ.

Главы I-У первой части написаны Баркановым Н.А., УI глава первой части - Митрофановым О.В., УП главу первой части и У главу второй написали Ефимов И.Е. и Козырь И.Я., П главу второй части - Самохвалов Г.К., Ш главу второй части написал Шер Ю.А. и IU главу - Митрофанов О.В. и Козырь И.Я. Общее руководство по написанию и редактированию пособия выполнено Ефимовым И.Е.

Улучшению содержания пособия в значительной степени способствовали рекомендации и замечания рецензентов - сотрудников кафедры электротехники МИЭТ и редактора пособия Т.Н.Камневой, за что авторы выражают глубокую признательность.

Все замечания и пожелания будут приняты с благодарностью и учтены при совершенствовании пособия.

Проф., докт. техн. наук Ефимов И.Е.

## ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический и экономический прогресс народного хозяйства сегодня базируется на широком использовании электроники, которая вторгается буквально во все сферы деятельности человека. Поэтому технический уровень развития электроники в значительной мере предопределяет технический уровень развития других отраслей промышленности.

В связи с возрастающей сложностью радиоэлектронной аппаратуры традиционные методы ее изготовления путем последовательной сборки из дискретных элементов стали неприемлемы, поскольку они не могут обеспечить высокую надежность, экономичность, энергоемкость, необходимые сроки изготовления и габариты. Потребовалось найти принципиально новые пути создания радиоэлектронной аппаратуры.

Микроэлектроника — новое научно-техническое направление электроники, которое с помощью сложного комплекса физических, химических, схемотехнических, технологических и других методов и приемов решает проблему создания высоконадежных и экономичных микроминиатюрных электронных схем и устройств.

Микроэлектронику зачастую отождествляют с микроминиатюризацией радиоэлектронной аппаратуры, хотя эти два понятия принципиально отличаются друг от друга.

Если главной целью микроминиатюризации аппаратуры является обеспечение минимальных размеров и веса устройств, созданных из дискретных малогабаритных деталей, то основная задача микроэлектроники состоит в решении проблемы создания максимально надежных элементов, схем и устройств и разработке дешевых способов их соединений путем использования качественно новых принципов изготовления электронной аппаратуры. К числу этих принципов относится отказ от использования дискретных компонентов и формирование в микрообъемах сложных интегральных схем непосредственно из исходных материалов. Что же касается уменьшения размеров

и веса элементов, схем и устройств, то это не является главной целью микроэлектроники, а решается ею попутно.

Применение особо чистых исходных материалов и проведение технологического процесса в стерильных условиях, исключающих возможность загрязнения, минимальное количество внутрисхемных соединений, малые габариты, компактность микроэлектронных узлов и блоков дают возможность резко повысить надежность микроэлектронной аппаратуры. Этим самым преодолеваются сложные противоречия между возросшими требованиями надежности радиоэлектронной аппаратуры и невозможностью решить эту задачу при использовании дискретных компонентов.

Микроэлектроника развивается как результат обобщения многих технологических приемов, ранее используемых в полупроводниковом производстве и при изготовлении тонкопленочных покрытий. В соответствии с этим в микроэлектронике определились два главных направления: полупроводниковое и тонкопленочное.

Создание интегральной схемы на одной монокристаллической полупроводниковой (пока только кремниевой) пластине является естественным развитием отработанных в течение последних десятилетий технологических принципов создания полупроводниковых приборов, как известно, хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации.

Создание интегральной схемы на некристаллической (изоляционной) подложке, в качестве которой обычно используется стекло или стеклокерамический материал, является дальнейшим развитием широко распространенных вакуумных методов нанесения тонкопленочных покрытий.

В настоящее время применяются два основных метода создания интегральных схем:

локальное воздействие на микроучастки полупроводникового кристалла (твердого тела) и придание им свойств, соответствующих функциям микродеталей и их соединений (интегральные полупроводниковые схемы);

создание схем посредством послойного нанесения пленок различных материалов на общее основание (подложку) с одновременным формированием из них микродеталей и их соединений (интегральные пленочные схемы).

Отсутствие промышленного выпуска тонкопленочных активных элементов, совместимых с пассивными, привело к появлению гибридных микросхем, в которых сочетаются пленочные пассивные элементы с полупроводниковыми активными, в том числе с элементами дискретного типа.

Полупроводниковые и гибридные интегральные схемы являются основой микроэлектроники.

Современный этап развития микроэлектроники характеризуется созданием интегральных схем для всех классов радиоэлектронной и электронной аппаратуры.

Интегральные схемы реализуются в виде:

полупроводниковых схем, выполненных в монолитном блоке полупроводникового материала (монолитные микросхемы);

полупроводниковых схем, выполненных на нескольких кристаллах (поликристаллические микросхемы);

совмещенных схем, в которых активные элементы выполнены в монолитном блоке полупроводникового материала, а пассивные - в виде тонких пленок;

гибридных схем, которые могут изготавливаться с использованием тонких и толстых пленок для пассивных элементов и дискретных активных элементов (под тонкими подразумеваются пленки толщиной менее 1 мкм, полученные методом вакуумного осаждения, толстыми считаются пленки толщиной более 1 мкм, изготовленные методом шелкографии).

Магнитные и криогенные схемы пока не выпускаются в промышленных масштабах, однако и те и другие могут найти в дальнейшем достаточно широкое применение в запоминающих устройствах. Схемы на магнитных пленках имеют значительно меньшее время переключения (3-15 нсек) по сравнению с ферритовыми сердечниками (800-1000 нсек). Большим быстродействием обладают и криогенные схемы, основанные на явлении сверхпроводимости, которое наблюдается у некоторых металлов (свинец, олово, тантал, ниобий и др.) при температурах, близких к абсолютному нулю. Магнитное поле определенной величины снимает сверхпроводящее состояние, что позволяет создать переключающие элементы - криотроны для использования их в вычислительных машинах.

Хотя работы по созданию пленочных активных элементов в промышленных масштабах еще далеки от завершения, тем не менее успехи в этой области позволяют надеяться, что в дальнейшем полностью пленочные микросхемы будут создаваться в едином технологическом цикле.

Ионные (или хемотронные) микросхемы, иначе называемые мимисторами, основаны на использовании электрохимических процессов — переносе ионов в жидких и твердых электролитах под действием электрического тока. Эти микросхемы могут быть выполнены примерно с той же плотностью упаковки, что и полупроводниковые и гибридные микросхемы. Мимисторы находят применение в качестве аналоговых элементов памяти, способных запоминать на длительное время протекающие через них токи, и с их помощью строятся самообучающиеся адаптивные системы.

При создании оптоэлектронных схем использованы оптические явления для передачи, хранения и обработки информации, причем в микроэлектронике в основном применяются схемы, действие которых основано на различных эффектах в твердом теле, главным образом, для преобразования оптических сигналов в электрические и наоборот.

Молекулярные схемы построены с учетом квантовомеханических процессов, протекающих в твердом теле (пьезоэлектрический эффект молекулярный, атомный и ядерный резонансы и др.) и поскольку процессы здесь происходят на молекулярном уровне, то в данном случае можно пренебречь привычными для радиоспециалистов понятиями об элементах (транзисторах, диодах, резисторах, конденсаторах и др.).

Бионическое направление микроэлектроники пока еще развито достаточно слабо и в настоящее время предложено лишь несколько вариантов бионических схем, основанных на использовании простейших моделей нейрона. Однако даже первые шаги показывают перспективность этого направления.

---

## Г л а в а I

### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МИКРОМИНИАТУРИЗАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

#### I. Общие положения

Создание материально-технической базы коммунизма в нашей стране неразрывно связано с внедрением последних достижений науки и техники во все отрасли промышленности, со всемирным повышением темпов технического прогресса.

В программе КПСС сказано: "В течение двадцатилетия осуществится в массовом масштабе комплексная автоматизация производства со все большим переходом к цехам и предприятиям-автоматам, обеспечивающим высокую технико-экономическую эффективность".

Автоматизация обеспечит дальнейшую интенсификацию производственных процессов и резкое повышение производительности труда как в области производства, так и в области научных исследований.

Главная роль в автоматизации производственных процессов принадлежит радиоэлектронике, так как электронные схемы образуют "мозг и нервную систему" всякого автоматизированного устройства. Это определяет огромный рост сфер применения радиоэлектроники в настоящее время. Если до 1940 г. радиоэлектроника в основном использовалась как средство связи, то сейчас невозможно найти какую-либо крупную область науки и техники, где бы широко не применялась радиоэлектроника.

Радиоэлектроника быстро проникает даже в такие древние науки как медицина и астрономия, создавая принципиально новые возможности для познания и использования закономерностей природы.

Широкое применение радиоэлектроники в народном хозяйстве обуславливает ряд важнейших требований, предъявляемых к радиоэлектронной аппаратуре — высокая надежность, низкая стоимость и малые габариты и вес.

Выделение надежности как важнейшей проблемы объясняется непрерывным усложнением аппаратуры, т.е. ростом числа элементов, из которых она состоит, причем темпы роста количества элементов превышают темпы роста надежности этих элементов. В настоящее время с помощью радиоэлектронной аппаратуры должен осуществляться контроль и управление производственными процессами, которые в самом недалеком прошлом выполнялись человеком. Это также требует создания точной и надежной аппаратуры. Аппаратура не может считаться надежной, если радиодетали и узлы, из которых она состоит, имеют невысокую надежность.

Все большее усложнение задач, выполняемых радиоэлектронной аппаратурой, ведет к увеличению ее объемов и веса. Многие радиоэлектронные устройства, которые можно было бы с большим успехом применять в народном хозяйстве, не изготавливаются только потому, что они не уместятся в отводимые для них помещения и очень тяжелы. С этим особенно часто приходится сталкиваться при конструировании всякого рода летательных аппаратов, где каждый лишний килограмм веса аппаратуры ведет к необходимости брать на борт десятки, сотни и даже тысячи килограммов топлива в зависимости от дальности полета и типа летательного аппарата.

Широкое внедрение различных радиоэлектронных систем в народном хозяйстве, предусмотренное планами на ближайшие годы, требует резкого снижения стоимости как отдельных радиодеталей, так и самой радиоэлектронной аппаратуры.

За последние годы радиоэлектроника сделала большой шаг в направлении выполнения перечисленных требований, главным образом благодаря развитию и внедрению полупроводниковых приборов и печатного монтажа. Однако плотность заполнения объема радиоэлектронной аппаратуры даже при использовании современных миниатюрных радиодеталей, полупроводниковых приборов и печатного монтажа остается очень низкой, не превышающей 1 детали/см<sup>3</sup>, объема, что определяется разными конструктивными формами деталей, нерациональным использованием объема внутри самих деталей, трудностью механизации сборки как самих деталей, так и целых узлов.



Надежность большинства типов радиоэлементов и аппаратуры, выпускаемых в настоящее время промышленностью, не соответствует современным требованиям. Решению проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры должно способствовать максимально возможное исключение человека из процессов производства за счет механизации и автоматизации изготовления радиодеталей, узлов и блоков аппаратуры. При этом должны быть изменены конструктивные формы радиодеталей, узлов и всей аппаратуры, рассчитанных в настоящее время в основном на использование ручного труда.

Коренным образом решить эти проблемы должна микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Микроминиатюризация ставит своей задачей снижение габаритов и веса узлов радиоэлектронной аппаратуры и аппаратуры в целом при одновременном повышении надежности и снижении стоимости их изготовления.

Наиболее простой путь микроминиатюризации — создание функциональных конструктивно законченных узлов-модулей из обычных миниатюрных радиодеталей и полупроводниковых приборов с использованием печатного монтажа. Конструкция таких модулей выбирается с учетом возможности максимальной механизации процесса сборки модулей и удобства их компоновки друг с другом. Однако различные конструктивные формы обычных радиодеталей и плохое использование в них объема не позволяют плотно скомпоновать детали в модули и затрудняют механизацию их сборки.

Поэтому модули из обычных радиодеталей целесообразно использовать только в тех случаях, когда можно допустить невысокие плотности заполнения объема аппаратуры радиодетальями (в лучшем случае до 1 детали/см<sup>3</sup> модуля).

Иногда перед сборкой модулей производят доработку деталей с целью уменьшения их габаритов (снимают герметизирующие корпуса, недопустимо укорачивают выводы и т.д.). В этом случае снижается надежность радиодеталей и снимается ответственность завода, выпускающих элементы, за их качество.

Более эффективным путем микроминиатюризации является использование микроэлектронных конструкций в сочетании с функционально-узловым методом создания радиоэлектронной аппаратуры.

## 2. Функционально-узловой метод

Механизация и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры позволяют повысить качество и надежность аппаратуры, резко сократить сроки организации производства и изготовления аппаратуры, снизить ее стоимость.

Внедрение в производство печатного монтажа, автоматической установки деталей на печатных платах и пайки погружением плат в припой позволяет автоматизировать самые трудные операции по изготовлению радиоэлектронной аппаратуры - сборку и монтаж электронных узлов.

Однако механизация и автоматизация производства радио- и электронной аппаратуры невозможна без предварительной широкой унификации отдельных узлов и деталей, а также наиболее целесообразного конструктивного решения их.

Конструкция радиоэлектронных узлов должна быть простой - чем проще радиоэлектронный узел, тем проще автоматизация производства и тем выше качество узла, изготовленного на автомате. Унификации должны подвергаться не только механические узлы и несущие конструкции, а и электронные схемы аппаратуры, которые также нужно оформлять в виде отдельных конструктивно законченных узлов.

Наиболее простым и реальным способом повышения надежности работы радиоэлектронной аппаратуры является разделение сложных радиоэлектронных блоков на простейшие части - узлы и тщательная отработка каждого узла.

Как бы ни была сложна схема, какие бы сложные функции она ни выполняла, ее всегда можно разбить на элементарные функциональные схемы, выполняющие простейшие задачи. Анализ большого числа схем различных классов радиоэлектронной аппаратуры показал, что функциональные схемы составляют 70-80% общей схемы. Остальные 20-30% приходятся на различного рода вспомогательные элементы, без которых невозможно построить ни одну сложную схему (например, развязывающие фильтры, переходные и блокирующие емкости, трансформаторы накала и т.п.). Причем для многих классов аппаратуры, например ЦВМ, связной, метеорологической, навигационной и т.п., существует значительное количество общих простейших

схем, которые могут многократно применяться без каких-либо переработок различных блоков аппаратуры в данном классе, т.е. существует возможность создания таких унифицированных простейших схем, которые могут быть применены в качестве первичных элементов общей схемы.

Очевидно, в этом случае процесс разбивки общей схемы на узлы является обратимым, т.е. возможно создание сложных схем из простейших унифицированных функциональных узлов.

Таким образом, функционально-узловой метод конструирования основан на создании элементарных узлов-модулей, которые могут являться первичными элементами большого числа радиотехнических схем. Применение этого метода конструирования позволяет принципиально изменить подход к разработке, конструированию и изготовлению радиоэлектронной аппаратуры. Создание элементарных функциональных унифицированных модулей дает возможность широко поставить разработки по их миниатюризации.

Применение функционально-узлового метода конструирования радиоэлектронных блоков положительно сказывается не только при освоении в промышленности и в эксплуатации радиоэлектронных устройств, но и при проектировании и разработке новой аппаратуры и особенно при организации быстрого массового ее выпуска.

В самом деле, при проектировании электронной аппаратуры разработчик всегда должен сначала проверить на макете соответствие расчетных параметров тем, которые получены при стыковке отдельных узлов аппаратуры, а для этого требуется собрать и отрегулировать каждый узел, как бы он ни был прост и как бы разработчик ни был в нем уверен.

Наличие радиоэлектронных функциональных узлов, выполненных в виде законченных конструкций с известными гарантированными параметрами, значительно сокращает сроки, необходимые для сборки и проверки макета проектируемого устройства, а также упрощает весь процесс макетирования.

Макет, выполненный из тех же модулей, что и опытный образец, очень близок к будущему опытному образцу и поэтому весь опыт подготовки макета в лаборатории может быть использован производством. В ряде случаев может быть разработан непосредственно опытный образец без лабораторного макетирования.

В зависимости от характера и сложности разрабатываемой аппаратуры, как показывает опыт, стадия лабораторной разработки блоков аппаратуры сокращается в 1,5-3 раза, а в области ЭМ и блоков цифровой автоматики - в 3-5 раз.

Функциональные узлы позволяют избежать применения неотработанных должным образом схем и, следовательно, с самого начала разработки определяют высокую надежность создаваемых устройств. При проектировании ускоряется и процесс выпуска технической документации (принципиальных схем, спецификаций, общих видов и т.п.). Основной объем технической документации составляет техдокументация на функциональные узлы, а она перевыпуска не требует, так как достаточно сослаться на соответствующие чертежи модулей. Изображение принципиальных схем и общих видов функциональных узлов может производиться специальными штампами или трафаретами, что также ускоряет выпуск конструкторской документации.

Функционально-узловой метод (ФУМ) проектирования является качественно более высоким методом разработки радиотехнической аппаратуры, отвечающей современным требованиям. Он позволяет организациям, разрабатывающим радиоаппаратуру, создавать в относительно сжатые сроки сложные комплексы радиотехнической аппаратуры с высоким уровнем надежности.

Применение модулей позволяет создавать типовые конструкции функциональных узлов, блоков, шкафов, в связи с чем сокращается объем и упрощаются конструкторские работы.

Разработанные новые функциональные модули и блоки отличаются в основном монтажными схемами. Однако разработка их в конструкторском отделе может вестись параллельно, что значительно ускоряет процесс конструирования.

Резко уменьшается объем вновь разрабатываемых, оригинальных, конструкций и технической документации. Как показывает опыт, при использовании функционально-узлового метода конструирования аппаратуры в различных конструкторских бюро сроки конструирования сокращаются от 1,5 до 3 раз.

Изготовление блоков аппаратуры в производстве также значительно ускоряется, так как монтаж блоков в основном сводится к сборке готовых модулей, заранее собранных и настроенных по задан-

ным техническим условиям. Квалификация рабочих, собирающих блок на функциональных модулях, может быть ниже на 2-3 разряда квалификации рабочих, монтирующих тот же блок обычным способом. Число конструкторов и производственных рабочих, занятых на изготовлении данной аппаратуры, также сокращается. Применение унифицированных функциональных узлов позволяет, как уже указывалось, применять унифицированные конструкции блоков, что дает возможность упростить и механизировать производство блоков в целом.

Освоение промышленностью производства аппаратуры, собираемой из унифицированных и функциональных узлов, за счет механизации и автоматизации процессов изготовления, сборки и проверки аппаратуры происходит в более короткие сроки.

Улучшаются и эксплуатационные характеристики аппаратуры - полная идентичность функциональных модулей одного типа позволяет производить их замену без каких-либо дополнительных подстроек или регулировок, ускоряется процесс отыскания неисправностей в блоках. В результате тщательной обработки отдельных модулей повышается надежность работы блоков.

Применение модулей упрощает модернизацию узлов и блоков. Совершенствование модулей может осуществляться непрерывно - оно не затрагивает ни производства, ни эксплуатации уже изготовленной аппаратуры, так как модули взаимозаменяемы.

Приведенные преимущества функционально-узлового метода конструирования дают в целом большую экономию времени и стоимости разработки любой аппаратуры.

---

## Г л а в а II

### ТЕРМИНОЛОГИЯ МИКРОМИНИАТУРИЗАЦИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

#### I. Развитие и становление терминологии микроминиатюризации

Микроминиатюризация электронной аппаратуры – сравнительно молодое направление в электронике. Пути развития микроминиатюризации наметились в 1958–1959 гг. В это время появились способы конструирования и образцы схем, представляющие все основные направления микроминиатюризации.

Самый простой и доступный способ, основанный на привычном конструировании, – использование дискретных элементов. Миниатюрные модули и узлы выполнялись либо путем уплотненной сборки миниатюрных элементов обычных конструкций, причем в модуль могли собираться элементы различной случайной формы, либо путем сборки элементов одинаковой формы и размеров, специально изготавливаемых для данной конструкции модуля. Классификация и терминология в этом направлении микроминиатюризации, так же как и в других направлениях, складывалась часто произвольно, в зависимости от меры воображения разработчиков модулей, при этом немаловажную роль играла реклама.

Примером уплотненной объемной конструкции из дискретных миниатюрных элементов обычной формы могут служить так называемые "колончатые модули" (в США они известны под названием "поленница"). Детали в этих модулях устанавливаются параллельно друг другу между двумя печатными платами. После того, как соединения выводов деталей с платами стали осуществляться сваркой, эти модули стали называться "сварными колончатыми" или просто "сварными модулями".

К модулям с уплотненным монтажом относятся и "плоские модули", в которых миниатюрные детали монтируются на печатной плате вплотную друг к другу и затем заливаются герметизирующим компаундом.

Конструкции, состоящие из дискретных элементов специальной стандартной формы и стандартных размеров, называют микромодулями ("таблеточные микромодули", "этажерочные микромодули" и др.)

"Этажерочные микромодули" состоят из набора дискретных плоских элементов квадратной формы, набранных в столбик и соединенных по краям столбика с помощью соединительных проводников или печатных плат. "Таблеточные микромодули" собираются из элементов цилиндрической формы, равных по высоте или по диаметру и вставляемых в отверстия диэлектрического основания. Эти модули в США в зависимости от фирм-изготовителей называют еще "сотowymi" или "швейцарским сыром".

Вплоть до настоящего времени некоторые авторы рассматривают модули с уплотненным монтажом дискретных элементов обычной формы ("колончатые модули") и специальной формы ("микромодули") как различные классы конструкций при микроминиатюризации. По существу, это один и тот же класс - модули с уплотненным монтажом дискретных элементов.

Второе направление микроминиатюризации осуществляется в создании модулей, состоящих из нанесенных на диэлектрическую подложку пассивных элементов (резисторов и конденсаторов) и прикрепленных к подложке дискретных активных элементов (диодов и транзисторов). Вплоть до 1963 г. различные фирмы и разработчики называли эти схемы "микросхемами", "тонкопленочными микросхемами", "тонкопленочными схемами", "плоскими схемами", "двухмерными схемами", "твердыми керамическими схемами". Наибольшее распространение в отечественной и зарубежной литературе получили первые три названия.

Третьим направлением микроминиатюризации явилось создание модулей, выполненных в кусочке монокристаллического полупроводникового материала. В 1959-1960 гг. появились схемы, локальные области которых эквивалентны обычным дискретным элементам. Ставшая классической полупроводниковая схема триггера была названа в 1959 г. американской фирмой "Техас Инструментс" твердой схемой. Этот термин был зарегистрирован как марка этой фирмы и применяется в каталогах фирмы до настоящего времени. Другие разработчики употребляли для подобных схем, кроме упомянутого термина, выражения "схема на твердом теле", "объемная схема", "трехмерная схема", "полупроводниковая твердая схема", "полупроводниковая схема", "полупроводниковая интегральная схема", "интегральная схема".

В 1960 г. появились полупроводниковые функциональные устройства, структуру которых нельзя разделить на области, выполняющие отдельные функции, эквивалентные дискретным радиоэлементам. Устройство в целом по выполняемым им функциям, входным и выходным сигналам эквивалентно схеме на дискретных элементах. Такие устройства были названы "функциональными устройствами", "молекулярными устройствами", "функциональными твердыми схемами". Функциональные устройства могут быть реализованы не только на полупроводниковых, но и на других материалах, например ферритах или сегнетоэлектриках.

Американская фирма "Вестингауз", разработавшая в 1960 г. несколько простых полупроводниковых функциональных устройств, продолжала к разработанным ей в последующие годы полупроводниковым интегральным схемам (схемы с эквивалентами дискретных элементов) применять термин "молекулярные функциональные устройства" и часто, если не было подробных описаний, нельзя было понять, о каких структурах идет речь.

Таким образом, вплоть до 1963 г. терминология в области микроминиатюризации складывалась стихийно. Большинство авторов выделяло три класса: "микромодули", "микросхемы" и "твердые схемы". При детальном рассмотрении конкретных схем к "микросхемам" прибавляли определение "тонкопленочные", к "твердым схемам" - "интегральные", "полупроводниковые", "функциональные". По случайно сложившимся обстоятельствам тонкопленочные схемы называли "микросхемами", а полупроводниковые схемы со значительно меньшими размерами - "схемами". Точно так же элементы этажерочных микромодулей называли и называют до настоящего времени "микроэлементами", а элементы тонкопленочных и полупроводниковых схем - "элементами".

В 1962 г. расширились работы по получению тонкопленочных активных элементов (диодов, транзисторов). Были изготовлены лабораторные образцы полностью тонкопленочных схем, без навесных активных элементов. По аналогии с интегральными полупроводниковыми схемами, элементы которых неразрывно связаны с подложкой, тонкопленочные схемы без навесных элементов были названы "интегральными тонкопленочными схемами".



В дальнейшем технологические способы обработки полупроводников и получения тонких пленок достигли достаточно высокого уровня и были выявлены возможности комбинаций этих способов для выявления свойственных им преимуществ и устранения недостатков. Так появились полупроводниковые схемы с напыленными тонкопленочными элементами. Такие схемы были названы "гибридными", но если под гибридизацией понимать совместное применение различных технологических способов микроэлектроники, то тонкопленочные схемы с навесными активными элементами и полупроводниковые интегральные схемы, выполненные на нескольких подложках (многокристалльные или многоосколковые) и объединенные на общем основании в одном корпусе, и схемы, представляющие любую другую возможную комбинацию, также будут гибридными.

Поскольку полностью тонкопленочные схемы все еще не вышли за пределы лабораторий, то чаще всего в литературе речь идет о гибридных тонкопленочных схемах и их называют просто "тонкопленочными схемами". Термин "микросхема", несправедливо присвоенный вначале только тонкопленочным схемам, начиная с 1962-1963 гг. распространяется в литературе также и на полупроводниковые схемы и применяется чаще всего, когда речь идет вообще о микроэлектронных схемах различных видов. Например, если говорим "аппаратура, выполненная с применением микросхем", то в современной литературе это нужно понимать так, что применены либо интегральные полупроводниковые, либо тонкопленочные, либо гибридные схемы, либо эти схемы в любой комбинации.

Термин "твердая схема" почти исчез из литературы. Начиная с 1963 г. в литературу прочно входит термин "полупроводниковая интегральная схема". Термин "микросхема" применительно к тонкопленочным схемам и термин "твердая схема" применяются в настоящее время за рубежом лишь как фирменные марки.

В течение последних лет делались различные попытки систематизировать терминологию в области микроминиатюризации и дать рекомендации по ее стандартизации. Наиболее стройная классификация направлений микроэлектроники и точная терминологи-

Гля представлены в "Рекомендациях Общества электронной промышленности (США) по терминологии в микроэлектронике", опубликованных в декабре 1962 г. и в рекомендациях Международной электротехнической комиссии.

Согласно этой терминологии, микроминиатюризация – область электроники, связанная с реализацией электронных схем, блоков и аппаратуры в целом из очень малых миниатюрных элементов. Можно выделить три метода:

метод дискретных элементов – физическая реализация миниатюрных электронных модулей (узлов) путем сборки отдельных микроминиатюрных элементов (резисторы, конденсаторы, транзисторы), неоднородных по форме и размерам или одинаковой стандартной формы и размеров ;

метод интегральных схем – физическая реализация ряда модулей, выполняющих функцию определенной схемы и состоящих из элементов, неотделимых от поверхности или объема материала подложки – основания.

Этот метод развивается по двум основным технологическим направлениям:

тонкопленочные интегральные схемы – физическая реализация элементов схемы в виде тонких пленок, нанесенных на изолирующую подложку;

полупроводниковые интегральные схемы – физическая реализация элементов схемы, неотъемлемых от кристалла полупроводника (полупроводниковой подложки). Полупроводниковые интегральные схемы делятся на монолитные (схема полностью выполнена на одной подложке и герметизирована в корпусе) и многокристальные или многоосколковые (схема выполнена на нескольких подложках, объединенных на общем основании в одном корпусе).

функциональные устройства – физическая реализация той или иной функции электронной схемы на основе использования явлений, протекающих в твердом теле. Структура функционального устройства неделима на отдельные электрические функции.

Сочетание различных методов микроминиатюризации в одной структуре создает гибридные методы, а схемы, выполненные по гибридной технологии, получили название "гибридные схемы". Классификация не дает четкого определения гибридных схем.

## 2. Рекомендуемая терминология

С целью наименьшего изменения существующей в литературе терминологии в соответствии с отечественными и зарубежными терминами представляется наиболее целесообразным принять терминологию, рекомендуемую МЭК с учетом сложившихся определений в отечественной электронной промышленности.

### Уплотненный монтаж

Уплотненный монтаж дискретных элементов или просто "уплотненный монтаж" позволяет создавать модули с повышенной плотностью элементов. При использовании элементов обычной формы, как правило, различной для различных элементов повышенная плотность монтажа создается за счет рациональной конструкции модулей (колончатые и сварные модули), а также за счет использования части деталей без обычных корпусов и выводов (плоские модули) с последующей их герметизацией в общем корпусе - капсуле. При этом плотность монтажа определяется главным образом размерами деталей. Отсюда стремление конструкторов использовать самые миниатюрные и субминиатюрные детали, выпускаемые промышленностью.

Механизация изготовления таких модулей относительно затруднена и определяется формой деталей и методами соединения выводов деталей с общей схемой модуля.

Создание деталей специальной формы, одинаковой (подобной) для всех деталей и удобной для механизированной сборки их в модуль, позволяет создавать модули с более высокими плотностью монтажа и степенью механизации изготовления (этажерочные микромодули, таблеточные микромодули и др.). В данном случае предлагается следующая терминология:

уплотненный монтаж - метод создания электронных узлов из отдельных (дискретных) деталей, заключающийся в плотной компоновке миниатюрных деталей обычной или специальной формы с последующей общей герметизацией модуля;

колончатые модули - обычные детали устанавливаются плотно, параллельно друг другу и соединяются с помощью печатного монтажа или сварки с последующей общей герметизацией. При использовании сварки модули называют сварными модулями;

плоские микромодули, выполненные из деталей, установленных на одной или двух плоскостях печатной платы. Выводы деталей соединяются с печатным монтажом с помощью токопроводящих клеев или пайки обычными припоями. Сборка из печатной платы и деталей затем герметизируется;

этажерочные микромодули или просто микромодули выполнены из деталей специальной формы, собранных в столбик и соединенных друг с другом с помощью пайки или сварки с вертикальными соединительными проводниками ("этажерка") с последующей герметизацией;

таблеточные микромодули выполнены из деталей специальной цилиндрической формы, установленных в отверстиях печатной платы и соединенных друг с другом с помощью печатного монтажа с последующей герметизацией.

#### Интегральные схемы

В интегральных схемах комплект отдельных конструктивно законченных радиодеталей, входящих в данную схему, заменяется группой ("суммой", "интегралом") элементов, выполненных неотделимо от поверхности или объема материала основания (подложки). Это резко увеличивает плотность монтажа и позволяет значительно упростить конструкцию электронного модуля, что в свою очередь создает потенциальную возможность более высокой механизации и автоматизации изготовления таких модулей.

Интегральные схемы могут изготавливаться методами пленочной технологии ("пленочные микросхемы"), полупроводниковой технологии ("полупроводниковые микросхемы"), методами керамического производства ("керамические микросхемы") и т.д.

Однако возможны интегральные схемы, при изготовлении которых использованы ("смешаны") как те, так и другие методы. В этом случае получаются гибридные интегральные микросхемы.

Рекомендуется следующая терминология:

интегральные схемы - модули, все или большая часть элементов которых неразрывно связаны с поверхностью или объемом подложки - основания;

интегральные пленочные схемы (пленочные схемы), в которых все входящие в схему элементы и соединения между ними выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрического основания;<sup>х)</sup>

гибридные пленочные схемы (гибридные схемы), в которых наряду с пленочными элементами используются отдельные заранее изготовленные дискретные микроминиатюрные детали - полупроводниковые приборы, конденсаторы, индуктивности и др.

интегральные полупроводниковые схемы (полупроводниковые схемы), в которых все входящие в схему элементы выполнены на поверхности или в объеме подложки из полупроводникового материала. Если все элементы схем выполнены в объеме одной полупроводниковой пластины, то схема называется "монокристаллической полупроводниковой микросхемой". Если схема состоит из нескольких полупроводниковых пластин, то она называется "многокристаллической полупроводниковой микросхемой";

совмещенные полупроводниковые схемы (совмещенные схемы), в которых большая часть входящих в схему элементов выполнена методами полупроводниковой технологии на поверхности или в объеме полупроводниковой пластины, а часть элементов (обычно резисторы, емкости, соединительные проводники) выполнена на поверхности полупроводника методами пленочной технологии;

интегральные керамические схемы (керамические схемы), в которых все входящие в схему элементы выполнены методами технологии керамического производства на поверхности или в объеме керамической пластины;

гибридные керамические схемы (гибридные керамические схемы), в которых большая часть входящих в схему элементов выполнена методами керамического производства на поверхности или в объеме керамической пластины, а часть элементов установлена или

---

х) Диэлектрическое основание может быть создано и путем пассивации или покрытия диэлектрическими пленками металлических пластин.

выполнена на поверхности пластины другими технологическими методами;

подложка – основание, на поверхности или в объеме которой создаются элементы интегральной схемы.

### Функциональные устройства

В структуре функциональных устройств трудно выделить элементы или области, выполняющие отдельные электрические функции.

Поэтому под функциональным устройством предлагается понимать микроэлектронное устройство, выполненное в объеме полупроводникового (или другого) материала, кристаллическая решетка которого обработана таким образом, что он выполняет функции определенной электронной схемы.

### Общие термины

Микроминиатюризация – направление (область) электроники, связанное с реализацией электронных схем, блоков и аппаратуры в целом из миниатюрных и микроминиатюрных элементов и узлов.

Микроэлектроника – направление (область) электроники, связанное с реализацией электронных схем, блоков и аппаратуры в целом из миниатюрных и микроминиатюрных элементов, которые не могут быть использованы самостоятельно вне конструкции микросхемы, модуля или блока. Микроэлектроника является частью микроминиатюризации и охватывает микромодули, интегральные схемы и функциональные устройства, которые все вместе можно называть как микроэлектронные конструкции. Колончатые и сварные модули являются миниатюрными конструкциями.

Интегральная микроэлектроника – раздел микроэлектроники, охватывающий проблемы создания интегральных схем.

Микросхемотехника – раздел микроэлектроники, рассматривающий вопросы расчета и проектирования микросхем и способов их сочетания.

Микроэлектронная аппаратура – аппаратура, выполненная на основе микросхем и микроблоков.

Микроблок – функциональный блок, состоящий из совокупности микросхем.

Топология микросхем – раздел микросхемотехники, рассматривающий вопросы размещения и соединения элементов микросхем.

### 3. Сравнение микроэлектронных конструкций

Микроминиатюризация основывается на использовании функционально-узлового метода, новых конструктивных форм и технологических приемов изготовления узлов радиоэлектронной аппаратуры, которые позволяют наиболее рационально заполнить радиоэлементами объем аппаратуры и максимально автоматизировать изготовление деталей и узлов.

Наиболее простой путь миниатюризации - использование функциональных конструктивно законченных узлов-модулей, выполненных с применением уплотненного монтажа. При этом предпочтение следует отдавать таким конструкциям модулей, процесс изготовления которых наиболее просто механизировать и автоматизировать и которые наиболее просто и плотно komponуются друг с другом в составе узлов и блоков.

Однако различные конструктивные формы обычных деталей и плохое использование в них объема (это относится и к самым субминиатюрным деталям) затрудняют возможность компоновки деталей большей, чем 1+3 детали в 1 см<sup>3</sup> модуля затрудняют механизацию процесса изготовления модулей. Более эффективные пути микроминиатюризации основаны на использовании микроэлектронных конструкций: микромодулей, интегральных схем и функциональных устройств.

Микромодули - это модули, собираемые из отдельных радиодеталей специальной формы (микроэлементов). Одинаковая и простая форма микроэлементов позволяет сравнительно легко обеспечить автоматизированное изготовление как самих микроэлементов, так и сборки из них микромодулей.

За счет рациональной формы микроэлементов и компактной конструкции самих микромодулей может быть достигнута значительная плотность заполнения объема микромодулей, чем при обычных методах конструирования узлов радиоэлектронной аппаратуры. Применение микроэлементов дает плотность порядка 5-10 дет/см<sup>3</sup>, использование полимикрэлементов (несколько однотипных элементов на

одной плате) позволяет получить плотность заполнения 10-20 дет/см<sup>3</sup> микро модуля. Технология изготовления микроэлементов и микро модулей не требует принципиально новых технологических решений и осуществима на современном уровне развития производства.

Для разработки и изготовления микроэлементов и микро модулей может быть использована существующая кооперация в радиоэлектронной промышленности, так как отдельные специализированные организации и заводы используются по своему назначению (микро резисторы разрабатываются и изготавливаются организациями и заводами, специализирующимися на разработке и изготовлении обычных резисторов, микротранзисторы разрабатываются и изготавливаются полупроводниковыми институтами и заводами полупроводниковых приборов и т.д.).

Конструкция микро модуля - сборка микроэлементов, спаянных друг с другом и залитых плотным герметизирующим компаундом, обладает высокой механической прочностью. Хорошая защита от внешней среды микроэлементов, высокое качество микроэлементов и микро модулей за счет их автоматизированного изготовления обеспечивают высокую надежность работы микро модулей.

Микро модули, имеющие объемную конструкцию, хорошо komponуются в узлы в сочетании с такими радиоэлементами, как подстроечные резисторы контура, реле, трансформаторы. Для электрического и механического соединения микро модулей как друг с другом, так и с обычными радиоэлементами достаточно использовать обычные методы печатного монтажа.

При возможном рассеивании в своем объеме относительно больших для микроэлектронных конструкций мощностей при допустимых перегревах микро модули позволяют использовать существующие, проверенные опытом, схемные решения, что облегчает переход от обычных радиоэлектронных узлов и блоков к микро модульным.

Наконец, микро модульная конструкция, состоящая из отдельных радиодеталей, позволяет на стадии отработки схемы проводить макетирование и доработку схемы и конструкции в лабораторных условиях.



Недостатком микромодульной конструкции по отношению к интегральным схемам является меньшая плотность заполнения объема модуля радиодетальями и значительно большее количество переходных контактов внутри микромодуля.

Пленочные интегральные схемы - функционально законченные радиоэлектронные схемы, выполненные на общем основании-подложке, минуя стадию изготовления отдельных радиодеталей. Схемы выполняются как плоская мозаика из тонких пленок различных материалов (проводящих, полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и т.д.), нанесенных на диэлектрическое основание.

Отказ от отдельных радиодеталей и использование тонких пленок позволяют получить в пленочных микросхемах плотность заполнения, эквивалентную 50-100 дет/см<sup>3</sup> схемы. В пленочных микросхемах резко сокращается количество переходных контактов, так как все элементы схемы изготавливаются за один технологический цикл, как правило, в высоком вакууме. Высококачественные, особо чистые материалы, используемые для получения пленочных схем, резко повышают надежность работы. Малые габариты и плоская конструкция обеспечивают хорошую механическую прочность и удобный отвод тепла от схем. Однако для изготовления схем требуется разработка новых, очень тонких технологических процессов, сложного технологического оборудования, создание новой кооперации специализированных организаций. Чрезмерно малые мощности, ограниченность номиналов элементов, реализуемых в пленочных микросхемах, затрудняют быстрое внедрение пленочных микросхем в радиоэлектронную аппаратуру. Трудность компоновки пленочных микросхем с объемными радиодетальями типа реле, кварцов, трансформаторов и т.п. и многослойный монтаж для соединения схем друг с другом усложняют процесс конструирования и изготовления радиоэлектронной аппаратуры.

Полупроводниковые интегральные схемы стали реальностью благодаря современным достижениям науки в области физики твердого тела. Принципиально возможным стало создание такой структуры в монокристаллах полупроводниковых материалах, которая дает возможность использовать их для выполнения тех или иных функций радиоэлектронных схем. Выполнение функциональных узлов на базе

полупроводниковых микросхем должно обеспечить получение плотности заполнения объема радиоэлектронной аппаратуры, эквивалентное 500-1000 дет/см<sup>3</sup> узла.

В полупроводниковых микросхемах отсутствует проблема объединения отдельных деталей. Благодаря использованию однородного, обладающего высокой чистотой материала, количество контактов между разнородными материалами существенно сокращается и основные электрические соединения приходится на входные и выходные контакты схемы, а также на выводы для получения источников питания. Очень маленькие размеры схем обеспечивают им большую механическую прочность.

Все это вместе взятое определяет высокую надежность полупроводниковых микросхем. К недостаткам полупроводниковых микросхем можно отнести трудность получения элементов схемы с жесткими допусками, большую температурную зависимость характеристик и ограниченность номинальных величин и типов элементов схем, трудность использования в схемах аналоговых устройств из-за нежелательных переходных связей и большого рассеяния энергии, дорогое и сложное технологическое оборудование.

#### 4. Классификация и система обозначений интегральных схем

Условное обозначение отечественных микросхем состоит из пяти элементов:

первый элемент - одна цифра, обозначающая вид микросхемы по технологическому исполнению;

второй элемент - две буквы, обозначающие класс и группу по характеру выполнения электрических функций;

третий элемент - две цифры, обозначающие порядковый номер регистрации;

четвертый элемент - одна цифра, обозначающая номер типа микросхемы в группе микросхем одинакового функционального назначения;

пятый элемент - одна буква, обозначающая отличие по какому-либо параметру одинаковых типов микросхем.

По технологическому исполнению интегральные схемы подразделяются на виды и обозначаются: полупроводниковые и совмещенные схемы - 1, гибридные интегральные схемы - 2 и пленочные интегральные схемы - 3.

По характеру выполнения электрических функций микросхемы подразделяются на классы и группы и обозначаются в соответствии с таблицей.

Т а б л и ц а

Наименование класса	Обозначение класса	Наименование группы	Обозначение группы	Буквенный индекс микросхемы
1	2	3	4	5
Усилители	У	Синусоидальные	С	УС
		Постоянного тока	Т	УТ
		Видеоусилители	Б	УБ
		Импульсные	И	УИ
		Повторители	Э	УЭ
		Прочие	П	УП
Генераторы	Г	Синусоидальных колебаний	С	ГС
		Сигналов специальной формы	Ф	ГФ
Преобразователи	П	Частоты	С	ПС
		Фазы	Ф	ПФ
		Формы	М	ПМ
		Напряжения	Н	ПН
		Кодирующие	К	ПК
		Декодирующие	Д	ПД
		Прочие	П	ПП

1	2	3	4	5
Модуляторы	М	Амплитудные	А	МА
		Частотные	С	МС
		Фазовые	Ф	МФ
		Импульсные	И	МИ
		Прочие	П	МП
Детекторы	Д	Амплитудные	А	ДА
		Частотные	С	ДС
		Фазовые	Ф	ДФ
		Импульсные	И	ДИ
		Прочие	П	ДП
Триггеры	Т	Со счетным запуском	С	ТС
		С отдельным запуском	Р	ТР
		С комбинированным запуском	К	ТК
		Шмитта	Ш	ТШ
		Динамические	Д	ТД
Электронные ключи	К	Транзисторные	Т	КТ
		Диодные	Д	КД
		Оптоэлектронные	Э	КЭ
		Прочие	П	КП
Фильтры	Ф	Верхних частот	В	ФВ
		Нижних частот	П	ФН
		Полосовые	П	ФП
		Заградительные	Г	ФГ
		Сглаживающие	С	ФС
Линии задержки	Ш	Схемные	С	ПС
		Прочие	П	ШП
Логические схемы	Л	Схемы И	И	ЛИ
		Схемы ИЛИ	Л	ЛЛ
		Схемы НЕ	Н	ЛН
		Схемы И-НЕ/ИЛИ-НЕ	Б	ЛБ
		Схемы И-ИЛИ	С	ЛС
		Схемы И-ИЛИ-НЕ	Р	ЛР
		Прочие	П	ЛП

1	2	3	4	5
Запоминающие устройства	Я	На магнитных пленках	Л	ЯЛ
		Матрицы	М	ЯМ
		Прочие	П	ЯП
Элементы арифметических и дискретных устройств	И	Регистры	Р	ИР
		Сумматоры	С	ИС
		Полусумматоры	Л	ИЛ
		Счетчики	Е	ИЕ
		Шифраторы	Ш	ИШ
		Дешифраторы	Д	ИД
		Комбинированные	К	ИК
		Прочие	П	ИП
Наборы элементов	Н	Резисторов	С	НС
		Конденсаторов	Е	НЕ
		Диодов	Д	НД
		Транзисторов	Т	НТ
		Комбинированные	К	НК
Схемы селекции и сравнения	С	Аналоговые	А	ЖА
		Импульсные	И	ЖИ
		Логические	Л	ЖЛ
		Аналого-импульсные	Е	ЖЕ
		Аналого-логические	В	ЖВ
		Импульсно-логические	Г	ЖГ
		Аналого-импульсно-логические	К	ЖК

Таким образом, полупроводниковая логическая микросхема ИЛИ-НЕ 2I серии 2 типа будет обозначаться: ИЛБ2I2; гибридная логическая микросхема ИЛИ 23 серии I типа - 2ЛЛ23I и т.н.

## Г л а в а Ш

### МИНИАТЮРИЗАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЫЧНОЙ ФОРМЫ

Дискретные элементы обычной формы или, как их еще нередко называют, радиодетали не оставались неизменными по конструкции и габаритам. В течение всего периода развития радиотехники и электроники радиодетали – резисторы, конденсаторы, лампы, трансформаторы уменьшались по габаритам за счет применения более рациональных конструкций и новых материалов, более температуростойких и стабильных по своим свойствам во времени. Особенно большие успехи в миниатюризации радиодеталей были достигнуты за последнее десятилетие, характерной особенностью которого является вытеснение электровакуумных приборов (радиодиагностики) полупроводниковыми, обладающими во много раз меньшими габаритами, чем самые миниатюрные радиодиагностики.

Широкое применение транзисторов, работающих в большинстве случаев при значительно меньших напряжениях, чем радиодиагностики, и имеющих значительно более высокий к.п.д., создало благоприятные условия для дальнейшего значительного сокращения габаритов радиодеталей.

Так, за последние 10 лет объем резисторов уменьшен в 50+75 раз, удельный объем пленочных конденсаторов – в 70 раз; удельная емкость керамических конденсаторов увеличена в 300 раз, удельный заряд на единицу объема электролитических конденсаторов – в 5 раз; вес и габариты радиокомпонентов уменьшены от 2 до 15 раз.

Даже транзисторы, самые "молодые" и самые миниатюрные из радиодеталей, подверглись также миниатюризации, в результате чего их объем уменьшился в 8 раз, а объем бескорпусного транзистора – в 100 раз по сравнению с объемом обычного транзистора.

Уменьшение габаритов дискретных радиодеталей сопровождается повышением их надежности – за эти же 10 лет надежность радиодеталей повышена на 2+3 порядка.

Существенная миниатюризация радиодеталей и значительное повышение их надежности создают предпосылки для широкого применения в миниатюрной аппаратуре обычных радиодеталей, наряду с микромодулями и интегральными микросхемами. Появилась возможность создания из них миниатюрных конструкций модулей с уплотненным монтажом деталей.

Ниже приводится номенклатура и основные электрические характеристики современных отечественных миниатюрных радиодеталей и компонентов, рекомендуемых для использования при конструировании модулей с уплотненным монтажом, гибридных микросхем, узлов и блоков миниатюрной аппаратуры.

### 1. Резисторы

Резисторы являются широко распространенными элементами современной электронной аппаратуры, составляя от 16 до 50% общего числа элементов, входящих в схему аппаратуры. Промышленность выпускает большой ассортимент различных типов миниатюрных резисторов с сопротивлением от нескольких ом до тысяч Ом с допускаемыми отклонениями действительных сопротивлений от номинальных величин от  $\pm 0,05$  до  $\pm 20\%$ . В зависимости от материалов проводящих элементов резисторы могут быть разделены на следующие группы

углеродистые резисторы, проводящий элемент которых представляет собой пленку пиролитического углерода, осажденную на изоляционное основание;

металлопленочные и металлоокисные резисторы с проводящим элементом в виде пленки сплава или окиси металла;

композиционные резисторы с проводящим элементом, представляющим собой систему из нескольких компонентов, один из которых является проводящим;

проволочные резисторы с проводящим элементом, выполненным из проволоки или микропроволоки;

полупроводниковые резисторы с проводящим элементом, выполненным из полупроводникового материала.

По назначению миниатюрные резисторы могут быть разделены на общие и специальные. Резисторы общего назначения используются в качестве нагрузок, поглотителей и делителей в цепях питания элементов фильтров, шунтов, в цепях формирования импульсов и т.п.

В данную группу входят постоянные резисторы, величина сопротивления которых фиксируется при изготовлении (рис.Ш.1,2), и переменные резисторы, конструкции которых позволяют плавно менять в определенных пределах величину сопротивления (рис.Ш.3,4,5,6)

К резисторам специального назначения относятся: высокоомные (до  $10^{13}$  ом), высоковольтные (до 10+60 кв), высокочастотные (на частоте свыше 10 Мгц). Прецизионные терморезисторы в большинстве своем не могут быть названы субминиатюрными и поэтому их характеристики здесь не приводятся.

По конструктивному исполнению миниатюрные резисторы могут быть разделены следующим образом:

- резисторы с проводящим элементом, представляющим собой пленку, нанесенную на поверхность изоляционного основания;
- резисторы с объемным проводящим элементом;
- резисторы с проводящим элементом из проволоки.

Основные параметры современных постоянных миниатюрных резисторов общего назначения приведены в табл. Ш.1.

Резисторы могут работать в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока как в навесном, так и в печатном монтаже. Резисторы обладают высокой стабильностью характеристик в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Как видно из таблицы, миниатюрные резисторы действительно имеют очень малые размеры: средний диаметр миниатюрных резисторов лежит в пределах 1,5+2 мм при средней длине 5 мм. Подавляющее большинство типов миниатюрных резисторов имеют проволочные металлические выводы и только резисторы типа СЗ-3 и С2-12, являющиеся самыми миниатюрными (диаметр - 0,2 мм, длина - 3 мм), имеют контактные выводы в виде посеребренных колец на концах цилиндрических стеклянных нитей, покрытых тонким резистивным слоем.

Основные параметры миниатюрных переменных резисторов общего назначения приведены в табл. Ш.2.

Резисторы имеют высокие механические и климатические параметры, могут использоваться в цепях постоянного и переменного тока частотой до 1000 гц. Резисторы типа СП5-16Т способны работать в условиях тропического климата. Все элементы конструкций переменных резисторов выполняются из термостойких материалов, а проводящий элемент защищен от воздействия внешней среды герметичным чехлом, что обеспечивает работоспособность резисторов при высоких температурах и повышенной влажности.



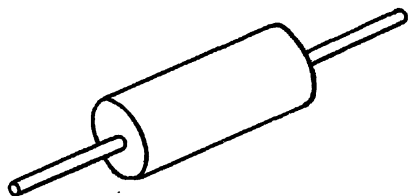


Рис.Ш.1. Резистор типа КИМ

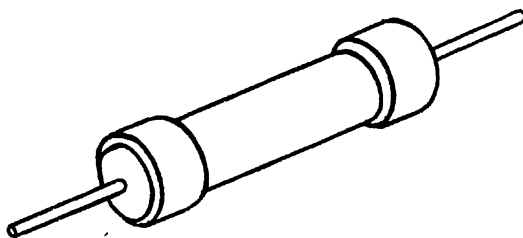


Рис. Ш.2. Резистор типа МПТ

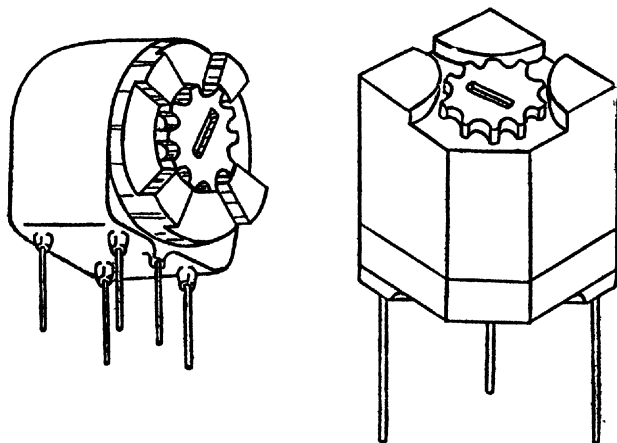


Рис. Ш.3. Резистор типа С5-6

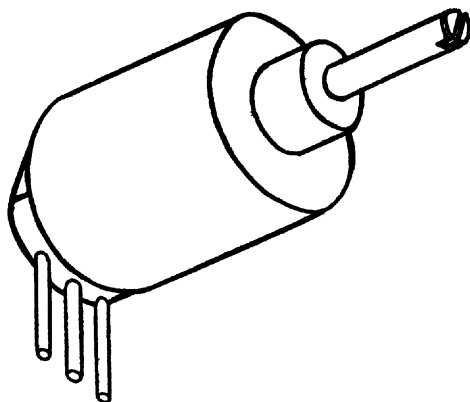


Рис. Ш.4. Резистор типа СПО-0,15

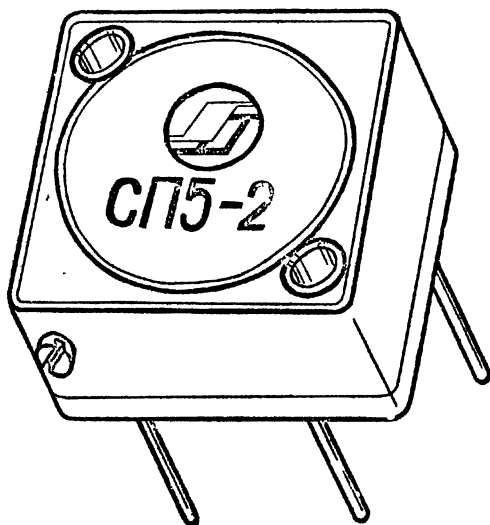


Рис. III.5. Резистор типа СП5-2

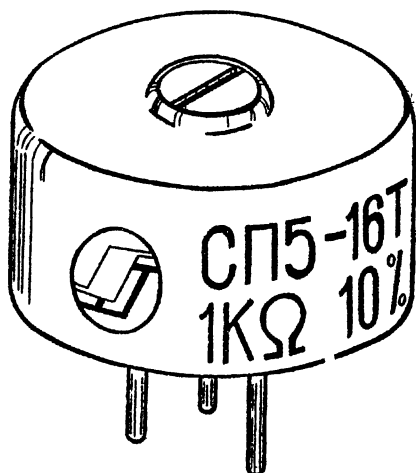


Рис. III.6. Резистор типа СП5-16Т

Т а б л и ц а Ш.1

## Миньматюрные постоянные резисторы

Т и п	Краткая характеристика	Размеры, мм	Диапазон номиналов, Ом	Допуск	УТ, %/град	Допустимая мощность, мВт	Рабочий диапазон температур, град.
КМ	Композиционные изолирующие малогабаритные	D=1,8+2,5 A=3,8+8,10	$10 \cdot 10^9$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,1; \pm 0,2$	50 и 125	-60+125
КММ	Композиционные мегомные малогабаритные	D=1,6 A=6,2	$5,1 \cdot 10^5 +$ $\pm 10^6$				
СЗ-3	Композиционные ниточные мекромодульные	D=0,2 A=3,0+8,0	$10^2 +$ $3,3 \cdot 10^6$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,1$	125	-60+125
МЛМ	Металлопленочные лакированные миньматюрные	D=2,0 A=5,8	$10^4 +$ $2,2 \cdot 10^6$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$			
МЛТ	Металлопленочные лакированные теплостойкие	D=2,0 A=6,0	$51 +$ $2,2 \cdot 10^6$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,07 + \pm 0,16$	125	-60+125
МТ	Металлопленочные с повышенной теплостойкостью	D=2,0 A=7,0	$51 + 10^6$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,07 + \pm 0,16$	125	-60+200
СЗ-6	Металлопленочные с повышенной теплостойкостью	D=2,0 A=6,5	$10^2 + 10^6$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,07 + \pm 0,16$	125	-60+300
СЗ-10	Металлопленочные прецизионные	D=2,0 A=7,0	$10 + 10^3$	$\pm 0,5; \pm 1,0$	$-0,03 + 0,06$	125	-60+125
СЗ-11	Металлопленочные низкоомные	D=2,0 A=7,0	$1 + 10^2$	$\pm 5; \pm 10$	$\pm 0,06$	125	-60+125

Продолжение табл. Ш. I

Т и П	Краткая характеристика	Размеры, мм	Диапазон номиналов, ОМ	Допуск	ТЭР, %/град	Допустимая мощность, МВт	Рабочий диапазон температур, град.
С2-12	Станетные ниточные микромодульные	$D=0,2$ $\delta=3,0 \pm 0,0$	$10^4$ $5,1 \cdot 10^3$	$\pm 5; \pm 10; \pm 20$	$\pm 0,1$	125	-60+125
С5-15	Проволочные для микро- схем	$3,0 \times 2,4 \times 1,6$	$10^2$ + $10^5$	$\pm 0,05; \pm 0,5$	$\pm 0,003$ + $\pm 0,015$	50	-60+125
С5-18	Проволочные для микро- модулей	$7,5 \times 7,5 \times 3,5$	$51$ + $5,1 \cdot 10^5$	$\pm 0,1; 0,2$ ; $0,5; 1,0$	$\pm 0,003$	125	-60+125
С5-717	Проволочные из микро- провода в стеклянной изоляции	$D=3,5$ $\delta=10,0$	$10^4$ + $1,6 \cdot 10^6$	$\pm 0,1; \pm 0,5$	$\pm 0,004$		-60+155
МПР-3	Проволочные из микро- провода в стеклянной изоляции	$D=1,0$ $\delta=2,2$	$10^2$ + $10^5$	$\pm (1 \pm 20)$	$\pm 0,0015$ + $\pm 0,006$	50	-60+125
СТЗ-32	Терморезистор бусинко- вый	$D=0,55$	$2,2 \cdot 10^4$	$Z=0,6 \pm 0,7$ сек		15	чувствительность $25$ Ом/МВт
СТ4-2	Терморезистор таблетч- ный	$D=7,0$ $H=1,7$	$2,7 \cdot 10^3$	$\pm 10$	$-4,2$ + $-4,8$	8	-60+125
СТ7-1	Терморезистор с отри- цательным температур- ным коэффициентом	$D=6,0$ $H=6,0$	$10^3$ + $10^4$	$Z=20$ сек	$-6$ + $-15$		чувствительность $1$ / $10$ мкВт

Т а б л и ц а Ш.2

## Маломощные переменные резисторы

Т и п	Краткая характеристика	Размеры, мм	Диапазон номиналов, Ом	Допуск, %	Допустимая мощность, Вт	Расчетный диапазон температур, град.
I	2	3	4	5	6	7
СПБ-6	Композиционные с круговым перемещением контакта для печатного монтажа	Н-11,7 Н-15,7	$10^3+10^6$	$\pm 10; \pm 20; \pm 30$	125	-60+100
СПБ-1	Проволочные с прямоугольным перемещением контакта для печатного монтажа	35x8x6,5	$10^2+10^4$	$\pm 5$	1000	-60+125
СПБ-2	Проволочные с круговым перемещением контакта для печатного монтажа	13x13x7,5	$10^2+47 \cdot 10^3$	$\pm 5$	1000	-60+125
СПБ-3	Проволочные с круговым перемещением контакта для навесного монтажа	13x13x5	$10^2+47 \cdot 10^3$	$\pm 5$	1000	-60+125
СПБ-4	Проволочные с прямоугольным перемещением контакта для печатного и навесного монтажа	35x14x7	$10^2+10^4$	$\pm 5$	1000	-60+125
СПБ-6	Проволочные с круговым перемещением контакта для печатного монтажа	16x11x11	$10^2+10^5$	$\pm 10$	500	-60+125

1	2	3	4	5	6	7
СПБ-11	Проволочные с параллельным перемещением двух контактов для печатного монтажа	34, 5x12x11, 8	$10^2+47 \cdot 10^3$	$\pm 10$	1000	-60++125
СПБ-12	Проволочные с круговым перемещением контакта для печатного монтажа	13x13x6	$3,3x47 \cdot 10^3$	$\pm 5, \pm 10$	1000	-60++125
СПБ-13	Проволочные с круговым перемещением контакта для навесного монтажа	13x13x6	$3,3+47 \cdot 10^3$	$\pm 5, \pm 10$	1000	-60++125
СПБ-14	Проволочные с параллельным перемещением контакта для печатного монтажа	34, 5x10, 5x7	$10^2+47 \cdot 10^3$	$\pm 10$	1000	-60++125
СПБ-15	Проволочные с параллельным перемещением контакта для объемного монтажа	34, 5x9x7 $H=11,0$ $H=9,7$	$10^2+47 \cdot 10^3$ $22+22 \cdot 10^3$	$\pm 10$ $\pm 10$	1000 250	-60++125 -60++125
СПБ-16Т	Проволочные с круговым перемещением контакта для печатного монтажа	$H=9,8$ $H=14,3$	$10^2+10^6$	$\pm 20$	150	-60++100

Т а б л и ц а Ш.3

## Миниатурные конденсаторы

Т и п	Краткая характеристика	Размеры, мм	Диапазон номиналов	ТНХх10 <sup>6</sup> /°С	$\delta d$ , %	Диапазон раб. темпер., °С
КДС	Керамические литые секционные для печатного монтажа	3х3х3 3х4х4 3х5х5 3х5х8	10+33000пф 30+63000пф 50+130000пф 130+200000пф	-50+-1500	0,02+0,08	-60++85
К10+23	Керамические для печатного монтажа	Д=1,7+6,7	47+100000пф	Н10, Н50	0,01+0,2	-60++70
К73П-3	Металлоленочные микромодульные для печатного монтажа	11х11х18	0,05+1,0мкф	-200	1,5	-60++125
ПМ	Полиэстерные для печатного и навесного монтажа	Д=3,4 L=9,0	100, 300 и 510пф	-200		
К50-6	Электrolитические для печатного и навесного монтажа	Д=4,0+10,5 L=13,0	до 50 мкф 10в и 100 мкф 6в	-20++80%		-10++70 (при +85°-0,5V раб.)



I	2	3	4	5	6	7
K52-4A	Электролитические объемно-пористые для печатного и навесного монтажа	$D=1,5+2,5$ $L=5+7,5$	0, I, ±10, 0 мкФ		20 при 3в 10 при 50в	-40++70
K53-I	Оксидно-полупроводниковые для печатного и навесного монтажа	$D=3,2+4,0$ $H=7,5+13,0$	до 6,8 мкФ 30в и 22 мкФ 6в	±10, ±20, ±30%	Ток утечки менее 20 мкА при +85°С	-60++85
KI 0V-5	Оксидно-полупроводниковые для печатного монтажа	$D=6,0$	6800+22000мФ 10 и 25в	H50	3,5+5,0	-60++85
K53-6A	Оксидно-полупроводниковые для печатного монтажа	$D=10,5$	4,7 мкФ от 30в+ 100 мкФ 6в		50+55	-60++125
K50-16	Электролитические для печатного и навесного монтажа	$D=4+7,5$ $H=13,0$	до 1 мкФ 160в и 50 мкФ 6в	-20%+-80%	35	-20++70 (при снижении U рас. до+85°)
KП4-3	Керамические дружок-ционные переменной емкости для печатного монтажа	IIKIIKII	40+20мФ 5+150мФ 8+220мФ		30	-25++50

## 2. Конденсаторы

Основные характеристики миниатюрных конденсаторов, применяемых в микроволновой аппаратуре, приведены в табл. III.3. Миниатюрные конденсаторы в зависимости от принципа работы и применяемых материалов разделяются на керамические, металлопленочные, электролитические и оксидно-полупроводниковые. Некоторые из этих конденсаторов могут использоваться в гибридных интегральных микросхемах (например, керамические конденсаторы типа КЛС и КТО-22 (рис. III.7), электролитические конденсаторы типа К52-4 (рис. III.8), и К50-6 (рис. III.9), оксидно-полупроводниковые конденсаторы типа К53-4А и др.)

Миниатюрные керамические конденсаторы обладают весьма высокими характеристиками: температуростойки, электрически прочны (пробивное напряжение достигает  $40+50$  км/мм), высокое удельное объемное сопротивление изоляции ( $10^{12}+10^{14}$  ом.см), очень маленькие диэлектрические потери (порядка  $2+8 \cdot 10^{-4}$ ).

По температурному коэффициенту емкости керамические конденсаторы имеют большой диапазон значений: для емкостей от 10 до 1300 пф -  $50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , от 10 до 2800 пф -  $-700 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , от 10 до 10000 пф -  $-1500 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , от 100 до 200000 пф - нелинейный. В качестве диэлектрического материала в керамических конденсаторах используются титанат циркония ( $\epsilon = 27+38$ ), титанат кальция ( $\epsilon = 150+270$ ), титанат стронция и висмута ( $\epsilon = 1000+7500$ ). Наружная поверхность конденсаторов покрыта слоем глазури или стекломали для защиты от влаги.

Конденсаторы, изготовленные из керамики со средней величиной диэлектрической постоянной ( $\epsilon = 90$ ), в основном используются как термокомпенсирующие конденсаторы в настроенных контурах. Коэффициент мощности таких конденсаторов невелик и при высоких частотах может быть меньше чем 0,0003.

Керамические конденсаторы с большой диэлектрической постоянной ( $\epsilon > 1000$ ) имеют очень большую удельную емкость, однако величина емкости и коэффициент мощности значительно меняются с изменением температуры, причем эти изменения могут быть нелинейного характера и нецикличны для тех или иных свойств. Так, например, конденсаторы из керамики с  $\epsilon = 1200$  имеют высокую пиковую емкость

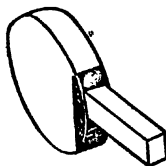


Рис. Ш.7. Конденсатор типа КЮ-22

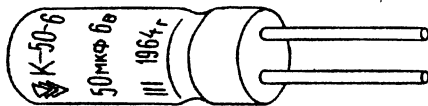


Рис. Ш.9. Конденсатор типа К-50-6

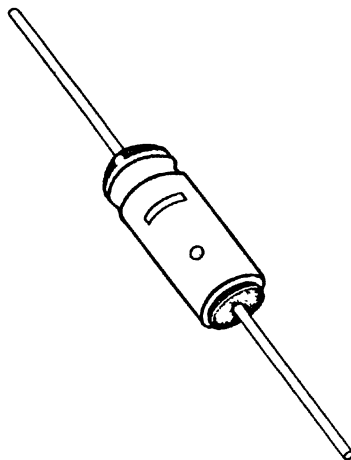


Рис. Ш.8. Конденсатор типа К52-4А

(точка Кюри) при температуре около  $110^{\circ}\text{C}$ , в 2-3 раза большую, чем при комнатной температуре, и другую, много меньшую, при температуре около  $-10^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент мощности будет минимальным при температуре от  $+20$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  и равняется примерно 2%. Материалы с большими диэлектрическими постоянными имеют пики при других температурах. В общем случае, чем выше диэлектрическая постоянная, тем чувствительнее керамический конденсатор к изменению температуры.

Кроме изменений, вызванных температурой, емкость таких конденсаторов понижается и под влиянием градиента напряжения постоянного тока, особенно в пиковых точках. При комнатной температуре может произойти уменьшение емкости до 20%, в то время как в точке Кюри можно ожидать уменьшения емкости до 50%. Поэтому рабочее постоянное напряжение таких конденсаторов обычно ниже, чем у керамических конденсаторов с малой диэлектрической постоянной.

Эти конденсаторы подвержены гистерезису и пригодны для работы только с очень малыми переменными напряжениями. Они обычно используются как высокочастотные блокировочные конденсаторы, но могут также применяться и для междукаскадного соединения при условии, что емкость их будет достаточно большой при любых условиях работы. Свойства конденсаторов из керамики с высокой диэлектрической постоянной настолько сильно меняются с изменением температуры и напряжения, что для них невозможно привести достаточно общие электрические характеристики.

Металлопленочные конденсаторы, в которых в качестве диэлектрика используется тонкая пленка пластического материала, в настоящее время в основном изготавливаются из лавсана (К73П-3) или полистирола (ПМ). Основной характеристикой этого типа конденсаторов является их чрезвычайно большое сопротивление изоляции при комнатной температуре. С увеличением температуры сопротивление изоляции этих конденсаторов хотя и несколько снижается, но остается всегда выше сопротивления изоляции бумажных конденсаторов при таких же температурах. Коэффициент мощности невелик и не зависит от частоты. Температурный коэффициент имеет отрицательное значение и не превышает  $-200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Емкостная стабильность - порядка 0,5%, диэлектрическая постоянная - около 2,5.

Электролитические конденсаторы имеют очень большую удельную емкость, особенно при низких рабочих напряжениях (3+6в).

Эти конденсаторы используются в основном для фильтрации и блокировки низких частот, но могут также применяться с целью накопления энергии для формирования мощных импульсов тока.

В электролитических конденсаторах из алюминиевой фольги (К50-6) поверхность фольги для увеличения ее площади подвергается травлению и затем "формируется" методом анодного окисления в борной ванне с постепенно возрастающим прикладываемым напряжением.

Электрические свойства таких конденсаторов широко изменяются в зависимости от различных условий применения. Так, при повышении температуры от +20 до +70°C наблюдается небольшое (до 10%) увеличение емкости. Постепенное уменьшение емкости происходит при понижении температуры до -30° и очень быстрое уменьшение при еще более низких температурах. Уменьшается также емкость и с увеличением частоты выше 50 гц; при 10 кгц она уменьшается на 10%. Коэффициент мощности при 50 гц и комнатной температуре находится в пределах от 2 до 5%. При +70°C наблюдается небольшое повышение и значительное повышение при температурах ниже -30°C. Значительное увеличение коэффициента мощности наблюдается также при увеличении частоты: при 10 кгц он может увеличиться до 50%.

В электролитических конденсаторах обычно учитывается ток утечки, а не сопротивление изоляции, которое очень мало. Изменение величины тока утечки прямо пропорционально изменению температуры и имеет малое значение при температуре ниже -30°C. При +70°C величина тока утечки может быть примерно в 10 раз больше, чем при комнатной температуре. Кроме того, ток утечки увеличивается от нагрузки, причем он будет очень большим в момент приложения, затем быстро падает и примерно через минуту приближается к постоянному значению.

Электролитические конденсаторы, если они долго хранились без приложения напряжения, следует предварительно подвергнуть формированию, которое осуществляется путем приложения рабочего напряжения через дополнительное сопротивление в 1000 ом в течение часа.

Оксидно-полупроводниковые конденсаторы изготавливаются на основе тантала, поэтому их еще называют танталовыми конденсаторами. Танталовые конденсаторы имеют большой срок службы и при длительном хранении не требуют периодического формования.

Коэффициент мощности таких конденсаторов значительно изменяется с изменением температуры и напряжения. При 50 гц он может быть равен 12% при  $+70^{\circ}\text{C}$ , 8% - при комнатной температуре и 20 и более процентам при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  (при 25 в ). Коэффициент мощности увеличивается с уменьшением рабочего напряжения. Наиболее интересной особенностью танталовых конденсаторов является исключительно низкий ток утечки, который может иметь величину порядка 3-5 мка при комнатной температуре сразу после включения напряжения и уменьшаться до долей микроампера за один-два часа.

Танталовые конденсаторы могут применяться как развязывающие конденсаторы, но их не следует применять в мощных цепях переменного тока, потому что в этих условиях они имеют малое пробивное напряжение. При использовании их в качестве конденсаторов связи могут наблюдаться некоторые небольшие искажения формы импульсов - изменение крутизны фронта из-за фазовых изменений, вносимых имеющимся небольшим последовательным сопротивлением. На высоких частотах потери значительно возрастают и могут достигать 100% на 10 Мгц

Конденсаторы типа К52-4А изготавливаются как в нормальном, так и в тропическом исполнении и могут иметь отклонение емкости от +50 до -20%.

### 3. Магнитные сердечники для катушек индуктивности и трансформаторов

Для миниатюрных электронных устройств отличительным является использование в качестве активных элементов транзисторов, характеризующихся по сравнению с радиолампами значительно более низкими уровнями сигналов и источников питания как по напряжению, так и по току. Это существенно облегчает задачу миниатюризации катушек индуктивности и трансформаторов, так как обычные уровни мощности, используемые в транзисторных схемах, требуют лишь несколько граммов (или долей грамма) магнитного материала сердечника. Поскольку для транзисторных схем приемлемо довольно высокое сопротивление обмоток, оказывается возможным уменьшить до минимума объем, требующийся для обмоток.

При уменьшении размеров толщина сердечника для низкочастотных трансформаторов может быть уменьшена до толщины одной пластины, так что становится возможной штампованная или монолитная конструкция сердечника. С целью максимального уменьшения габаритов магнитная цепь должна иметь наименьшее поперечное сечение. Поскольку длина провода обмотки зависит от площади магнитной цепи, на которую намотан провод, то диаметр используемого провода должен быть значительно уменьшен. Это в свою очередь ведет к уменьшению объема, требующегося для обмотки, и соответственно длины магнитной цепи.

Таким образом, миниатюрная конструкция катушки индуктивности или трансформатора характеризуется плотной компоновкой, минимальной толщиной катушки и отсутствием нерационально используемых объемов. Обычно это приводит к снижению эквивалентной сосредоточенной емкости обмоток, поэтому миниатюризация может привести и к увеличению ширины полосы частот.

Наиболее эффективной формой сердечника является тороид. Сердечники, выполненные из чашечек ("горшочков") или плоских пластин, имеют довольно значительный эффективный воздушный зазор и характеризуются менее рациональным использованием поперечного сечения в связи с неравномерным насыщением в местах соединений.

Форма слоистых сердечников зависит от требуемой величины эффективного воздушного зазора. Минимальный зазор достигается при использовании пластин Ш-образной формы с последующим механическим уплотнением набора. При использовании пермалловых пластин толщиной менее 0,3 мм вполне достаточно изолировать поверхности пластин слоем окиси определенной толщины, которая создается впусканием ограниченного количества воздуха во время тепловой обработки пластин.

Для герметизации миниатюрные катушки индуктивности и трансформаторы заключаются в капсулы или заливаются компаундом после предварительной пропитки лаком.

Некоторые типы выпускаемых промышленностью миниатюрных магнитных сердечников приведены в табл. Ш.4. В табл. Ш.5 приведены микропровода, используемые для изготовления современных миниатюрных катушек индуктивностей и трансформаторов.

Современные микропровода, применяемые для изготовления миниатюрных катушек индуктивностей и трансформаторов, имеют стеклянную изоляцию, что позволяет использовать эти изделия в сложных климатических условиях. Так, эти микропровода могут работать в условиях тропической влажности, при воздействии солнечной радиации. Изоляция микропроводов не теряет своих высоких электроизоляционных свойств при воздействии морского тумана и плесневых грибов, а также водных растворов неорганических кислот и щелочей.

Миниатюрные катушки индуктивности и трансформаторы могут изготавливаться и без использования сердечников, что позволяет получить особо малые габариты. Так, на основе микропровода при диаметре катушке 2,3 мм и высоте 2,2 мм возможно получить индуктивность до 6300 мкГн при добротности до 50. В этих же габаритах возможно создавать импульсные двух- и трех-обмоточные трансформаторы по длительности импульсов 0,5+1,5 мксек (частота следования 0,1+1,5 МГц) при спаде плоской вершины не более 10%.



Т а б л и ц а Ш . 4

## Миниатюрные магнитные сердечники

Т и п	Краткая характеристика	Материал	Форма	Габариты, мм
СПГ	Цилиндрические гладкие сердечники	Карбонильное железо	Цилиндр	D=1,2;1,4;1,6;1,8;2,0;2,5;2,8; 3,0 и более H=4,0;4,5;5,0;5,5 и более
СБ	Броневые сердечники	Карбонильное железо	"Торшок"	D=6,5;9,0 и более H=6,4;7,6 и более
Б	Броневые сердечники	Феррит	"Торшок"	D=6,5;9,0 и более H=6,4;7,6 и более
-	Кольцевые сердечники	Феррит	Торояд	D=0,6;0,8;1,0;1,2;1,4 и более H=0,2;0,3;0,4 и более
ШХ4 ШХ6,4	Ш-образные пластины	Пермаллой	Ш	10,5x12

## Т а б л и ц а Ш.5

## Макропровода в стеклянной изоляции

Параметры	Материал жилы провода					
	медь	серебро	никель	манганин	сплав 60НГХ	сплав 63НГХ
Диаметр по жиле, мм	10+200	10+70	3+20	3+20	3+20	3+20
Диаметр по изоляции, мм	18+280	20+105	10+32	15+26	12+35	12+35
Сопротивление I пог.м	-	-	-	55000+2000 $\times$ )	180000+6000 $\times$ )	180000+5000 $\times$ )
Интервал рабочих температур не более, град.	-60+400	-60+400	-60+400	-60+80	-60+155	-60+155
Температурный коэффициент сопротивления (1/°C)	-	-	-	( $\pm 1,5 \pm 6$ ).10 <sup>-5</sup>	(-3+5).10 <sup>-5</sup>	(+3+5).10 <sup>-5</sup>
Разрывное усилие не менее, г	15+250 $\times$ )	20+200 $\times$ )	4+20 $\times$ )	5+9 $\times$ )	4+25 $\times$ )	4+25 $\times$ )
Отношение допускаемого диаметра провода к диаметру намотки	150	150	150	150	150	150

Примечание.  $\times$ ) Первое число относится к проводу меньшего диаметра, второе - к проводу большего диаметра.

#### 4. Миниатюрные и бескорпусные транзисторы и диоды

Как выше указывалось, транзисторы за последние годы, так же как и пассивные элементы, подвергались миниатюризации, в результате чего объем корпусных транзисторов был уменьшен почти на порядок по отношению к типовому корпусу типа Т0-5. Ниже в главе 1 приведены основные параметры некоторых миниатюрных транзисторов в металлических корпусах, наиболее часто применяемых в миниатюрных радиоэлектронных устройствах.

Однако в гибридных микросхемах миниатюрные корпусные транзисторы, как правило, не применяются, так как их размеры оказываются для этого недостаточно малыми. За последние годы появился целый ряд так называемых бескорпусных миниатюрных транзисторов, или микротранзисторов, у которых отсутствует металлический корпус. На рис. III.10-III.14 представлены возможные виды микротранзисторов, отличающиеся герметизацией или формой выводов. В простейшем случае микротранзистор - кристалл полупроводника с мягкими золотыми выводами электродов, одна или все поверхности которого защищены тонким слоем изолирующего и герметизирующего компаунда (рис. III.10). На рис. III.11 изображены микротранзисторы, опрессованные в пластмассу и имеющие выводы в виде тонких металлических полосок. Кристалл транзистора, установленный на керамическое основание с металлическими выводами в виде выступов, представлен на рис. III.12. На рис. III.13 изображен микротранзистор с жесткими выводами, поверхность которого защищена герметизирующим компаундом. На рис. III.14 приведены рекомендуемые размеры для конструкций бескорпусных транзисторов и диодов с жесткими выводами. Основные параметры некоторых типов бескорпусных транзисторов приведены в табл. III.6.

В табл. III.7 приведены параметры миниатюрных и бескорпусных диодов, применяемых в приемно-усилительных и импульсных электронных устройствах. Миниатюрные диодные сборки (матрицы), помещенные в корпуса или опрессованные в пластмассу, имеют конструкцию и размеры, подобные микросхемам.

Для использования в составе гибридных микросхем удобны конструкции бескорпусных диодных матриц.

Т а б л и ц а Ш.6

## Бескорпусные транзисторы

Основные параметры	"Плюскость" 2Т-317	"Полярост" 2Т-307 П-Р-П	"Лисема" 2Т-332 П-Р-П	"Погода-11" 2Т-324 П-Р-П	"Пинчер" А-518 Р-П-Р	"Пунчер" А-518 Р-П-Р
Предельная частота, МГц	100	250	300+500	800	2000	10( $f_{д.} > 5$ )
Напряжение коллектор- саза, в	5	10	15	10	10	15
Напряжение эмиттер- саза, в	3,5	3	3+5		0,5	1
Мощность рассеивания, мвт	5	15	10	15	30	15
Ток коллектора, ма	10	20	20		5	10
Коэффициент шума на 100 МГц, дб	5		3		5	6+12
Емкость коллектора, пф	11	6	5	2,5	2	40
Емкость эмиттера, пф	22	3	10	2,5	2	25
Время рассасывания, нсек	130	30	50	20+25	50	250

1	2	3	4	5	6	7	8	9
КП-907	Кремниевая бескорпусная диодная матрица из 4 диодов с общим катодом на импульсный ток 0,8а							
КП-908	Кремниевая импульсная (до 1,5а) диодная матрица из 8 диодов с общим катодом в плоском керамическом корпусе		1,2/220	10/40	6	5,0	40	-60+-85
КП-909	Кремниевая диодная матрица из 8 диодов с общим катодом в пластмассовом корпусе	1,2х6х2,5			50	5,0		
2А-503	Миниатюрный диод для работы в СВЧ-узлах СМ и ДМД диапазона	П-1,3 Н=0,5	3-5 см			0,3+0,4	10	-60+-125
2А-505	Сдвоенный миниатюрный диод для работы в СВЧ-узлах СМ и ДМД диапазонов	П-1,3 Н=0,5	3-5 см (на диод)			0,3+0,4 (на диод)	100	-60+-125

Миниматрицы и бескорпусные диоды и диодные сборки (матрицы)

Т и п	Краткая характеристика	Размеры, мм	Прямое напряжение, в при прямолиней- ном токе, ма	Обратный ток, мка при соф. напряже- нии, в	Время выкло- чения, нсек	Параз. емкости меньше напр., в	Макс. соор. напр., в	Рабочий диа- пазон темпе- ратур, град.
I	2	3	4	5	6	7	8	9
КД-901	Кремниевая бескорпусная диодная матрица из 4 ди- одов с общим катодом	0,8x0,8x0,2	0,4/0,01 0,7/1,0	0,2/10	20	4,0	10	-60+85
КД-902	Кремниевая бескорпусная диодная матрица из 4 ди- одов с общим анодом	0,8x0,8x0,2	0,55/0,01 0,82/1,0	0,2/5	10	2,0	5	-60+85
КД-903	Кремниевая диодная матри- ца из 8 диодов с общим катодом в пластмассовом корпусе	1,2x6x2,5			150	15,0		
КД-904	Кремниевая бескорпусная диодная матрица из 4 диодов с общим анодом	0,8x0,8x0,2	0,45/0,01 0,8/1,0	0,2/10	10	2,5	10	-60+85

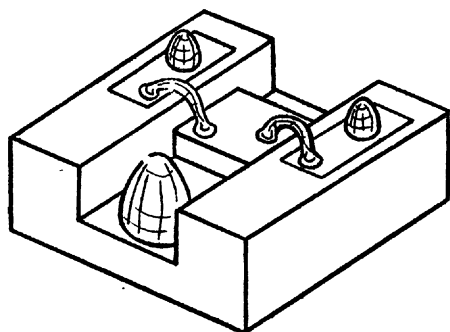


Рис. Ш.10. Бескорпусный  
транзистор с мягкими  
выводами

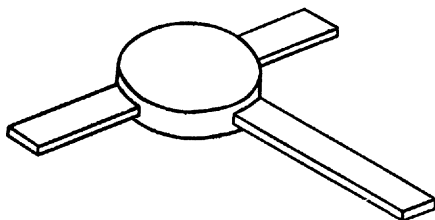


Рис. Ш.11. Транзистор в пласт-  
массовой оболочке

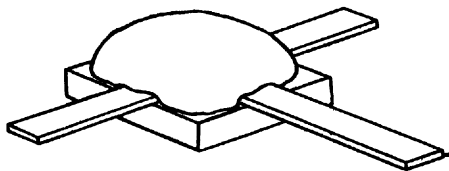


Рис. Ш.12. Транзистор с керами-  
ческим основанием

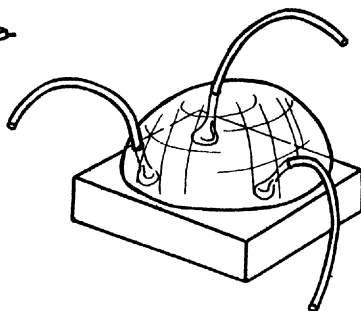


Рис. Ш.13. Бескорпусный  
транзистор с жесткими  
выводами

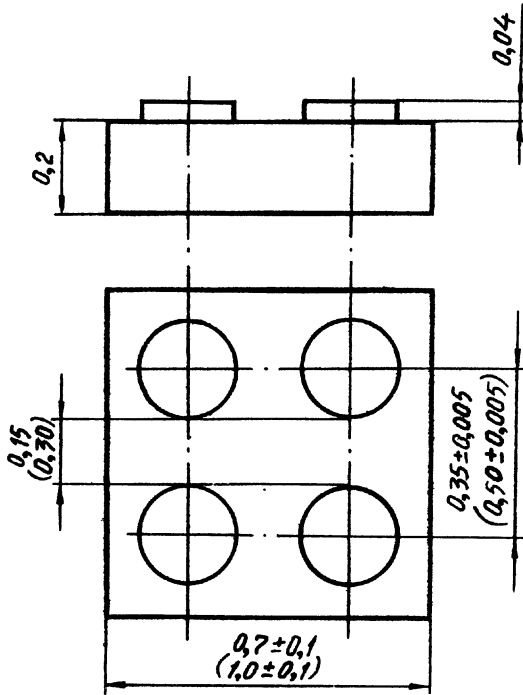


Рис. Ш.Г4. Нормализованные размеры бескорпусного полупроводникового прибора



Особое место среди миниатюрных диодов занимают специальные диоды: индикаторные световые диоды и диоды-варикапы. В качестве примера можно указать на световые индикаторные диоды типа КЛ-101 (желтый свет) и КЛ-102 (красный свет), которые имеют размеры  $1 \times 1 \times 0,5$  мм, при напряжении 5,5 в потребляют ток в 10 ма и дают яркость в 20+50 НИТ. Варикап типа 2В102 имеет размеры  $1 \times 1 \times 0,5$  мм, рабочее напряжение - 80 в, добротность - 110 и может изменять емкость от 15 до 40 пф.

### 5. Миниатюрные пьезокерамические фильтры

На рис. Ш.15 изображены миниатюрные пьезокерамические фильтры типов ПФП-1М и ПФП-2, предназначенные для использования в усилителях промежуточной частоты радиовещательных транзисторных приемников Ш-IV и I-II классов. Основные параметры этих фильтров приведены в табл. Ш. 8.

Существенное дальнейшее уменьшение габаритов пьезоэлектрических фильтров основано на использовании новых функциональных устройств, в которых наряду с известными электрическими процессами учитываются другие физические явления, возникающие в твердых телах.

В последние годы достигнуты значительные успехи в разработке интегральных полосковых кварцевых фильтров, которые работают на основной гармонике в диапазоне от 30 гц до 30 Мгц. В отличие от используемых в настоящее время пьезокерамических фильтров, содержащих несколько кварцевых резонаторов, каждый из которых заключен в отдельный герметичный корпус, в интегральном фильтре все резонаторы, акустически связанные между собой, размещаются на одной пластине кварца АТ-среза в одном корпусе. Объем и вес таких интегральных фильтров примерно в 100 раз меньше, чем обычных кварцевых фильтров. Фильтры нового типа характеризуются высокими рабочими параметрами и большой надежностью в эксплуатации, конструкция их удобна для использования в микроволновых устройствах.

Определенные успехи достигнуты и в создании миниатюрных высокочастотных пьезоэлектрических фильтров, работающих на гармониках в диапазоне частот от 50 до 500 Мгц.

Т а б л и ц а Ш.8

Основные характеристики пьезокерамических фильтров

Основные параметры	КФП-1М	КФП-2
Средняя частота полос пропускания $f_{cp}$ , кГц	465±2,5	
Нагрузочные сопротивления:		
входное	1,2ком±15%	
выходное	600ом±15%	
Ширина полос пропускания по уровню 6 дБ, кГц	6,5-10	8,5 -12,5
Неравномерность затухания в полосе пропускания, дБ	Не более 3	
Вносимое затухание, дБ	Не более 12	
Затухание на частоте, дБ		
$f_{cp} \pm 10$ кГц	Не менее 41	Не менее 38
$f_{cp} \pm 20$ кГц	Не менее 40	Не менее 38
Климатические и механические воздействия:		
интервал рабочих температур (°С)	-10-+50	
относительная влажность воздуха при температуре 40±5°С	95±2%	
атмосферное давление, мм рт.ст	Не ниже 450	
вибрации в диапазоне частот 20-150Гц	С ускорением не более 3,5g	
ударные нагрузки	С ускорением не более 44g	
Габаритные размеры, мм	37x24x11	
Вес, г	10	

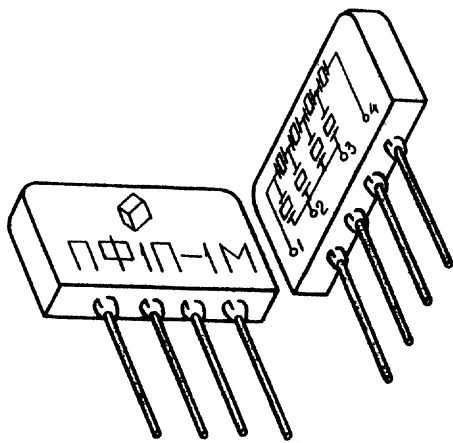


Рис. Ш.15. Пьезокерамические фильтры типа КФП

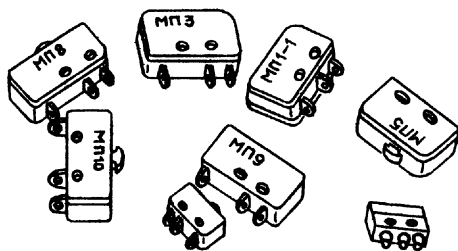


Рис. Ш.16. Микропереключатели типа МП

6. Микропереключатели

На рис. Ш.16 изображены микропереключатели типа МП, предназначенные для коммутации электрических цепей постоянного и переменного токов. Основные параметры этих переключателей приведены в табл. Ш.9.

Т а б л и ц а Ш.9

Микропереключатели

Т и п	Основные параметры				
	размеры, мм	постоянный рабочий ток при напря- жении	предельный рабочий ток при напря- жении	количество переключе- ний	рабочий диапазон температур
МП-1	20x8x6,7	0,05+1а/ 3+30в	2а/250в	100000	-60++200 <sup>0</sup> С
МП-3 МП-5		0,5+4а/ 3+30в	3а/250в	100000 200000	-60++200 <sup>0</sup> С -60++125 <sup>0</sup> С
МП-7	12,5x9,7x5	0,05+0,50/ 3+30в	0,5а/220в	20000	-60++100 <sup>0</sup> С
МП-9	20x13x7	0,05+1а/ 3+30в	2а/250в	100000	-60++125 <sup>0</sup> С
МП-10		0,5+4а/ 3+30в	3а/250в	100000	-60+ 125 <sup>0</sup> С
МП-11				200000	-60+ 125 <sup>0</sup> С
МП-12	11,9x9,2x 4,4	10 <sup>-6</sup> а/ 0,5+30в	-	10000	-60+ 125 <sup>0</sup> С

7. Миниатюрные реле и другие компоненты

Среди миниатюрных реле наиболее широко используются реле типа РЭС-10, РЭС-15, РЭС-48 и РЭС-49. Указанные реле имеют вес от 3 до 10 г, ток срабатывания от 5 до 35 ма, переключают напряжение до 30 в при токе переключения до 2а и допускают до 100000 переключений.

Основные параметры некоторых других компонентов в миниатюрном исполнении - низкочастотных трансформаторов, линий задержки, резьбов, сигнальных фонарей и др. - приведены в главе У.

## Г л а в а IV

### УПЛОТНЕННЫЙ МОНТАЖ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЫЧНОЙ ФОРМЫ

#### I. Плоские модули

За последние годы благодаря развитию полупроводниковых приборов и печатного монтажа достигнут известный прогресс в уменьшении габаритов электронных узлов. Однако, даже при использовании современных миниатюрных радиодеталей, полупроводниковых приборов и печатного монтажа, плотность заполнения объема радиоэлектронной аппаратуры радиодетальями остается еще очень низкой. Это объясняется несовершенством конструктивных форм большинства типов деталей, нерациональным использованием их внутреннего объема, а также трудностью механизации сборки узлов из них.

Механизация и автоматизация процессов изготовления, повышающие надежность и снижающие стоимость аппаратуры и ее узлов, могут быть эффективно осуществлены не для любых конструкций. Для того, чтобы радиоэлектронные модули можно было собирать на автоматах, надо конструкции их создавать по определенным правилам, обеспечивающим "легкость" автоматизации производства.

Так, для обеспечения большей возможности механизации и автоматизации модули следует выполнять только на печатном монтаже с односторонним расположением деталей на печатных платах. Сборка модулей на печатном монтаже исключает случайные ошибки, возможные при объемном монтаже. За счет снижения трудоемкости монтажных работ при печатном монтаже снижается стоимость модулей.

Наиболее рациональной и простой формой модулей с печатным монтажом является плоская прямоугольная форма. В плоских модулях при одностороннем открытом расположении навесных деталей имеется возможность осуществления механизированной сборки деталей на автоматической линии и пайки их погружением платы в припой. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются различные унифицированные функциональные модули на полупроводниковых приборах в виде плоских конструкций.

Плоские унифицированные модули (ПУМ) изготавливаются на печатных платах унифицированных размеров. Предусмотрены следующие ряды печатных плат для плоских модулей:

1 - 34х (12, 26, 40, 54, 68, 82, 110, 124 и 138) мм;

2 - 70х (82, 110 и 124) мм.

Максимальная толщина плоских модулей равна 14 мм. Отклонение от указанных размеров не допускается более чем на  $\pm 1$  мм.

Конструкция выводов плоских модулей допускает не менее пяти перепаек без ухудшения качества электрического контакта и механической прочности, что обеспечивает возможность замены модулей в узлах и блоках.

Номинальные значения питающих напряжений плоских унифицированных модулей стандартизованы и соответствуют следующим значениям: 0,6; 1,2; 2,4; 4,0; 6,3; 10; 12,6; 20; 27В. Электрические параметры ПУМ остаются в пределах норм ЧТУ при изменении питающих напряжений не менее чем на  $\pm 10\%$ .

Надежность плоских унифицированных модулей в течение срока службы (5000 ч) в рабочих режимах и условиях эксплуатации, оговоренных в ЧТУ, определяется средней интенсивностью отказов

$$\lambda = (10^{-5} + 10^{-6}) \text{ I/ч.}$$

В виде плоских модулей промышленностью выпускается широкая номенклатура различных функциональных узлов, в том числе:

комплекс потенциально логических схем для универсальных ЭВМ на рабочие частоты 100, 800 и 1500 кГц;

комплекс импульсно-потенциальных логических схем на рабочие частоты до 1500 кГц;

триггеры на частотах 500, 1000 и 1500 кГц;

усилители низкой частоты на диапазон частот от 20 гц до 100 кГц;

видеоусилители и усилители импульсов длительностью от 3 до 10 мксек;

генераторы пилообразных напряжений длительностью от 30 до 2500 мксек;

блокинг-генераторы автоколебательные (160 гц+160 кГц) и ждущие (0,25+10 мксек);

мультивибраторы автоколебательные (160 гц+100 кГц) и ждущие (10+2500 мксек) и др.

Подробные электрические и эксплуатационные характеристики унифицированных функциональных плоских модулей приведены в каталогах и справочниках, выпускаемых радиопромышленностью.

Плотность заполнения таких модулей в лучшем случае достигает только 1 детали/см<sup>2</sup>. Дело в том, что габариты плоских модулей на печатных платах определяются не только размерами и конструкцией деталей, используемых в этих модулях, но и допустимыми минимальными расстояниями между отдельными деталями. Анализ конструкций модулей, выпускаемых промышленностью, показывает, что собственно детали занимают менее 40% площади печатной платы, объединяющей эти детали. Причина этого в том, что вследствие малых габаритов миниатюрные детали не могут иметь очень жесткие и прочные выводы, с помощью которых детали электрически и механически соединяются с несущей печатной платой. Поэтому для предотвращения замыкания выводов различных деталей в условиях больших вибраций и ударов эти детали размещаются на печатной плате с относительно большими промежутками друг от друга. Свободное размещение деталей в этих модулях определяется также различной формой и конструкцией миниатюрных деталей, что не позволяет оптимально использовать площадь несущей печатной платы.

## 2. Колончатые и сварные модули

Уплотнить монтаж модулей при использовании обычных деталей возможно за счет использования деталей, близких по габаритам и форме, а также за счет резкого уменьшения промежутков между отдельными деталями. Однако с целью сохранения необходимой механической и электрической прочности схемы приходится отказываться от простой открытой конструкции плоских модулей и переходить к модулям, в которых промежутки между деталями заполнены диэлектрически связующим веществом типа пенополиуритана, эпоксидной смолы или каким-либо другим компаундом. Переходной конструкцией между плоскими открытыми модулями и объемными закрытыми модулями послужила конструкция модулей-сборок из пассивных элементов, так называемых "блоков-переходников".

Блоки-переходники - условное название пассивных узлов-модулей, содержащих конденсаторы и резисторы, соединенные по определенной схеме. Промышленность выпускает блоки-переходники для

ламповых телевизоров (блоки типа П) и полупроводниковых телевизоров (блоки типа ББ).

Основой конструкции модулей типа П является стеклокерамическая плата с возведенными проводниками из серебряной пасты. На плате смонтированы ниточные композиционные (типа СЗ-З) и станатные (типа С2-12) резисторы и керамические дисковые конденсаторы (от 3 до 6 штук). К контактным площадкам платы припаяны выводы модуля.

Внешней защитой модуля является капроновый корпус. Размеры модуля -  $32 \times 24 \times 8,5$  мм, вес - 9 г, коэффициент упаковки -  $0,6 \pm 0,9$  эл/см<sup>3</sup>. Допустимая мощность рассеяния на модуль - до 1 вт. Интервал рабочих температур - от +10 до +70°C.

Основной конструкцией модулей типа "ББ" является гетинаксовая печатная плата с двухсторонним монтажом. На плате монтируются ниточные резисторы (1-6 шт.) типа СЗ-З и С2-12 и диски конденсаторов (1-3 шт.) типа КД и К10-5 (всего 6 элементов). Герметизация модулей производится с помощью алюминиевого корпуса.

Размеры модуля -  $20 \times 12 \times 4$  мм, вес - 2,5 г, коэффициент упаковки -  $5,2 \pm 6,2$  эл/см<sup>3</sup>. Допустимая мощность рассеяния на модуль - до 0,25 вт. Интервал рабочих температур - от +20 до +70°C.

Блоки-переходники упрощают сборку узлов аппаратуры, повышают ее надежность и плотность упаковки, облегчают отыскание неисправностей и ремонт аппаратуры.

Конструкции функциональных модулей с уплотненным монтажом миниатюрных деталей обычной формы, как указывалось ранее, известны под названием колончатых и сварных модулей.

Колончатые модули собираются из миниатюрных деталей по возможности одинаковых габаритов и форм, расположенных параллельно друг к другу и соединенных электрически и механически с помощью двух печатных плат. Сборка из деталей и печатных плат заливается в форме компаундом. Некоторые типы колончатых модулей для увеличения их влагостойкости герметизируются с помощью металлических капсул. Технология изготовления таких модулей мало чем отличается от обычных открытых плоских модулей. Для изготовления печатных плат, металлических капсул, а также для сборки и пайки колон-



чатых модулей может быть использовано обычное технологическое оборудование и оснастка, используемые при изготовлении узлов аппаратуры на печатном монтаже.

Во избежание возникновения механических напряжений в выводах при работе модулей в широком диапазоне температур на детали и их выводы после операций сборки и пайки наносится защитное лаковое покрытие. Это покрытие предотвращает адгезию эпоксидного компаунда к деталям и выводам и тем самым снижает механические напряжения в выводах (эти напряжения в диапазоне температур от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  могут достигать  $10 \text{ kg}$ ). Снижению напряжений способствуют также изгибы на выводах радиодеталей.

Для повышения надежности электрического и механического соединения деталей внутри колончатого модуля в некоторых случаях вместо печатных плат и пайки используются объемные проводники и сварка. Такие конструкции модулей называют сварными модулями.

Соединение выводов отдельных деталей друг с другом осуществляется дуговой сваркой в атмосфере инертного газа (например, аргона) с помощью проволочных перемычек из объемных проводников или плоских ленточных проводников, предварительно укрепленных на тонкой лавсановой или майларовой пленке.

Колончатые или сварные модули могут быть объемно-плоскостной конструкции с наиболее высоким коэффициентом упаковки при использовании деталей обычной формы. В этом случае в составе одного функционального модуля имеется несколько плат с деталями, установленными в плоскости платы. Рациональная установка деталей, расположенных на различных платах, по отношению друг к другу, приводит к весьма эффективному использованию объема модуля.

Уплотненный монтаж обычных современных миниатюрных деталей с использованием полупроводниковых приборов позволяет получить плотность заполнения в модулях порядка  $3+5$  деталей в  $1 \text{ см}^3$ , т.е. более чем в  $3-5$  раз повышается плотность заполнения по отношению к открытым плоским модулям, выполненным с использованием миниатюрных деталей, полупроводниковых приборов и печатного монтажа.

Надежность колончатых и сварных модулей примерно на порядок выше надежности обычных открытых модулей, несмотря на то, что используются в этих конструкциях одни и те же детали, так как

"доработка" деталей путем заливки компаундом повышает их электрическую и механическую прочность, а также улучшает распределение тепла внутри объема модуля.

Применение модулей из обычных миниатюрных радиодеталей (колечных, сварных и др.) не всегда позволяет получить требуемую высокую надежность. Существенное повышение надежности аппаратуры может быть достигнуто применением методов резервирования как отдельных радиодеталей, так и узлов, блоков и целых устройств. Однако в этом случае габариты аппаратуры соответственно увеличиваются, что совершенно недопустимо, особенно при конструировании малогабаритной аппаратуры.

Задачу повышения надежности работы аппаратуры можно решать только путем резкого уменьшения габаритов и веса узлов и блоков, из которых состоит аппаратура.

Сокращение габаритов и веса радиоэлектронной аппаратуры, повышение ее надежности возможно при использовании дискретных элементов специальной формы.

---

## Г л а в а У

### УПЛОТНЕННЫЙ МОНТАЖ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ (МИКРОМОДУЛИ)

#### 1. Конструктивно-технологические особенности микромодулей как системы дискретных элементов

Как уже указывалось выше, существует целый ряд факторов, затрудняющих или ограничивающих применение интегральных схем.

Так, при изготовлении полупроводниковых интегральных схем пока еще не научились точно управлять допусками на отдельные параметры элементов схем, что создает известные трудности при проектировании надежно работающих схем. Используемые в настоящее время исходные полупроводниковые материалы чувствительны к температуре окружающей среды, поэтому требуется температурная компенсация, а это усложняет схемы и аппаратуру. Технологическое оборудование для изготовления интегральных схем дорогое и сложное, оно не окупается в случае изготовления небольших партий схем. И несмотря на большие преимущества интегральных схем в отношении плотности и надежности, для построения миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры микромодули во многих случаях более предпочтительны.

Конструкция микромодуля совмещает в себе преимущества использования дискретных элементов и монолитных "твердотельных" конструкций. К важнейшим преимуществам использования дискретных элементов можно отнести<sup>х)</sup>:

выпуск деталей микромодулей (микрозлементов) как самостоятельных и законченных изделий;

большие схемные возможности за счет широкой номенклатуры микрозлементов с требуемыми допусками на их параметры;

возможность предварительного макетирования схем;

возможность относительно легкого изменения схемы в процессе производства;

сравнительно простая механизация и автоматизация процессов изготовления микромодулей.

х) "Микроэлектроника", перевод с англ. под ред. Богородицкого И.И.  
Москва "Советское радио", 1966г.

Дискретные элементы можно эффективно реализовать для самых разнообразных схем, начиная со схем постоянного тока, промежуточной и видеочастот и кончая высокочастотными, в том числе линейными и цифровыми схемами. Такой диапазон схемных возможностей обеспечивает микромодулям широкое распространение.

Возможность макетирования позволяет разработчику испытывать и изменять, если это необходимо, схему. При этом можно использовать элементы, идентичные тем, которые будут использованы в законченном изделии. При переводе макетов в весьма компактные микроузлы возникают нежелательные явления: увеличиваются паразитные емкости, укорачиваются пути токов утечек, увеличиваются взаимные связи между микроэлементами и тепловое рассеяние на единицу поверхности. Это общие недостатки для всех типов микроузлов. Для систем из дискретных элементов решение этих проблем (в общем случае) представляет наименьшую трудность.

В процессе производства схем иногда требуется лишь замена одного дискретного элемента другим, отличающимся от первого номинальным значением какого-либо параметра. Такая гибкость при конструировании и производстве устройств является важным экономическим фактором, который иногда предопределяет выбор метода микроминиатюризации.

Сборка микромодулей, состоящих из микроэлементов одинаковой формы, легко поддается механизации. Тесная взаимосвязь между малыми размерами микроэлементов и возможностью их автоматической сборки является весьма существенным фактором как с точки зрения надежности, так и с точки зрения стоимости микромодулей.

Монолитная "твердотельная" конструкция микромодуля обеспечивает повышенную электрическую и механическую прочность микроэлементов, улучшает распределение тепла внутри объема модуля, повышает влагостойкость микроэлементов, а также защищает микроэлементы от непосредственного воздействия таких неблагоприятных внешних факторов, как пыль, роса, туман, грибки и т.п.

Указанные выше преимущества микромодулей как системы дискретных элементов определяют широкое применение микромодулей в радиоэлектронной аппаратуре.

## 2. Типы микромодулей

Большинство микромодулей, применяемых в СССР и за рубежом, имеют "этажерочную" конструкцию, т.е. представляют собой "этажерку" из плоских радиодеталей постоянного поперечного сечения, соединенных по периметру друг с другом электрически и механически в единую конструкцию - микромодуль.

Наибольшее распространение получили микромодули с квадратным поперечным сечением, обеспечивающие плотность заполнения  $10+20$  дет/см<sup>3</sup>. Так, в США и Японии для микромодулей используются квадратные платы со стороной 7,6 мм, в ЧССР используется квадрат со стороной 10 мм.

Микромодули с прямоугольным поперечным сечением (10x15 мм) выпускаются в ГДР. Шестигранное поперечное сечение имеют микромодули ФРГ.

Широкое распространение "этажерочных" микромодулей объясняется рядом преимуществ этой конструкции, о чем будет сказано ниже.

Несколько похожа на "этажерочную" конструкция термоэлектронных микромодулей, выпускаемых в США фирмой "Дженерал Электрик." Элементы микромодуля, включая электронные диоды и триоды, изготовляются в виде дисков или колец диаметром 8 мм из керамики, титана и углерода и собираются в цилиндрический столбик. В цилиндре обеспечивается вакуум. Затем цилиндр спекают в монолитную конструкцию. В таких микромодулях нет цепей накала ламп - тепловая энергия для создания эмиссии электронов с катода поставляется из окружающей среды, так как эти микромодули предназначены для работы при температуре окружающей среды порядка  $500+550^{\circ}\text{C}$ . Микромодули обладают высокой надежностью, большой стойкостью к ядерному излучению. Плотность заполнения в термоэлектронных микромодулях находится в пределах от 15 до 30 дет/см<sup>3</sup>. Недостатком этих микромодулей является трудность получения в подобной конструкции больших емкостей и индуктивностей, поэтому возможности таких схем ограничены.

К модулям из деталей, имеющих специальную форму, относятся таблеточные микромодули. В таблеточных микромодулях США применяются радиодетали цилиндрической формы диаметром от 0,25 до 6,34 мм и высотой 0,76 и 1,52 мм. В Советском Союзе использовались детали-таблетки диаметром от 1 до 5 мм и высотой от 2 до 3,5 мм.

Радиодетали-таблетки размещают в отверстиях печатной платы, укрепляют терморезистивной смолой и соединяют с печатными проводниками пайкой или токопроводящим клеем. В виде таблеток выполняются резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы, трансформаторы. Для аналоговых схем, где часто требуется подстройка элементов, таблеточные плоские конструкции микромодулей менее пригодны, чем объемные этажерочные микромодули, так как лишь немногие подстраиваемые элементы можно выполнить в виде таблеток. Наиболее трудно выполнимыми являются подстраиваемые индуктивности и связанные контуры. Плотность заполнения в таблеточных микромодулях при автоматической сборке достигает 20 дет/см<sup>3</sup>.

### 3. Общие требования к конструкции микромодуля

При разработке конструкции микромодуля необходимо учитывать следующие требования:

Микромодуль должен иметь стандартную конструкцию независимо от типов входящих в него микроэлементов и электрической схемы соединения;

Микроэлементы, входящие в состав микромодуля, должны быть универсальными и независимыми от типа схемы, в которой они применяются;

Конструкции микромодуля и микроэлементов должны обеспечивать их работу в условиях, оговоренных общими техническими требованиями на аппаратуру;

возможность простой механизации и автоматизации их производства;

в конструкциях микромодуля и микроэлементов должны использоваться достижения в создании элементов на основе пленочной и полупроводниковой технологии.

В процессе разработки отечественной конструкции микромодуля была выбрана квадратная форма микроэлементов, разработан принцип сборки и соединения микроэлементов в составе микромодуля, определено количество контактных точек микроэлементов и выводов микромодулей, произведен расчет габаритных размеров микроэлементов и определены их цоколевки.

Стандартизация элементов по всем трем габаритам (например, изготовление их в виде одинаковых кубиков) была признана нецелесообразной. Разнообразие радиоэлементов, их типов, характеристик, номинальных значений и т.д. привело к созданию широкого ряда элементов - от тонкопленочных резисторов до катушек индуктивности и оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Для получения минимальных размеров каждого элемента, по крайней мере, один из его размеров должен быть переменным. Конфигурацию элементов следовало выбирать так, чтобы максимально облегчить сборку их в микромодуль.

Перечисленным выше требованиям удовлетворяют элементы, предназначенные для сборки в объемные модули и выполненные на платах одинаковой формы (микроэлементы). Платы можно делать тонкими или толстыми, как того требуют отдельные элементы. Для сборки модулей такие микроэлементы можно накладывать один на другой. Ограничение, связанное с необходимостью создания выводов элементов только по периферии плат, допускает более эффективное использование площади плат для самих элементов.

При анализе различных геометрических форм было установлено, что наиболее рационально использовать квадратную форму микроплат по следующим причинам:

квадратная форма микроплат в большой степени подходит для размещения на ней наиболее массовых радиодеталей, резисторов и конденсаторов, что для реальных схем составляет 70% общего количества радиодеталей;

при равных полезных площадях под радиодетали, а это является одним из основных критериев сравнения, круглые и шестигранные платы имеют большие линейные размеры (диаметр или расстояние между противоположными сторонами), чем сторона квадратной платы;

квадратная форма микроплат в большей степени отвечает требованиям автоматизации производства (удобство базирования по сторонам, меньшее число поворотов в пространстве и соответственно меньшее число производственных операций);

микромодули с квадратным поперечным сечением наиболее плотно компонуются в составе узлов и блоков.

Для объемной конструкции микромодуля в виде столбика или

этажерки наиболее простым и надежным способом соединения микроэлементов между собой согласно электрической схеме является использование объемных проводников, проходящих вдоль микро модуля и закрепленных в пазах микроэлементов посредством пайки. При определении количества пазов микроплат учитывалось, что все внешние выводы микро модулей должны обязательно выходить на одну из сторон микро модуля. Количество выводов должно быть равно (или больше) максимальному числу внешних выводов схем, реализуемых в составе микро модулей. Анализ большого числа различных радиоэлектронных схем с целью определения максимального числа внешних выводов показал, что 40% схем имеют по 3-5 внешних выводов, 40% схем - по 6-8, 12% схем - по 9-10 и 8% схем - по 11 внешних выводов.

Учитывая эти данные и исходя из того, что на каждой стороне микроплат должно быть одинаковое число пазов, общее число пазов было принято равным 12, т.е. по 3 паза на сторону.

Геометрические размеры микроплат выбирались также с учетом конструктивных особенностей микро модулей. Считалось, что размеры их должны быть минимальными, но в то же время необходимо было обеспечить возможность внутрисюлочной коммутации микро модулей с помощью печатных плат (при минимальных расстояниях между микро модулями).

В дальнейшем предполагается, что на одной микроплате будет несколько радиодеталей (для полизлементных микро модулей).

Исходным фактором для определения габаритов квадратных микроплат с 12 пазами считалось расстояние между центрами соседних пазов, которое должно быть не менее 2 мм, иначе затруднительно выполнять коммутацию на печатных платах. Кроме того, небольшие расстояния между краями металлизированных покрытий соседних пазов привели бы к ухудшению ряда электрических параметров микроэлементов (пробивное напряжение, паразитные связи и др.). При расстояниях между пазами более 3 мм габариты микроплат неоправданно увеличивались. Таким образом, расстояние между центрами пазов должно находиться в пределах от 2 до 3 мм.



Проведенная конструкторская проработка показала, что коммутационные возможности в микроблоках в наибольшей степени обеспечиваются, когда расстояние между пазами, расположенными на одной стороне, составляет 3 мм.

Это соответствует 3-миллиметровой координатной сетке, принятой для печатных плат<sup>х)</sup>. Указанные расстояния между пазами определили габаритные размеры микроплат 9,6x9,6 мм.

Толщина стандартной микроплаты была установлена равной  $0,3 \pm 0,05$  мм, что обусловлено механическими и технологическими характеристиками принятых керамических материалов. Таким образом, типовая микроплата получила габариты: 9,6x9,6x0,3 мм.

Так как микроэлементы представляют собой отдельные радиодетали, выполненные на микроплатах, то возникает вопрос о схеме подключения выводов радиоэлемента к пазам микроплаты.

По количеству выводов радиоэлементы делятся на двухвыводные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды и т.д.; трехвыводные - триоды; многовыводные - трансформаторы. Может быть выполнено несколько вариантов подключения выводов радиоэлемента к пазам микроплаты:

1. Вывод радиодетали подсоединяется в процессе изготовления к одному из пазов микроплаты.

2. Вывод радиодетали присоединяется в процессе изготовления одновременно к нескольким пазам микроплаты.

3. Присоединение вывода радиодетали к пазам микроплаты перед сборкой микромодуля.

Второй и третий варианты с точки зрения надежности менее предпочтительны, так как перед сборкой микроэлементов в микромодуле требуется их доработка. Всякая доработка радиодеталей после изготовления нежелательна и может привести к изменению их электрических параметров. Таким образом, предпочтение было отдано конструкции микроэлементов с постоянным присоединением выводов к определенным пазам.

---

х) В настоящее время в Советском Союзе для малогабаритной аппаратуры размерами менее 2,5 мм принята координатная сетка печатного монтажа с шагом 0,5 мм (примеч.ред.)

Принятая геометрия типовой микроплаты позволяет в любых сочетаниях производить выбор пазов для подключения располагаемых на ней радиоэлементов, обеспечивая тем самым гибкость при конструировании. Иначе говоря, каждый радиоэлемент может быть соединен с любым из 12 пазов микроплаты.

Поясним сказанное на примере двухвыводных и многовыводных элементов. Для двухвыводных неполярных элементов порядок выбора пазов безразличен, т.е. варианты 1-4 и 4-1, 2-5 и 5-2 - эквивалентны. Поэтому общее число вариантов соединений двухвыводных неполярных элементов определится как количество сочетаний из 12 элементов по 2 и будет равно

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{12!}{2!10!} = 66.$$

Для двухвыводных полярных элементов, например диодов или оксидно-полупроводниковых конденсаторов, каждый из полюсов может занимать любое из 12 положений на плате. Тогда общее количество вариантов соединений для них определится как количество размещений из 12 элементов по 2 и будет равно

$$A_n^m = \frac{n!}{(n-m)!} = \frac{12!}{10!} = 132.$$

Общее количество возможных вариантов соединений для трехвыводных элементов, если все 3 вывода полярны, составит

$$A_{12}^3 = \frac{12!}{(12-3)!} = 1320.$$

Таким образом, возможное число типов микроэлементов, отличающихся друг от друга только вариантом соединения радиоэлемента с пазами микроплаты, может составлять для резисторов - 66, диодов - 132, транзисторов - 1320 и т.д. Столь большая номенклатура микроэлементов не отвечает требованиям крупносерийного производства, поскольку приводит к трудностям, связанным с изготовлением, хранением и материально-техническим обеспечением микроэлементов. Поэтому для облегчения учета деталей, упрощения и удешевления их производства необходимо применять такой способ соединения микроэлементов в составе микромодуля, который позволил бы значительно сократить число используемых вариантов соединений.

Это оказывается возможным осуществить за счет введения в конструкцию микромодуля дополнительных микроплат с нанесенными на них перемычками, соединяющими определенные пазы микроплаты и играющими роль дополнительных монтажных связей между микроэлементами.

Так, для двухвыводных неполярных элементов были выбраны варианты с 8-кратным повторением, обеспечивающие наибольшее количество различных вариантов расположения: I-4; I-5; I-8. Варианты I-2 и I-II, как технически трудновыполнимые, не рассматривались. Для двухвыводных полярных микроэлементов, учитывая их количественное соотношение с биполярными элементами в схемах микромодулей, были выбраны варианты цоколевки с 4-кратным повторением, обеспечивающие возможность чередования полярности в каждой контактной точке: I-6 и 2-5.

Микромодули имеют ограничения по высоте, максимальной частоте и рассеиваемой мощности. Исходя из требований размещения в одном микромодуле функционально законченной простейшей схемы (каскада), а также в целях упрощения технологии изготовления и повышения механической прочности максимальная высота микромодулей была определена равной 25 мм. Последующая разработка микромодулей показала, что этот размер был выбран правильно. Технологическое оборудование, применяемое при изготовлении микромодулей, также соответствовало этому требованию.

Как будет показано далее, паразитные емкости между микроэлементами и соединительными проводниками затрудняют создание высокочастотных микромодулей. Реально использовать микромодульную конструкцию для схем, работающих на частотах до 70+100 Мгц.

Диапазон рабочих температур микроэлементов, выпускаемых отечественной промышленностью, позволяет создавать микромодули с рассеиваемой мощностью до 500 мвт на микромодуль.

Использование в составе микромодулей полупроводников позволяет увеличить плотность заполнения микромодулей, повышает их надежность. Так, при одной радиодетали на микроплате достигается плотность заполнения 7+10 деталей/см<sup>3</sup>, полупроводники повышают плотность заполнения до 10+20 деталей/см<sup>3</sup>. Однако основным преимуществом полупроводниковых микромодулей является их более высокая

Надежность за счет уменьшения числа переходных контактов при соединении отдельных радиодеталей друг с другом в составе микромодуля.

Как уже отмечалось ранее, объемная конструкция микромодуля весьма удобна для компоновки в составе узлов и блоков с такими "высокими" радиодеталями, как реле, кварцы, трансформаторы, катушки и т.п. Это преимущество микромодулей по сравнению с плоскими конструкциями пленочных и полупроводниковых интегральных схем.

Вместе с тем бесспорные преимущества интегральных схем в отношении плотности и надежности оправдывают стремление конструкторов включать в состав микромодулей бескорпусные интегральные схемы. По мере совершенствования технологических методов изготовления пленочных и полупроводниковых интегральных схем область их применения будет непрерывно расширяться.

Если раньше полиэлементы изготавливались из дискретных радиодеталей, то в последнее время для создания полиэлементов широкое распространение находят методы пленочной и полупроводниковой технологии. На типовой керамической или стеклянной микроплате методами пленочной технологии изготавливаются все резисторы и конденсаторы, входящие в схему данного микромодуля. Активные элементы (диоды и транзисторы) изготавливаются в одном или нескольких кусочках монокристаллического полупроводника, устанавливаемого на типовую микроплату. Возможно также использование в составе микромодуля функционально законченных сложных пленочных и полупроводниковых схем.

Однако увеличение функциональной сложности микромодуля, которое при этом наблюдается, приводит к необходимости некоторой модернизации конструкции микромодуля с целью увеличения числа соединительных проводников, количества выводных концов и повышения надежности соединения внутри микромодуля.

#### 4. Микроэлементы

Микроэлементы - миниатюрные радиодетали специальной формы, предназначенные для работы только в составе микромодулей данной конструкции. В отличие от обычных радиодеталей они имеют ряд особенностей. Прежде всего, микроэлементы должны удовлетворять единым техническим требованиям, т.е. иметь некоторые общие параметры оди-

наковыми (например, диапазон рабочих температур, вибростойкость и вибропрочность в составе микро модуля и т.д.).

Все микроэлементы должны иметь основание одинаковой формы, определяемое принятой конструкцией микро модуля, т.е. два размера всех микроэлементов постоянные и одинаковые, третий размер (высота) должен быть по возможности наименьшим. В этом заключается одна из основных трудностей создания микроэлементов.

Так как микроэлементы заключены в герметичный микро модуль, то конструкция их может не отвечать требованиям высокой влагостойкости и механической прочности, что необходимо в готовых микро модулях. Конструкция микроэлементов должна обеспечивать постоянство параметров в условиях хранения, проверки микроэлементов и при сборке их в микро модуль. Механическая прочность микроэлементов должна быть такой, чтобы касание и перенос их не вызвали повреждений. Защита поверхностей микроэлементов от влаги обуславливает постоянство параметров только при нахождении микроэлементов в нормальных условиях, т.е. при влажности воздуха не более 50+80% и температуре 15+35°C. Однако длительное пребывание микроэлементов даже в условиях нормальной влажности может привести к нежелательному изменению некоторых параметров: уменьшению сопротивления изоляции, увеличению тангенса угла потерь конденсаторов. Поэтому в соответствии с техническими условиями допускается нахождение микроэлементов вне герметичной тары в нормальных условиях не более 2 месяцев. Этого времени достаточно, чтобы собрать микроэлементы и загерметизировать в микро модуль.

Таким образом, микроэлементы, в отличие от обычных радиоэлементов, являются как бы полуфабрикатами (хотя они и выпускаются промышленностью как самостоятельные изделия). Микроэлементы становятся радиодетальями только будучи собранными и загерметизированными в составе микро модулей. Поэтому все электрические и эксплуатационные параметры микроэлементов, приводимые в справочниках или технических условиях, относятся только к микроэлементам, работающим в составе микро модулей данной конструкции и изготавливаемым по тировой единой технологии. В другой конструкции микро модуля или в микро модуле, изготовленном по другой технологии, параметры данного микроэлемента могут отличаться от справочных данных. Это является характерной особенностью микроэлементов.

С целью удобства механизации процесса изготовления микроэлементов и микромодулей, как правило, одна сторона микроэлементов выполняется плоской, свободной от выступающих конструктивных элементов. При сборке микромодулей не допускается механическая доработка и подгонка микроэлементов (в отличие, например, от необходимой перед монтажом рихтовки и обрезки выводов радиодеталей). Это налагает жесткие требования не только на стабильность электрических параметров микроэлементов, но и определяет весьма жесткие допуски на геометрические размеры микроэлементов, что также является характерной особенностью микроэлементов.

Выпускаемые отечественной промышленностью микроэлементы в составе микромодулей рассчитаны на работу в течение 5000 часов в следующих эксплуатационных условиях: при влажности окружающей среды 98% и температуре  $+40^{\circ}\text{C}$ ; при вибрационных нагрузках с ускорением до  $40g$  в диапазоне частот от 5 до  $5000 \text{ гц}^{\text{x}}$ ; при ударных нагрузках, многократно воздействующих на микромодуль, с ускорением до  $150g$ ; при одиночных ударах с ускорением до  $1000g$ ; при линейных ускорениях до  $150g$ ; при воздействии инея, росы, морского тумана и в тропических условиях.

Перечень микроэлементов, выпускаемых промышленностью и их основные параметры приведены в табл. У.І.

---

x) Некоторые типы микроэлементов допускают меньшие нагрузки, что оговаривается в справочниках или частных технических условиях на эти микроэлементы.

Т а б л и ц а У.1

Микроэлементы для микромодулей

Наименование	Условные обозначения	Основные параметры
1	2	3
Микроплаты		Поперечные размеры $9,0 \pm 0,1 \pm 9,6 \pm 0,1$ мм (без лужения пазов) $9,85 \text{ max} \times 9,85 \text{ max}$ (с лужеными пазами)
Резисторы композиционные, пленочные	СЗ-4 (СКПМ)	$R = 100 \text{ om} \pm 3,3 \text{ om}$ ; $V_p = 120 \text{ в}$ $\text{ТКС} = -16 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-4} \text{ ом/град.}$
Резисторы композиционные, ниточные	СЗ-3 (СКНМ)	$R = 100 \text{ om} \pm 3,3 \text{ om}$ ; $V_p = 30 + 80 \text{ в}$ $\text{ТКС} = \pm 10 \cdot 10^{-4} \text{ ом/град.}$
Резисторы станатные, ниточные	С2-12 (ССНМ)	$R = 5,6 \text{ om} \pm 5,1 \text{ ком}$ ; $\text{ТКС} = \pm 10 \cdot 10^{-4} \text{ ом/град.}$
Резисторы постоянные, проволочные	С5-18 С5-6	$R = 100 \text{ om} \pm 510 \text{ ком}$ ; $V_p = 120 \text{ в}$ $\text{ТКС} = (2 + 2,5) \cdot 10^{-4} \text{ ом/град.}$
Терморезисторы	СТЗ-26 СТ2-26 СТЗ-24	$R = 100 + 680 \text{ ом}$ ; $P = 10 + 20 \text{ мвт}$ $R = 1 + 100 \text{ ком}$ ; $10 + 20 \text{ мвт}$ , $680 \text{ ком}$ , $1 \text{ ком}$ , $1,5 \text{ ком}$ , $2,2 \text{ ком}$ , $3,3 \text{ ком}$ $P = 0,2 \text{ мвт}$ $\text{ТКС} = (-2,4 + 5) \cdot 10^{-2} \text{ ом/град.}$
Конденсаторы керамические	КМК-1 КМК-2,3	$C = 4,7 \text{ пф} + 100 \text{ пф}$ ; $V_p = 160 \text{ в}$ $C = 16 \text{ пф} + 0,047 \text{ мкф}$ $V_p = 100; 70; 50,3 \text{ в.}$
Конденсаторы оксидно-полупроводниковые	К53-5А	$C = 0,047 + 10 \text{ мкф}$ ; $V_p = 6 + 30 \text{ в}$ $I_{гр} \leq 3 \text{ мка}$ , $i_{q \delta} \leq 0,06 (50 \text{ гц})$
Конденсаторы металло-пленочные	К74П-4 (КМЛМ)	$C = 1000 \text{ пф}$ , $1500 \text{ пф}$ , $2200 \text{ пф}$ , $4700 \text{ пф}$ , $6800 \text{ пф}$ , $0,01 \text{ мкф}$ $V_p = 160 \text{ в}$ , $i_{q \delta} \leq 0,01$
Конденсаторы подстроечные	ММКТ-30/20	$C = 3 + 20 \text{ пф}$ , $V_p = 80 \text{ в}$ , $R \text{ из} =$ $1000 \text{ ом}$ , $i_{q \delta} \leq 0,03$
Катушки индуктивности постоянные	КФМ	$L = 1 + 2500 \text{ мкГн}$ , $Q = 20 + 80$ $\text{ТКС} = (1 + 7,5) \cdot 10^{-3}$ , $1/\text{град.}$

1	2	3
Катушки индуктивности: постоянные, переменные, связанные	МКИ МКИП МКИС	$L = 1+2500$ мкГн, $Q = 50+90$ для связанных $Q = 45+80$ $TKI = 3 \cdot 10^{-4}$ , 1/град.
Трансформаторы импульсные (ферритовые)	ММТИ-2+ I3	$\tau_u = 0,4+5$ мксек; $V_{вх.} = 10+18$ $f_r = 5+10$ кГц
Трансформаторы импульсные (пермаллоевые)	ММТИ-20 +I66	$\tau_u = 0,1+10$ мксек; $V_{вх.} = 10+15$ $F. = 10+2000$ кГц
Трансформаторы за- поминающие	ММТЗ-3+I0; I7,20+24	$I_3 = 100$ ма; $I_K = 100$ ма; $\tau_{лр} = 2$ мксек; $\tau_{лр} = 0,3+0,4$ мксек
Трансформаторы со- гласующие	ММТС-I+7	$R_0 = 50$ ом; $600$ ом; $2000$ ом; $3000$ омх2; $500$ омх2; $R_{вх.} = 500$ омх2; $100$ омх2; $600$ ом, $V = 0,35+3,54$
Кварцевые резонаторы		$F = 3+100$ мГц
Диоды кремниевые	2ДМ101 2ДМ502	$V_{np} = 1$ в при $I_0; 50; 100$ ма $I_{np} \leq 5$ ма при $30; 100$ в
Диоды германиевые	ДММ-3	$V_{np} = 1$ в при $5$ ма $I_{np} = 100$ ма при $15$ в
Стабилитроны крем- ниевые	2СМ180+ 2СМ213	$V_{ст} = 7+14$ в при $5$ ма
Транзисторы р-п-р германиевые	ТМ-2	$V_{кз} = 10+15$ в; $I_K = 50$ ма; $f_{\lambda} = 3+20$ мГц, Вст=20+250
Транзисторы р-п-р германиевые	ТМ-4	$V_K = 15$ в; $I_K = 40$ ма, $ \beta _{20 ГГц} = 2,5+4$ ; Вст=20+200
Транзисторы р-п-р германиевые	ТМ-5	$V_K = 15$ в, $25$ в; $I_K = 70$ ма, $f_{\lambda} = 1+3$ мГц, Вст=20+250
Транзисторы р-п-р германиевые	ГТМ305	$V_K = 15$ в; $I_K = 40$ ма, $ \beta _{20 ГГц} = 7+8$ ; Вст=25+180
Транзисторы р-п-р германиевые	ГТМ115	$V_K = 50+70$ в; $I_K = 100$ ма, $f_{\lambda} = 1$ мГц, Вст=20+150
Транзисторы п-р-п германиевые	ТМ-3	$V_K = 15$ в; $I_K = 50$ ма, $f_{\lambda} = 10$ мГц, Вст=18+160



I	2	3
Транзисторы р-п-р германиевые	ТМ-11	$V_k=15+30\text{В}; Y_k=50\text{ма},$ $f_{\lambda}=0,1+0,5\text{МГц}, \text{Вст}=7+160$
Транзисторы п-р-п кремниевые	ТМ-10	$V_k=20+30\text{В}; Y_k=10\text{ма},$ $ \beta _{20\text{МГц}}=1, \text{Вст}=7+120$
Транзисторы п-р-п кремниевые	2ТМ103	$V_k=80+120\text{В}, Y_k=15\text{ма},$ $f_{\lambda}=3\text{МГц}, \text{Вст}=10+150$

### 5. Микроплаты

Микроплаты предназначены для размещения на них печатных или навесных радиодеталей, а также для размещения печатных проводников ("перемычек") для перемыкания соединительных проводников внутри микро модуля (в случае необходимости). Микроплаты могут использоваться также в качестве концевых плат для повышения механической прочности и влагостойкости микро модулей. Так как микроплаты являются несущей частью (основанием) микроэлементов, то они должны быть механически прочными при достаточно малой толщине. Как установлено опытами, платы не дают трещин и не ломаются при сборке микроэлементов в модуль, а также при их проверке и хранении, если среднее значение предела прочности плат при изгибе не менее  $600 \text{ кгс/см}^2$ , минимальное значение  $400 \text{ кгс/см}^2$ .

Для электрического и механического соединения микроэлементов друг с другом в составе микро модуля используются пазы микроплат. Прочность сцепления серебра с керамикой в пазах микроплат должна быть достаточно высокой - среднее значение нагрузки, отрывающей металлизацию от керамики должно быть не менее 1,2 кг.

При механизированной сборке и пайке микроэлементов в составе микро модуля размеры как самих микроплат, так и их металлизированных пазов должны точно соответствовать чертежу. Отклонение от этих размеров может привести к неоправимому браку. Так, уменьшение размеров микроплат ниже допустимого может привести к отдельным непропаям пазов с соединительными проводниками, а увеличение размеров - к растрескиванию микроплат при их установке в устройство

для сборки и пайки микромодулей. Сопротивление изоляции между соседними пазами в нормальных условиях должно быть не менее  $10^{10}$  ом. Микроплата должна выдерживать без коронирования 500в постоянного напряжения, приложенного между двумя соседними пазами.

Из применяемых в радиопромышленности материалов наилучшим образом удовлетворяют изложенным выше требованиям различные сорта керамики, поэтому выпускаемые отечественной промышленностью микроплаты изготавливаются из ультрафарфора, миналунда и фотоситалла.

Всего промышленностью выпускается более 15 типов микроплат, отличающихся друг от друга толщиной и рельефом поверхности. Поперечные размеры и геометрия контура всех типов микроплат одинаковы и соответствуют типовой микроплате. Толщина типовой микроплаты равна  $0,35 \pm 0,05$  мм. Типовые микроплаты используются в качестве основания в подавляющем большинстве типов микроэлементов, а также в качестве "перемишек" и концевых плат. Толщина других типов плат находится в пределах от 0,35 до 1,0 мм.

Как уже ранее указывалось, в Советском Союзе в основу микромодулей положены квадратные микроплаты со стороной квадрата 9,6 мм. На каждой стороне микроплаты имеется по 3 металлизированных (серебром или молибдено-марганцем) паза, в которые при сборке микромодуля впаиваются соединительные проводники. Металлизированный слой покрывает внутреннюю поверхность пазов и окаймляет пазы на плоскостях и торце платы буртиком шириной до 0,4 мм при толщине металлизации  $10 \pm 20$  мкм, что обеспечивает необходимое сцепление металлизации с керамикой.

В одном из углов микроплаты имеется ключ - прямоугольный вырез размером  $1,0 \times 0,5$  мм, служащий для ориентации микроплат в процессе изготовления микроэлементов (при нанесении металлизированных выводов радиоэлементов, установке навесных радиоэлементов на плату и т.д.), а также для ориентации микроэлементов по отношению друг к другу при их сборке в микромодуль.

Нумерация пазов микроплаты ведется по часовой стрелке, начиная от ключа, при нормальном расположении микроплаты. Нормальным расположением считается такое, при котором ключ находится в левом верхнем углу микроплаты и большая его сторона расположена горизонтально.

В целях обеспечения пайки соединительных проводников с микроплатами металлизированные пазы последних лудят на глубину 0,4+0,5 мм при толщине микроплат от 0,3 до 0,8 мм и на глубину 0,3+0,4 мм при толщине более 0,9 мм. Толщина металлизированного слоя, включая припой, составляет не более 0,07 мм. Для лужения пазов применяется припой ПОС-6И с прибавкой серебра (олово - 60%, свинец - 37+38%, серебро - 2+3%).

Микроплаты изготавливают методом прессования, литья и фотохимическим методом.

### 6. Резисторы

В составе микромодулей используются резисторы - микроэлементы типа СЗ-4 (СКПМ), СЗ-3 (СКНМ), С2-12 (ССНМ), С5-6, С5-18, СТЗ-26, СТ2-26 и СТЗ-24.

Наибольшее применение в микромодулях нашли резисторы типа СЗ-4. Пленочные композиционные резисторы типа СЗ-4 (СКПМ) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного токов в интервале температур от -60 до +125°C. Резисторы изготавливаются непосредственно на поверхности типовой микроплаты и имеют выводы I-4, I-5, I-8.

Резисторы СЗ-4 выпускают с допусками  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  и  $\pm 20\%$ .

Ниточные композиционные СЗ-3 (СКНМ) и станинаты С2-12 (ССНМ) резисторы предназначены также для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного токов в интервале температур от -60 до +125°C.

Резисторы СЗ-3 выпускаются с номинальными значениями сопротивлений от 150ом до 1 Мом, с мощностью рассеяния 25 мвт, предельным рабочим напряжением 30в (импульсное напряжение 50в); от 100 ом до 3,3 Мом - с мощностью рассеяния 125 мвт, предельным рабочим напряжением 80в (импульсное напряжение 160в). Резисторы С2-12 выпускаются с номинальными значениями сопротивлений от 5,6ом до 2,7 ком, с мощностью рассеяния 50 мвт; от 560 ом до 5,1 ком - с мощностью рассеяния 125 мвт, от 10 ом до 510 ом - с мощностью рассеяния 250 мвт.

Допустимые отклонения сопротивлений от номинала  $\pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 20\%$ .

Проволочные постоянные резисторы типа С5-6 предназначены для работы в цепях постоянного тока при рабочем напряжении до 120в, в цепях переменного тока с частотой до 20 кГц при рабочем напряжении до 120в и импульсного тока с напряжением до 160в в интервале температур от -60 до +70°С. Резисторы изготавливают с допустимыми отклонениями номиналов  $\pm 1\%$  для сопротивлений от 10 до 10000 ом и  $\pm 5\%$  - для сопротивлений от 11 ком до 500 ком.

Номинальная мощность рассеяния резисторов 50 мвт.

Постоянные проволочные резисторы С5-18 отличаются от резисторов С5-6 максимально допустимой температурой эксплуатации - +125°С; допустимыми отклонениями сопротивлений от номинальных значений -  $\pm 0,1\%$ ;  $\pm 0,2\%$ ;  $\pm 0,5\%$ ;  $\pm 1,0\%$ ; допустимой мощностью рассеяния - 125 мвт.

Терморезисторы СТ2-26, СТ3-24, СТ3-26 предназначены для работы при температурах от -60 до +125°С.

Изменение сопротивления терморезистора в интервале температур характеризуется зависимостью

$$R_T = R_{T_0} \cdot e^{B \frac{T_0 - T}{T_0 T}}$$

где  $R_T$  - сопротивление при температуре T в градусах Кельвина;  
 $R_{T_0}$  - сопротивление при температуре  $T_0$  (293°С);  
B - постоянная, определяемая физическими свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен терморезистор;  
e - основание натуральных логарифмов (2,718).

Постоянная B определяет величину отрицательного температурного коэффициента сопротивления терморезисторов:  $TКС = -\frac{B}{T^2}$ ,

где T- температура в градусах Кельвина, при которой определяется ТКС .

Постоянная B и отрицательный ТКС при +20°С находятся в пределах:

для СТ2-26, СТ3-26 -  $B=2060+4300^{\circ}К$ ,  $TКС=-2,4\% \pm 5\%$  на 1°С;

для СТ3-24 -  $B=2250+3520^{\circ}К$ ;  $TКС=-2,6\% \pm 4,1\%$  на 1°С.

### 7. Конденсаторы

Керамические конденсаторы типа КМК предназначены для работы в цепях постоянного и переменного токов при температурах от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  для конденсаторов групп Н90 и от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  для остальных групп. По конструкции конденсаторы изготавливают 3 видов: однослойные КМК-1, многослойные КМК-2 и КМК-3. Выводы конденсаторов подключают к одной из пар пазов микроплаты: I-4, I-5 и I-8.

Значения емкости конденсаторов групп ПЗЗ, М47, М75, М750 и М1500 соответствуют ряду  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  и  $\pm 20\%$ ; групп Н30 -  $+50\pm 20\%$ , групп Н90 -  $+80\pm 20\%$  (ГОСТ 2519-60). Тангенс угла потерь конденсаторов: 0,0015 - для групп ПЗЗ, М47, М75, М750 и М1500, 0,035 - для групп Н30 и Н90. По величине температурного коэффициента емкости (ТКЕ) и изменению емкости в интервале рабочих температур конденсаторы делятся на группы согласно табл. У.2.

Т а б л и ц а У . 2  
Характеристики конденсаторов для микромодулей

Условное обозначение группы конденсаторов	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$		Цвет 1-й маркировочной точки	Цвет 2-й маркировочной точки
	от $-60$ до $+20$	от $+20$ до $+125$		
	Изменение емкости, % не более	ТКЕ, $^{\circ}\text{C}$		
ПЗЗ	$\pm 0,5$	$+(38\pm 30) \cdot 10^{-6}$	Серый	Серый
М47	$+1,5$	$-(47\pm 30) \cdot 10^{-6}$	Голубой	Голубой
М75	$+2$	$-(75\pm 30) \cdot 10^{-6}$	Голубой	Красный
М750	$+12$	$-(750\pm 100) \cdot 10^{-6}$	Красный	Красный
М1500	$+25$	$-(1500\pm 200) \cdot 10^{-6}$	Зеленый	Зеленый
Н30	Изменение емкости в интервале температур от $-60$ до $+125^{\circ}\text{C}$ относительно емкости в нормальных условиях - не более $\pm 30\%$ .		Оранжевый	Зеленый
Н90	Изменение емкости в интервале от $-60$ до $+85^{\circ}\text{C}$ относительно емкости в нормальных условиях - не более $-90\pm 50\%$		Оранжевый	Белый

После сборки и заливки конденсаторов в микромодуль электрические характеристики их несколько изменяются. Степень этого изменения зависит от конкретной схемы сборки. Ориентировочно подсчитано, что для конденсаторов КМК-1 емкость при заливке эпоксидным компаундом изменяется на  $5+7$  пф, а для конденсаторов КМК-2,3 - на  $+7+13$  пф (для случая, когда несколько конденсаторов расположены в микромодуле рядом). Однако изменение емкости конденсаторов в каждом отдельном случае должно быть определено опытным путем.

Оксидно-полупроводниковые конденсаторы типа К53-5А (КОПМ) предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего токов в интервале температур от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Конденсаторы выпускаются: на номинальное напряжение 6в емкостью 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 и 10,0 мкф, на номинальное напряжение 15в емкостью 0,047; 0,068; 0,1; 0,47; 0,68; 1,0; 1,5; 2,2; 3,3 мкф, на номинальное напряжение 30в емкостью 0,47; 0,68; 1,0; 1,5; 2,2 мкф.

Конденсаторы изготавливают с допустимыми отклонениями действительной величины емкости от номинальной на  $\pm 10$ ,  $\pm 20$  и  $\pm 30\%$ . После сборки и заливки эпоксидным компаундом в составе микромодуля изменение емкости конденсаторов не превышает  $\pm 5\%$ , тангенс угла потерь на частоте 50 гц не более 15%, на частоте 1000 гц - менее 50%, ток утечки менее 3 мка.

Металло-пленочные конденсаторы постоянной емкости К74П-4 и КМПП предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  (для КМПП) и до  $+125^{\circ}\text{C}$  (для К74П-4). По конструкции конденсаторы К74П-4 и КМПП идентичны.

Конденсаторы изготавливают с допускаемыми отклонениями  $\pm 10$  и  $\pm 20\%$  на номинальное напряжение 160в в интервале температур до  $+85^{\circ}\text{C}$ ; с напряжением 100 в при температурах от  $+85$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  и 60в при температурах от  $+100$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда переменного тока или пульсирующего, по отношению к допустимому постоянному напряжению, не должна превышать: 50% - на частотах до 1000 гц, 20% - на частотах свыше 1000 гц до 5 кГц, 10% - на частотах от 5 до 10 кГц, 5% - на частотах от 10 до 20 кГц (сумма постоянного и переменного напряжения не должна превышать допустимого постоянного напряжения). Тангенс угла потерь не превышает 0,01 - для К74П-4 и 0,015 - для КМПП. Сопротивление изоляции - 10000 мом. После сборки конденсато-

ров в микромодули и герметизации емкость конденсаторов может измениться не более чем на  $\pm 5\%$ .

Конденсатор ММКТ-3/20 - подстроечный конденсатор (рис. У.1) предназначен для работы при температурах от  $-60$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ .

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) конденсаторов в интервале температур от  $-60$  до  $+75^{\circ}\text{C}$  находится в пределах  $(500 \pm 300) \cdot 10^{-6}$  I/град.

### 8. Катушки индуктивности

Индуктивности типа ИФМ (рис. У.2) предназначены для работы на постоянном и переменном токе (до 5 ма) в интервале температур от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Допустимые отклонения от номинальных значений индуктивности: для группы от 1 до 5 мкГн -  $\pm 10\%$ , от 6,3 до 10 мкГн -  $\pm 5$  и  $\pm 10\%$ , от 12,5 до 2500 мкГн -  $\pm 5\%$ . Добротность катушек соответствует данным, указанным в табл. У.3

Т а б л и ц а У.3.

Добротность катушек индуктивности

	Группа индуктивности, мкГн				
	1+2,5	3,35+86	20+200	160+630	1000+2500
Величина добротности	60-10%	80-10%	90-10%	50-10%	20-10%
Частота измерения, Мгц	15	5	2,5	1	0,1

Температурный коэффициент катушек индуктивности (ТКИ) в интервале температур от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ : для индуктивностей от 1 до 630 мкГн -  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$  I/град, от 1000 до 2500 мкГн -  $\pm (3,7+7,5) \cdot 10^{-3}$  I/град.

Катушки ИФМ выполняются на ферритовых кольцах марок 20В4, 50В4, 100НН и 1000 НМ и приклеиваются к микроплате. Выводы катушки пропускаются через отверстие микроплаты и распаяваются к печатным проводникам, соединенным с пазами микроплаты. Чтобы защитить катушку от влияния компаунда, сверху катушка закрывается полиамидным

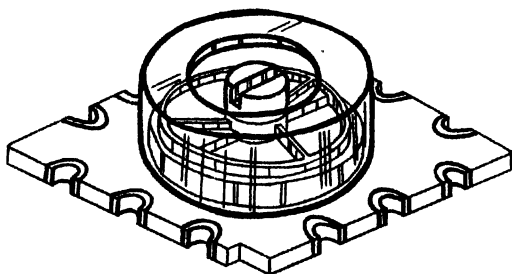


Рис. У.1. Подстроечный конденсатор  
типа ИМКТ-3/20

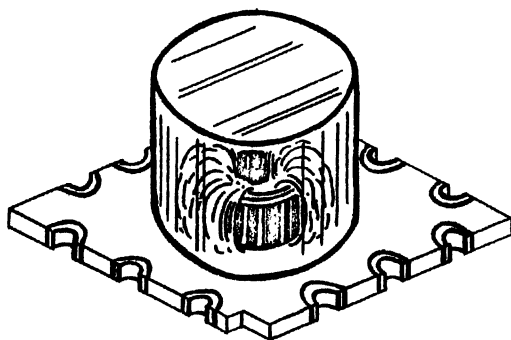


Рис. У.2. Катушка индуктивности  
типа ИФМ



колпаком, который также приклеивается к микроплате. Снизу выводы катушки и отверстие заливаются эмалью, чтобы на катушку не попала влага и компаунд.

Катушки индуктивности типа МКИ, МКИП, МКИС (рис. У.3) - соответственно постоянные, переменные, связанные - предназначены для работы при температурах от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  в цепях переменного и постоянного тока с максимальным напряжением 100в при токе нагрузки до 65 ма в схемах микромодулей.

В отличие от катушек типа ИФМ, у которых сердечником является ферритовое кольцо, у катушек индуктивности типа МКИ сердечником являются ферритовые чашки. Тип катушки, величина ее индуктивности и габаритные размеры, а также точность изготовления (для МКИ, МКИС) и пределы регулировки (для МКИП) указаны в табл. У.4.

Т а б л и ц а У.4

Характеристики подстраиваемых катушек индуктивности

Тип катушки	Величина индуктивности, мкГн	Высота, мм	Точность изготовления или перестройка
МКИ	1+8	9,8	$\pm 5$
МКИ	10+2500	11,8	$\pm 5$
МКИП	1+8	9,8+11	$\pm 10$
МКИП	10+2500	11,8+13	$\pm 10$
МКИС	1+10	9,8	$\pm 5$
МКИС	16+2500	11,8	$\pm 5$

Значения температурного коэффициента (ТКИ) катушек индуктивности приведены в табл. У.5.

Т а б л и ц а У.5

Температурный коэффициент подстраиваемых катушек индуктивности

Номинальная величина, мкГн	ТКИ, 1/град.	
	$-60$ $+20^{\circ}\text{C}$	$+20$ $+35^{\circ}\text{C}$
1+315	$\pm 300 \cdot 10^{-6}$	$\pm 300 \cdot 10^{-6}$
400+1000	$(-200+400) \cdot 10^{-6}$	$(-100+400) \cdot 10^{-6}$
1250+2500	$(-200+800) \cdot 10^{-6}$	$(-100+500) \cdot 10^{-6}$

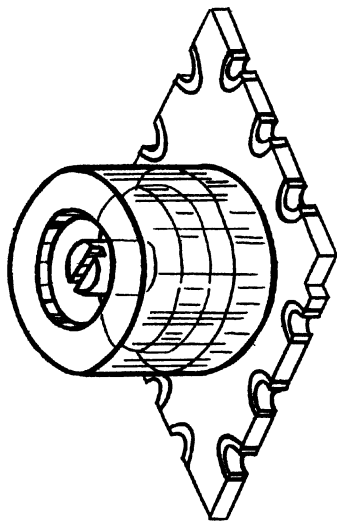


Рис. У.3. Подстраиваемая катушка индуктивности типа МКИ (МКИШ, МКИС)

Т а б л и ц а У.6

## Характеристики ферритовых трансформаторов

Тип трансформатора	Задаваемые параметры				Наименование электрических параметров				Контролируемые параметры	Коэффициент трансформации $\pm 10\%$
	$U_{\text{н}},$ В	$I_{\text{н}},$ мА	$T_{\text{нр}},$ мксек	$f_{\text{н}},$ кГц	Сопро-в. на 2 на 3 оом.	$T_{\text{св}},$ мксек	$T_{\text{ср}},$ мксек	$T_{\text{ср}},$ мксек		
МЛТИ-2	18	5,0		10	300	200	66	0,24	0,35	1:5:5
МЛТИ-3	"	1,0		10	30	-	55	0,12	0,2	5:2
МЛТИ-4	"	1,5		10	200	200	74	0,12	0,4	1:3:3:3:3
МЛТИ-5	"	0,4		10	65	30	154	0,1	0,1	1:1:1
МЛТИ-6	"	1,0		10	180	-	55	0,12	0,2	1:1
МЛТИ-7	"	1,0		10	180	-	198	0,12	0,3	1:1
МЛТИ-8	"	2,0		10	65	-	154	0,13	0,2	2:1
МЛТИ-9	"	2,0		5	1000	1000	127	0,13	0,5	1:1:1
МЛТИ-10	"	2,0		10	20	20	55	0,25	0,25	3:1:1
МЛТИ-11	"	2,0		10	20	-	55	0,25	0,25	3:1
МЛТИ-12	"	2,0		5	1000	-	127	0,13	0,5	1:1
МЛТИ-13	"	5,0		10	200	200	10	0,15	0,2	1:2:2

 $\times 0,5 \pm 0,5$  $\times 2 \times 2 \times 2$

Изменение параметров после сборки микроиндуктивностей в микро модули не превышает: величина индуктивности -  $\pm 2\%$  и добротность -  $10\%$ .

Точность изготовления постоянных и связанных катушек индуктивности -  $\pm 5\%$ .

### 9. Трансформаторы

Трансформаторы типа ММТИ - микромодульные импульсные трансформаторы с ферритовыми и пермаллоевыми сердечниками. Ферритовые трансформаторы работают при температурах от  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ , пермаллоевые от  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Ферритовые трансформаторы изготавливаются 12 типов (табл. У.6) и имеют обозначения от ММТИ-2 до ММТИ-13. Цоколевка выводов трансформаторов ММТИ-2+13 указаны в табл. У.7.

Т а б л и ц а У.7

Цоколевка выводов трансформаторов

Тип трансформатора		Номер схемы	Вариант цоколев- ки	Номер паза					
				I обм.		II обм.		III обм.	
ММТИ-3	ММТИ-8	1	1	5	10	12	2	-	-
ММТИ-6	ММТИ-11		2	5	7	8	12	-	-
ММТИ-7	ММТИ-12		3	2	II	12	I	-	-
ММТИ-2	ММТИ-9	2	1	5	6	7	9	I	3
ММТИ-4	ММТИ-10		2	2	4	5	8	10	12
ММТИ-5	ММТИ-13		3	5	3	12	9	8	7

Пермаллоевые трансформаторы изготавливаются 146 типов на длительности импульсов (в мксек): 0,05; 0,1; 0,25; 0,4; 0,6; 1,6; 4,0; 6,3 и 10 (табл. У.8). Трансформаторы имеют обозначения от ММТИ-20 до ММТИ-166.

Выполняются 2-обмоточными, 3- и 4-обмоточными. Электрические параметры трансформаторов указаны в табл. У.9.

Трансформаторы могут быть использованы на длительности импульсов и напряжениях, отличающихся от табличных значений, при условии, если произведение  $T_{u\text{ } l_x} \cdot U_{l_x}$  не будет превышать табличные значения.

Т а б л и ц а У.6

## Характеристики пераллюевых трансформаторов

Электричес- кая схема трансформа- тора	Коэффици- ент транс- формации	Группа трансформаторов по длительности импульса и обозначение трансформатора									
		I 0,05мксек	II 0,1мксек	III 0,25мксек	IV 0,4мксек	V 0,6мксек	VI 1,6мксек	VII 4, Омксек	VIII 6, Омксек	IX 10 мксек	
	1:1	МАТТИ-110	МАТТИ-112	МАТТИ-111	МАТТИ-113	МАТТИ-124	МАТТИ-23	МАТТИ-22	МАТТИ-21	МАТТИ-20	
	2:1	МАТТИ-114	МАТТИ-116	МАТТИ-115	МАТТИ-117	МАТТИ-23	МАТТИ-28	МАТТИ-27	МАТТИ-26	МАТТИ-25	
	3:1	МАТТИ-118	МАТТИ-120	МАТТИ-119	МАТТИ-121	МАТТИ-34	МАТТИ-33	МАТТИ-32	МАТТИ-31	МАТТИ-30	
	5:1	МАТТИ-122	МАТТИ-124	МАТТИ-123	МАТТИ-125	МАТТИ-39	МАТТИ-38	МАТТИ-37	МАТТИ-36	МАТТИ-35	
	1:1:1	МАТТИ-126	МАТТИ-128	МАТТИ-127	МАТТИ-129	МАТТИ-44	МАТТИ-43	МАТТИ-42	МАТТИ-41	МАТТИ-40	
	2:1:1	МАТТИ-130	МАТТИ-132	МАТТИ-131	МАТТИ-133	МАТТИ-49	МАТТИ-48	МАТТИ-47	МАТТИ-46	МАТТИ-45	
	3:1:1	МАТТИ-134	МАТТИ-136	МАТТИ-135	МАТТИ-137	МАТТИ-54	МАТТИ-53	МАТТИ-52	МАТТИ-51	МАТТИ-50	
	5:1:1	МАТТИ-138	МАТТИ-140	МАТТИ-139	МАТТИ-141	МАТТИ-59	МАТТИ-58	МАТТИ-57	МАТТИ-56	МАТТИ-55	
	2:2:1	МАТТИ-142	МАТТИ-144	МАТТИ-143	МАТТИ-145	МАТТИ-64	МАТТИ-63	МАТТИ-62	МАТТИ-61	МАТТИ-60	
	3:2:1	МАТТИ-146	МАТТИ-148	МАТТИ-147	МАТТИ-149	МАТТИ-69	МАТТИ-68	МАТТИ-67	МАТТИ-66	МАТТИ-65	
	5:2:1	МАТТИ-150	МАТТИ-152	МАТТИ-151	МАТТИ-153	МАТТИ-74	МАТТИ-73	МАТТИ-72	МАТТИ-71	МАТТИ-70	
	3:3:1	МАТТИ-154	МАТТИ-156	МАТТИ-155	МАТТИ-157	МАТТИ-79	МАТТИ-78	МАТТИ-77	МАТТИ-76	МАТТИ-75	
	5:3:1	МАТТИ-158	МАТТИ-160	МАТТИ-159	МАТТИ-161	МАТТИ-84	МАТТИ-83	МАТТИ-82	МАТТИ-81	МАТТИ-80	
	5:5:1	МАТТИ-162	МАТТИ-164	МАТТИ-163	МАТТИ-165	МАТТИ-89	МАТТИ-88	МАТТИ-87	МАТТИ-86	МАТТИ-85	
	20:10:1	-	-	-	МАТТИ-166	-	-	-	-	-	
	1:1:1:1	-	-	-	МАТТИ-94	МАТТИ-93	МАТТИ-92	МАТТИ-91	МАТТИ-90	-	
	3:1:1:1	-	-	-	МАТТИ-99	МАТТИ-98	МАТТИ-97	МАТТИ-96	МАТТИ-95	-	
	3:3:1:1	-	-	-	МАТТИ-104	МАТТИ-103	МАТТИ-102	МАТТИ-101	МАТТИ-100	-	
	3:3:3:1	-	-	-	МАТТИ-109	МАТТИ-108	МАТТИ-107	МАТТИ-106	МАТТИ-105	-	

Т а б л и ц а У.9

## Электрические характеристики трансформаторов

Номер группы	Длительность входного импульса, мксек	Амплитуда входного импульса, в	Индуктивность первичной обмотки, мГн, не менее	Максимальная частота повторения импульсов, кГц	Ток намагничивания первичной обмотки, ма, не более	Контролируемые параметры			Длительность заднего фронта импульса на нагрузках, мксек, не более
						Длительность импульса на нагрузках, мксек	Длительность переднего импульса фронта на нагрузках, мксек, не более	Длительность заднего фронта импульса на нагрузках, мксек, не более	
	$\tau_{вх}$	$U_{вх}$	$L$	$f_n$	$J_n$	$\tau_{н влк}$	$\tau_{пр влк}$	$\tau_{зр влк}$	
I	0,5	10	17	2000	30		0,02	0,02	
II	0,1	10	32	1000	30		0,02	0,02	
III	0,25	10	37	1000	30		0,03	0,03	
IV	0,4	10	140	500	30		0,03	0,03	
V	0,6	10	220(125)	500(200)	30(60)		0,04	0,15(0,9)	
VI	1,6	15	560	100	30		0,06	0,2	
VII	4,0	15	1400	50	30		0,2	0,3	
VIII	6,3	15	2200	10	30		0,3	0,3	
IX	10,0	15	3500	10	30		0,3	0,4	

х) Значения, указанные в скобках, даны для трансформатора ММТИ-166

Отклонение коэффициента трансформации от табличных значений не превышает  $\pm 10\%$ . Сопротивление изоляции между обмотками трансформаторов не менее 100 Мом и выдерживает испытательное напряжение постоянного тока 100в.

Трансформаторы типа ММТ<sub>3</sub> (табл. У.10) - микромодульные запоминающие трансформаторы - предназначены для работы в схемах счетно-решающей аппаратуры в составе микромодулей. Насчитывается 14 типов трансформаторов: ММТ<sub>3</sub>-3+10,17,20+24.

Входные параметры импульсов тока записи и списывания указаны в табл. У.11, а электрические параметры - в табл. У.12.

Т а б л и ц а У.10

Электрические параметры запоминающих трансформаторов

Тип трансформатора	Входные параметры		
	Амплитуда ЭДС сигнала при записи, в, не менее	Амплитуда ЭДС сигнала при списывании, в, не менее	Амплитуда ЭДС помех при записи, в, не менее
ММТ <sub>3</sub> -3	10	10	0,6
ММТ <sub>3</sub> -4	9	8	0,5
ММТ <sub>3</sub> -5	110	10	0,6
ММТ <sub>3</sub> -6	6	6	1,0
ММТ <sub>3</sub> -7	8	7,5	0,6
ММТ <sub>3</sub> -8	9	8	0,6
ММТ <sub>3</sub> -9	6	9	1,0
ММТ <sub>3</sub> -10	9	9	1,7
ММТ <sub>3</sub> -17	7	8	0,9
ММТ <sub>3</sub> -20	1,1	1,1	0,12
ММТ <sub>3</sub> -21	11	10	0,75
ММТ <sub>3</sub> -22	10	9,5	0,4
ММТ <sub>3</sub> -23	10,5	8	0,6
ММТ <sub>3</sub> -24	7,5	7,5	0,4

Т а б л и ц а У.11

Входные параметры запоминающих трансформаторов

Электрические параметры	Нормы
Амплитуда тока при записи, ма	100
Амплитуда тока списывания, ма	100
Длительность импульсов на уровне 0,1 не менее, мксек	2
Длительность переднего фронта импульса на уровне 0,1+0,9, мксек	0,3+0,4
Длительность заднего фронта импульса на уровне 0,1+0,9, мксек	0,7+0,8

Трансформаторы - ферритовые кольца с намотанными на них проводами приклеиваются к типовой микроплате и сверху закрываются защитным полиамидным колпачком, который приклеивается также к микроплате. Концы проводов пропускают через отверстие в микроплате и расплаивают к металлизированным печатным проводникам, связанным с пазами микроплат. Затем отверстие заливают эмалью, чтобы под колпачок не проникла влага или эпоксидный компаунд. Сопротивление изоляции между обмотками трансформатора не менее 100 Мом. Изоляция выдерживает без пробоя и поверхностного перекрытия напряжение постоянного тока 100 в.

Трансформаторы типа ММТС - микромодульные трансформаторы согласования низкой частоты. Предназначены для работы при температурах от -60 до +85<sup>0</sup>С в схемах низкочастотных трактов и в диапазоне частот от 300 до 3000 гц с неравномерностью частотной характеристики не более +5 дб и коэффициентом нелинейных искажений не более 10%. Трансформаторы изготавливаются семи типовых номиналов. Электрические параметры трансформаторов даны в табл. У.12.





Электрические схемы и цоколевка трансформаторов указаны в табл. У.13.

Т а б л и ц а У.13

Электрические схемы трансформаторов согласования

Тип трансформатора	Электрическая схема
ММТС-1 ММТС-2 ММТС-3	
ММТС-4 ММТС-5 ММТС-6	
ММТС-7	

Сопротивление изоляции между первичными и вторичными обмотками трансформаторов не менее 1000 мом. Изоляция выдерживает без пробоя и поверхностного перекрытия напряжение постоянного тока 100в.

### 10. Кварцевые резонаторы

Кварцевые резонаторы предназначены для стабилизации электрических колебаний с частотой от 5 до 90 мц в диапазоне температур от -60 до +75°С.

По максимально допустимому относительному изменению частоты в интервале рабочих температур резонаторы подразделяются на классы, как показано в табл. У.14.

Т а б л и ц а У.14

Классификация кварцевых резонаторов

Обозначение класса точности	Изменение частоты	Обозначение класса точности	Изменение частоты
Т	$\pm 50$	Ф	$\pm 100$
У	$\pm 75$	Х	$\pm 150$

По допустимому относительному отклонению частоты (точность настройки) от номинального значения при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  резонаторы подразделяются на группы (табл. У.15).

Т а б л и ц а У.15

Отклонение частоты кварцевых резонаторов

Обозначение группы	0	П	Р	С
Относительное отклонение частоты от номинала $\times 10^{-6}$	$\pm 15$	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 30$

Предельное значение динамического сопротивления резонаторов не превышает в диапазоне частот от 5 до 6 мГц - 150 ом, от 6 до 60 мГц - 100 ом, от 60 до 90 мГц - 200 ом. Статическая емкость  $C_0$  - не более 7 пф. Допустимая мощность рассеяния: 4 мвт - для резонаторов с частотами от 50 до 21,0 мГц и 2 мвт - для резонаторов с частотами свыше 21,0 МГц.

II. Диоды

Диоды ДММ-3 изготавливаются в круглом металло-стеклянном корпусе и монтируются на плате с прямоугольным отверстием по диагонали платы. Диоды типа 2ДМ и 2СМ (стабилитроны) изготавливаются в таблеточных металло-стеклянных круглых корпусах и монтируются на плате с круглым отверстием в центре платы. Выводы диодов подключаются следующим образом: положительный вывод - к пазу I микроплаты

отрицательный - либо к пазу 6, либо к пазу 4. В некоторых случаях положительный вывод подключают к пазу 2, отрицательный - к пазу 5.

В случае установки на одной микроплате 3 диодов типа ДММ-3 (рис. У.4) микроэлемент называется полиэлементом и обозначается 1ДМ505А (3ДММ-3). Цоколевка его - положительные выводы - 1,2,3 пазы микроплаты, отрицательные выводы объединены и выведены к пазу 7 микроплаты.

Диоды ДММ-3 и 2ДМ505А допускают эксплуатацию их в диапазоне температур от -60 до +73°C, а диоды типа 2ДМ и 2СМ - в диапазоне температур от -60 до +80°C и до +120°C соответственно. Электрические параметры диодов ДММ-3, 2ДМ101, 2ДМ502 при температуре +20°C приведены в табл. У.15, а стабилитронов - в табл. У.16.

Т а б л и ц а У.15

Электрические параметры диодов

Параметры	Д и о д ы					
	ДММ-3	2ДМ101	2ДМ502А	2ДМ502Б	2ДМ502В	2ДМ502Г
I	2	3	4	5	6	7
Максимально допустимое обратное напряжение любой формы и периодичности, в	15	30	30	30	100	100
Максимальное импульсное прямое падение напряжения при импульсе прямого тока, в:						
20ма	3,5	-	-	-	-	-
50ма	-	-	3,5	2,5	3,5	2,5
Постоянное прямое напряжение, в						
при прямом токе						
5ма	I	-	-	-	-	-
10ма	-	-	I	-	I	-
50 ма	-	-	-	I	-	I
100ма	-	I	-	-	-	-



I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Предельно допустимая мощность в интервале температур $-60^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C}$ , мвт	125	125	125	125	125	-	-	-	-	-
Предельно допустимая мощность при $+120^{\circ}\text{C}$ , мвт	70	70	70	70	70	-	-	-	-	-
Предельно допустимый ток стабилизации в интервале температур $-60^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C}$ , ма	15	13	11	10	9	30	26	21	18	15
Предельно допустимый ток стабилизации при $+120^{\circ}\text{C}$ , ма	8	7,5	6,5	6	5	21	18	15	12	10
Минимальный ток стабилизации в интервале температур от $-60^{\circ}\text{C}$ до $+120^{\circ}\text{C}$ , ма	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3

## 12. Транзисторы

Все микромодульные транзисторы изготавливаются в специализированном корпусе (рис. У.5). Габаритные размеры собственно транзистора: диаметр 7,4 мм и высота 2,5 мм.

Металло-стеклянная конструкция транзистора состоит из коваровой "ножки", имеющей два металло-стеклянных впая для вывода электродов транзистора и медного колпачка. Герметизация корпусов микротранзисторов осуществляется "холодной" сваркой. При изготовлении микромодульного транзистора прибор в металло-стеклянном корпусе монтируется на керамической плате. С целью предотвращения растрескивания стекла при монтаже выводы микротранзисторов на плате сделаны двухзвеньевые.

Германиевые транзисторы ТМ-2 типа р-п-р изготавливаются из электронного германия. Электронно-дырочные переходы получаются сплавлением индия. С целью получения лучших импульсных свойств диаметр коллекторного электрода уменьшен до 0,35 мм, что обеспе-

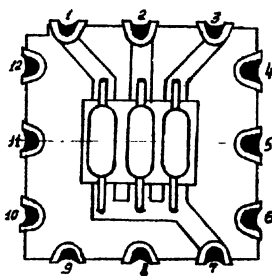


Рис. У.4. Строенный диод  
типа ЗДММ-3

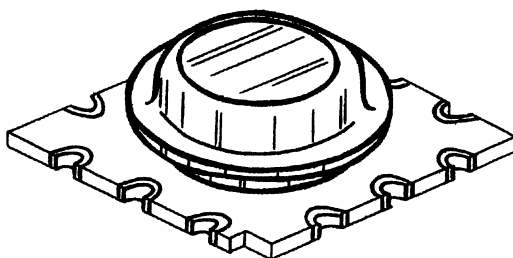


Рис. У.5. Микротранзистор

чивает снижение емкости коллектора менее 20 пф. Использование тонких германиевых пластин (40+50 мк), малых навесок электродов и точное поддержание температуры печи при вливании примеси дает возможность получить предельные частоты усиления по току до 20 мГц.

Германиевые транзисторы ТМ-3 типа п-р-п изготавливаются из дн-рочного германия методом вливания. В качестве электродного материала используются шарики из сплава олово-сурьма. Такая технология обеспечивает предельные частоты усиления по току до 10 мГц.

Транзистор ТМ-3 является электрическим аналогом транзистора ТМ-2, отличаясь от него только другой полярностью.

Германиевые транзисторы ТМ-5 - сплавные, типа р-п-р. Предельная частота усиления по току составляет 1+5 мГц.

Транзисторы ТМ-10 - кремниевые диффузионные, типа п-р-п, имеют частоты генерирования 30+60 мГц.

Транзисторы ТМ-11 - кремниевые сплавные, типа р-п-р, изготавливаются из электронного кремния. В качестве электродного материала используется алюминий.

Транзисторы 1ТМ115 - германиевые сплавные, типа р-п-р, предназначены для высоковольтных цепей (максимальное напряжение между коллектором и базой 50+70в).

Транзисторы 2ТМ103 - кремниевые диффузионные, типа п-р-п, предназначены также для работы в высоковольтных цепях (максимальное напряжение между коллектором и базой 80+120в).

Транзисторы ТМ-4 и 1ТМ305 изготавливаются по сплавно-диффузионной технологии.

Электрические параметры транзисторов при температуре +20°C представлены в табл. У.17.

Т а б л и ц а У.17  
Электрические параметры транзисторов

Тип тран- зистора	П а р а м е т р ы									
	$V_{от}$	$f_{\pm}$ , мГц	$V_{об}$ , в	$V_{кз}$ , в	$V_{кн}$ , в	$I_{к}$ , мА	$I_{кн}$ , мА	$I_{кз}$ , мкА	$I_{ко}$ , мкА	$P_{к}$ , мВт
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ТМ-2А	20+60	3	10	15	0,15	50	100	20	-	75
ТМ-2Б	50+150	3	10	15	—"	—"	—"	20	-	—"
ТМ-2В	30+90	9	10	10	—"	—"	—"	15	-	—"



I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
TM-2Г	70+120	9	10	10	0,15	50	100	15	-	7,5
TM-2Д	80+250	20	-"	10	-"	-"	-"	15	-	-"
TM-3А	18+55	1	-"	15	0,5	-"	-"	20	-	-"
TM-3В	20+60	5	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-3Г	40+20	5	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-3Д	40+160	10	10	15	0,5	50	100	20	-	-"
TM-4А	20+75	60	1,5	-"	-"	40	-"	15	-	-"
TM-4Б	50+120	60	1,5	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-4В	90+200	60	1,5	15	0,5	40	100	15	-	-"
TM-4Г	20+75	120	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-4Д	50+120	120	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-4Е	90+200	120	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-5А	20+150	1	10	15	0,75	70	150	20	-	-"
TM-5Б	35+80	1	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-5В	60+180	2	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-5Г	110+250	3	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
TM-5Д	20+60	1	-"	25	-"	-"	-"	25	-	-"
ITM305	25+80	200	-"	15	0,5	40	100	10	-	-"
ITM305А	60+180	240	1,5	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
ITM305Б	40+120	240	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-	-"
ITMI15А	20+60	1	50	50	0,2	-	-"	-	50	50
ITMI15Б	50+150	1	-"	-"	0,1	-	-"	-	-"	-"
ITMI15В	20+60	1	-"	70	0,2	-	-"	-	-"	-"
ITMI15Г	50+160	1	50	70	0,1	-	100	10	50	50
TM-10	14+60	30	3	20	2,5	10	-"	-	15	15С
TM-10А	28+120	30	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10Б	7+32	30	-"	30	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10В	14+60	30	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10Г	7+32	60	-"	20	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10Д	14+60	60	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10Е	28+120	60	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-10Ж	55	60	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-11	7+40	0,1	10	30	0,5	50	60	20	20	-"
TM-11А	10+60	0,5	10	15	-"	-"	-"	-"	-"	-"
TM-11Б	19+160	0,5	10	15	-"	-"	-"	-"	-"	-"
2TM103А	10+50	3	1,5	120	3,3	15	-"	-"	7,5	75

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2ТМГ03Б	1В+90	3	1,5	120	3,3	15	60	20	7,5	7,5
2ТМГ03В	30+150	3	—"	80	—"	—"	—"	—"	—"	—"
2ТМГ03Г	10+50	3	3	80	—"	—"	—"	—"	—"	—"
2ТМГ03Д	1В+90	3	3	80	—"	—"	—"	—"	—"	—"

где  $B_{ст}$  - коэффициент усиления по току;  
 $f_{\omega}$  - предельная частота усиления по току;  
 $U_{\omega 6}$  - максимально допустимое напряжение между эмиттером и базой;  
 $U_{кз}$  - максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером;  
 $U_{кн}$  - напряжение насыщения;  
 $I_{к}$  - максимально допустимый ток коллектора;  
 $I_{кн}$  - ток коллектора импульсный, при длительности импульса 10 мксек;  
 $I_{кз}$  - ток коллектора закрытого транзистора;  
 $I_{к0}$  - обратный ток коллектора;  
 $P_{к}$  - максимально допустимая мощность рассеяния на коллекторе.

### 13. Элементы в микромодульном исполнении

При разработке микромодульной аппаратуры следует учитывать, что не все типы радиодеталей могут быть размещены на микроплатах. Поэтому промышленность наряду с микроэлементами для микромодульной аппаратуры выпускает и элементы в микромодульном исполнении. Элементы в микромодульном исполнении - это малогабаритные радиоэлементы, по своей конструкции подобные микромодулям. Габаритные размеры их равны или кратны размерам микромодуля с учетом зазора между микромодулями при их установке в узлах (11, 28, 35 мм). Высота элементов в микромодульном исполнении не превышает максимальную высоту микромодулей. Полярные элементы имеют ключ для ориентирования выводов и установки элементов на печатной плате. Выводы элементов круглые, диаметром 0,3+0,5 мм, луженые или серебряные, и размещены на расстоянии 3 мм друг от друга. Конструкция

элементов такова, что лак не проникает внутрь элемента при лакировке микроблока. Промышленность выпускает следующие типы элементов в микродульном исполнении.

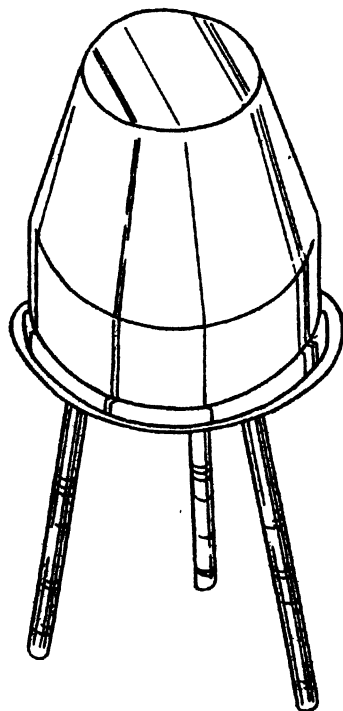


Рис. У.6. Транзистор в микродульном исполнении типа IT403

Транзисторы IT403—германиевые, сплавные (рис. У .6). Электрические параметры транзисторов IT403 при +20°C приведены в табл. У .18.

Таблица У.18

Электрические параметры транзисторов

Параметры	1Т403							
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И
Коэффициент усиления по току, при $U_K=0, I_a, U_K=5в$	20+ 60	50+ 150	20+ 60	50+ 150	50+ 150	-	20+ 60	50+ 150
Обратный ток коллектора при максимально допустимом напряжении на коллекторе, мка	50	50	50	50	50	50	70	70
Максимально допустимое напряжение между коллектором и базой, в	45	45	60	60	60	60	80	80
Максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером, в	30	30	45	45	45	45	60	60
Максимально допустимое напряжение между эмиттером и базой, в	20	20	20	20	20	20	20	20
Предельная частота, кГц	8	8	8	6	6	8	8	8
Тепловое сопротивление, град/вт : с теплоотводом	15	15	12	14	15	12	15	15
без теплоотвода	100	100	100	100	100	100	100	100

Максимально допустимая мощность, рассеиваемая транзистором, вычисляется по формуле

$$P_{к макс} = \frac{85 - t^{\circ}}{R_t}$$

где  $85$  - максимальная температура перехода ( $^{\circ}C$ );  
 $t^{\circ}$  - температура окружающей среды ( $^{\circ}C$ );  
 $R_t$  - тепловое сопротивление ( $^{\circ}C/вт$ ).

В микромодульном исполнении промышленность выпускает подстроечные резисторы типа СПЗ-6 и СП5-6 и конденсаторы типа К53-6А и К73П-3. Параметры этих элементов приведены в таблицах У.2 и У.3 соответственно главы III.

Катушки индуктивности МКИ-3, МКИП-3, МКИС-3 - постоянные, переменные и связанные - предназначены для работы в цепях переменного и постоянного тока с постоянным напряжением 100в при токе нагрузки до 5 ма. Изготавливаются катушки на номинальные значения индуктивностей:

- 3150+63000 мкГн - для МКИ-3, МКИП-3 с высотой 16,5 мм,
- 10000+400000 мкГн - для МКИ-3, МКИП-3 с высотой 20,5 мм,
- 4000+25000 мкГн - для МКИС-3 с высотой 16,5 мм.

Величина температурного коэффициента индуктивностей указана в табл. У.19.

Т а б л и ц а У.19.

Характеристики катушек индуктивности

Номинальная величина индуктивности, мкГн	Температурный коэффициент	
	-60 ++20°С	+20+85°С
I+315	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	$\pm 300 \cdot 10^{-6}$
400+1000	$(-200+400) \cdot 10^{-6}$	$(-100+400) \cdot 10^{-6}$
I250+400000	$(-200+800) \cdot 10^{-6}$	$(-100+500) \cdot 10^{-6}$

Добротность катушек находится в пределах от 25 до 90 - для МКИ-3 и МКИП-3 и от 45 до 80 - для МКИС-3. Коэффициент трансформации МКИС-3 - от I до 10. Величина коэффициента связи для МКИС-3 - не менее 0,8. Сопротивление изоляции между обмотками - не менее 100 мом.

Трансформаторы согласования низкой частоты ММТС-8+13 предназначены для работы при температурах от -60 до +85°С в схемах низкочастотных трактов.

Трансформаторы рассчитаны на работу в диапазоне частот от 300 до 10000 гц с неравномерностью частотной характеристики не более 5 дб. Вес трансформаторов менее 14 г. Электрические параметры трансформаторов приведены в табл. У.20.

Т а б л и ц а У.20

## Электрические характеристики трансформаторов

Тип трансформатора	Входн. сопр., кон	Выходн. сопр., от	к. п. л.	Макс. напряж. на I обмот., в з.ф.	Ток изд	Коэффициент трансформации номн.	Индукт. перем. обмотки, Гн	Индукт. рассеян. Гн	Сопротивление обмоток пост. току при +20°С,	
									первичн.	вторичн.
МЛТС-8	1,92 (1-3) (4-6)	4000 (7-9)	0,65	I (1-3)	τ	1,79	1,5 (1-3) (4-6)	0,11 (1-3) (4-6)	200 (1-3) (4-6)	1700 (7-9)
МЛТС-9	8,2 (1-2)	430 (3-4) (5-6)	0,8	4 (1-2)	3	0,35	1,5 (1-2)	0,23 (1-2)	510 (1-2)	100 (3-4) (5-6)
МЛТС-10	12,5 (1-3)	400 (4-6)	0,8	10 (1-3)	1	0,18	6 (1-3)	0,5 (1-3)	1700 (1-3)	26 (4-6)
МЛТС-11	12,5 (1-3)	2000 (4-6)	0,8	10 (1-3)	1	0,45	6 (1-3)	0,5 (1-3)	1750 (1-3)	210 (4-6)
МЛТС-12	16 (1-3)	1000 (4-5) (5-6)	0,85	13 (1-3)	1	0,27	7,5 (1-3)	0,75 (1-3)	1650 (1-3)	110 (4-5) (5-6)
МЛТС-13	28 (1-2)	4150 (3-4)	0,9	2 (1-2)	1	1,26	5 (1-2)	1,5 (1-2)	1000 (1-2)	1700 (3-4)

Сопротивление изоляции между первичными и вторичными обмотками трансформаторов и между симметричными частями этих обмоток не менее 100 мом.

Линии задержки ММЛЗ и ММЛЗ-М идентичны по внешнему виду и отличаются только электрическими параметрами.

Электрические параметры линий задержки ММЛЗ указаны в табл. У.21.

Т а б л и ц а У.21  
Электрические параметры линий задержки типа ММЛЗ

Параметры	ММЛЗ	ММЛЗ	ММЛЗ	ММЛЗ
	0,5/300	0,5/600	0,5/1200	1,0/600
Время задержки, мксек	0,45+0,55	0,45+0,55	0,45+0,55	0,45+1,1
Длительность переднего фронта на выходе, мксек	0,18	0,18	0,18	0,32
Коэффициент отражения, %	10	10	10	10
Коэффициент передачи	0,8	0,9	0,9	0,9
Температурная неустойчивость, %	1,5	1,5	1,5	1,5

Электрические параметры линий задержки типа ММЛЗ-М даны в табл. У.22.

Т а б л и ц а У.22

Электрические параметры линий задержки

Параметры	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М
	0,25/75	0,25/150	0,5/150	1,0/300
	2	3	4	5
Время задержки линии, мксек	0,225+0,275	0,225+0,275	0,45+0,55	0,9+1,1
Длительность переднего фронта на выходе линии, мксек	0,12	0,12	0,17	0,3

Параметры	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М	ММЛЗ-М
	0,25/75	0,25/150	0,5/150	1,0/300
	2	3	4	5
Коэффициент отражения, %	10	10	10	10
Коэффициент передачи	0,9	0,9	0,9	0,9
Температурная неустойчивость, %	5	5	5	4

Малогабаритная кнопка МКП2-1 (рис. У.7) двухполюсного включения с фиксацией положения "включено" и световой сигнализацией предназначена для работы в цепях постоянного тока от 5 до 500 мА напряжением от 1,5 до 30В.

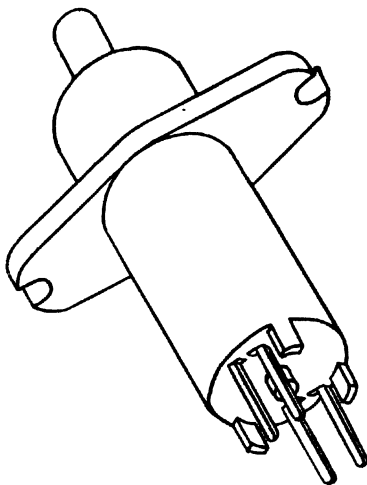


Рис. У.7. Кнопка в микро-  
дульном исполнении типа  
МКП-2-1



Световым элементом кнопок является специальная миниатюрная лампа накаливания типа ЭМ с номинальным напряжением 9+10в и током 50 ма.

В процессе эксплуатации допускается замена лампы. Усилие включения имеет значение порядка 400+1000 г.

Высокочастотные переключатели МПВ-1 изготавливаются с одной секцией, одним замыкателем и 8 рабочими цепями (тип МПВ-1-1-1); с 2 замыкателями и 4 рабочими цепями (тип МПВ-1-1-2); с 3 замыкателями и 3 рабочими цепями (тип МПВ-1-1-3) и 5 замыкателями и 2 рабочими цепями (тип МПВ-1-1-5) на номинальное постоянное напряжение 1,5+30в и ток 5+200ма или переменное напряжение 1,5+100в, частоту  $15+50 \cdot 10^6$  гц и ток 5+300 ма. Момент переключения, измеренный на оси находится в пределах 0,2+1,0 кгсм.

Емкость между каждыми двумя разомкнутыми контактами, любым контактом и корпусом не более 1 пф. Переключатели обеспечивают 10000 переключений.

Низкочастотные переключатели МПН-1 рассчитаны на номинальное постоянное напряжение 1,5+30в и ток 5+500ма или переменное напряжение 1,5+30в, частоту 50 гц и ток 5+50ма.

Момент переключения, измеренный на оси, находится в пределах 0,2+1,2 кгсм. Переключатели обеспечивают 15000 переключений.

Малогабаритные сигнальные фонари МФС-1 рассчитаны на номинальное напряжение 9 в. Потребляемая мощность 500 мвт. Общий вид фонаря МФС-1 показан на рис. У.8.

Высокочастотные разъемы МРВ-50 имеют переходное сопротивление контактных пар - штырь-гнездо и корпус-корпус - не более 0,01 ом. Коэффициент стоячей волны по напряжению в диапазоне частот 500+3000 мгц - не более 1,5.

Разъемы выдерживают 500-кратное сочленение.

Низкочастотные разъемы МРН изготавливаются нескольких типов: однорядные МРН4-1 с 4 контактами; МРНВ-1 с 8 контактами, МРН14-1 - с 14 контактами и МРН22-1 - с 22 контактами; двухрядные - МРН22-2, МРН32-2, МРН44-2. Разъемы однорядные допускают рабочее напряжение до 200в при токе до 1,0а, двухрядные - до 50в при токе 0,5а. Усилие расчленения - от 0,2 до 5 кг (у 44 контактных разъемов).

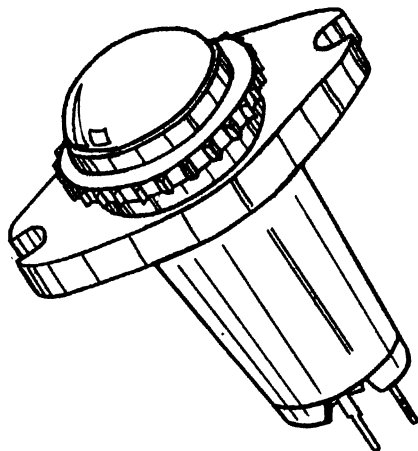


Рис. У.8. Стандартный фонарь в  
микромодульном исполнении типа  
МФС-1

Контрольные гнезда МКК и штеккера МШ изготавливаются в нескольких вариантах: МКК-1-1 - в прямом исполнении с креплением на шасси, МКК-2-1 - в прямом исполнении с креплением на печатной плате; МКК-2-2 - в угловом исполнении с креплением на печатной плате и МКК-3-1 - в прямом исполнении с креплением на шасси. Гнездо и штеккер допускают рабочее напряжение до 200 в и силу тока до 1а.

Держатели предохранителей МШ и предохранители типа ВП-1 изготавливают 3 видов: МШ-1-1 - в прямом исполнении с креплением на шасси, МШ-2-1 - в прямом исполнении с креплением на печатной плате, МШ-2-2 - в угловом исполнении с креплением на печатной плате. Держатели предохранителей рассчитаны на напряжение до 200в и силу тока до 2а. Держатели предохранителей МШ используются для предохранителей ВП-1-1. Промышленностью выпускаются также предохранители ВП-1-2 с выводами на концах, которые припаиваются к монтажным платам.

#### 14. Технология изготовления микромодулей

Типовой технологический процесс изготовления микромодулей в зависимости от вида производства (опытное или серийное) может несколько изменяться, однако последовательность и содержание технологических операций будут оставаться в основном одинаковыми.

#### Входной контроль и комплектация микроэлементов

При получении микроэлементов от завода-поставщика производится прежде всего проверка правильности упаковки. Микроэлементы распаковывают из посылочной тары без нарушения герметизации основной упаковки и проверяют маркировку, наличие паспортов и упаковочных ведомостей в соответствии с техническими требованиями. Затем микроэлементы передаются на склад для хранения. При обнаружении несоответствия маркировки, упаковки и т.д. требованиям технических условий микроэлементы возвращаются заводу-поставщику. На упаковочной таре отмечается дата поступления микроэлементов на хранение, номер накладной, количество микроэлементов в партии, завод-поставщик и т.п.

Микроэлементы раскладываются в ящиках стеллажей склада. На ящиках стеллажей указываются типонаминалы хранящихся микроэлементов. Хранение микроэлементов может быть: длительным (в герметизированной таре), но не более гарантируемого заводом-изготовителем

Срока хранения; кратковременным, в полиэтиленовой упаковке или в открытом состоянии, также не более гарантируемого срока хранения. Не допускается хранение микроэлементов навалом, так как это приводит к их повреждению.

По заявке производства микроэлементы со склада хранения передают на входной контроль. В лаборатории входного контроля вскрывается упаковка и проводится проверка всех микроэлементов: внешнего вида, качества лужения пазов, габаритов и установочных размеров и электрических параметров, которые должны соответствовать техническому паспорту. Не допускаются такие виды дефектов, как отступление геометрических размеров по периметру и высоте от указанных в чертеже, сколы и трещины на микроплатах, неправильное заполнение пазов припоем, наплывы и замыкание соединительных пазов, наличие темных окисленных мест, загрязнений, окислов, жиров, пыли и т.п.

Проверка электрических параметров производится на универсальной контрольно-измерительной аппаратуре в соответствии с требованиями и методиками, указанными в технических условиях на микроэлементы. Проверяются основные электрические параметры, например, емкость и сопротивление конденсаторов и резисторов, добротность и индуктивности, обратные токи коллектора и коэффициент усиления по току микротранзисторов и т.д. При комплектации микроэлементы укладываются в специальную тару.

### Сборка и пайка микромодулей

Сборка микроэлементов в микромодули производится в сборниках типа "гребенка".

Сборник представляет собой рамку с двумя осями, на которых плотно набраны металлические пластины толщиной 0,25 мм с эксцентричным расположением фиксирующих отверстий. Поворачивая пластины вокруг осей, создают пакеты, в которых пазы чередуются с выступами в соответствии с чертежом.

Пайка микромодулей может производиться вручную паяльником или полуавтоматически — с помощью специального приспособления, которое автоматически выдерживает заранее установленный режим пайки (температуру и время). При пайке электрический ток пропускается через

стальную ленту, которая в течение 2-3 сек разогревается до температуры 300-320°C. Эта лента приводится в соприкосновение с натянутыми соединительными проводниками, расплавляя припой во всех пазах микроэлементов, контактирующих с лентой. При пайке используется некоррозийный флюс, который наносится кисточкой на соединительные проводники и не требует последующей промывки этажерки.

Режим пайки зависит от количества микроэлементов в микромодуле, их расположения относительно друг друга, их толщины и т.д. После пайки соединительные проводники с помощью этого же приспособления отрезаются до необходимого размера. Качество пайки контролируется и затем каждый микромодуль обертывается в целлофановую ленту, на которую наклеивается условная маркировка.

Микромодули укладывают в тару и транспортируют на операцию герметизации.

#### Герметизация микромодулей

Герметизация микромодулей может осуществляться различными способами. Сборка микроэлементов заливается в форме эпоксидным компаундом, после отверждения которого обеспечивается достаточная жесткость и устойчивость микромодуля к различным внешним эксплуатационным воздействиям.

Возможна герметизация микроэлементов с помощью металлической капсулы с предварительной заливкой в форме вспененными материалами. Торец капсулы заливается эпоксидным компаундом.

К компаундам, используемым для заливки микромодулей, предъявляется целый ряд требований. Компаунд должен обеспечивать хорошее заполнение заданных объемов, достаточную механическую прочность в полимеризованном состоянии, минимальную водопоглощаемость, высокую электрическую прочность. Компаунд должен обладать высокой нагревостойкостью и термостойкостью при циклическом воздействии температур, а при отверждении иметь малую усадку.

Наибольшее применение нашли компаунды на основе эпоксидных смол с добавкой пылевидного кварца, молотой слюды, сажи и отвердителей. Каждая из составных частей играет определенную роль в формировании исходных свойств компаунда. Отвердитель способствует необратимому отверждению эпоксидной смолы. Пылевидный кварц и смола ослабляют внутренние механические напряжения в микромодуле, ко-

торые возникают после отверждения в результате разности значений коэффициентов линейного расширения металлических деталей модуля и компаунда. Для уменьшения хрупкости и продления жизненности<sup>х)</sup> в компаунд вводят различные пластификаторы. Перед приготовлением компаунда шпелевидный кварц прокаливают и просеивают через мелкое сито, слюдяную муку и сажу высушивают в термостате. После прокаливания и просушки наполнители, во избежание потери свойств, хранят в эксикаторе. Составляющие компаунда соединяют в необходимой пропорции, тщательно перемешивают, затем компаунд вакуумируется.

Для герметизации микромодулей используют заливочные формы различной конструкции, одноместные и многоместные. Перед заливкой детали форм очищаются от остатков компаунда предыдущей заливки и насухо протираются. Для предотвращения прилипания компаунда к стенкам рабочих полостей детали формы смазывают специальным составом и собранную форму в течение 2-3 часов прогревают в термостате.

Защита выводов микромодулей и оформление торцов при заливке производится с помощью специальных насадок. Применяются резиновые насадки однократного использования, металлические и пластмассовые многократного использования. Насадки надеваются вручную или с помощью специальных приспособлений.

Микромодули с надетыми насадками укладываются в формы, помещаются в термостат и выдерживаются в нем для просушки микроэлементов при повышенной температуре (около 70°C) в течение 2-3 часов. Заливка компаунда в формы с помещенными в них микромодулями может производиться вручную с помощью бумажных мерных конусов или полуавтоматически с помощью литевых машин.

После полимеризации компаунда формы с микромодулями извлекают из термостата, охлаждают до комнатной температуры и разбирают. Разобранные формы и металлические насадки готовят к заливке следующих партий. Залитые микромодули направляются на операцию снятия литников и облоя.

---

х) Жизненность - способность компаунда сохранять достаточную твердость в течение определенного периода времени.

После разборки форм на поверхности микро модуля иногда остаются облицовочный состав форм. Это нежелательно, так как может отразиться на качестве маркировки, которая проводится после герметизации. Поэтому в производстве практикуется промывка микро модулей. При наличии на поверхности микро модуля раковин, диаметр которых больше чем 0,8 мм, поверхность микро модуля зачищается, обезжиривается, и раковины заполняются компаундом по технологии заливки. После полимеризации исправленные места зачищают.

В процессе герметизации контролю подвергаются: технологические режимы нагрева форм, приготовления компаунда и заливки микро модулей; геометрические размеры микро модуля - ширина, длина и высота, длина выводов, перпендикулярность торца относительно боковых граней; внешний вид микро модуля (следы зажимов, деформации, обрывы выводов не допускаются).

На поверхности микро модулей должны отсутствовать царапины, сколы и т.п. По торцевым поверхностям недопустимы раковины, воздушные пузыри, облой, затекание компаунда на выводы более 1 мм. Боковые поверхности микро модуля должны быть ровными, глянцевыми, без пятен. Допускаются незначительные усадочные мениски в интервалах между микроэлементами, единичные пузырьки и раковинки в количестве не более 3 на каждой грани микро модуля и диаметром не более 0,5 мм.

После герметизации производится маркировка микро модулей. В качестве краски для маркировки используются составы на эпоксидном лаке с красящим веществом. Поверхность микро модуля, подлежащая маркировке, должна быть ровной, гладкой, без изъянов, загрязнений и жировых пятен.

Маркировочный знак наносится резиновым штампиком путем соприкосновения его с растертой на стекле маркировочной краской и перенесения затем на маркируемую поверхность легким нажимом. Знаки просушиваются.

После маркировки производится рихтовка выводов микро модуля, микро модули укладываются в тару и направляются на термоэлектротренировку. В случае необходимости перед тренировкой проверяются электрические параметры.

### Тренировка микромодулей

Сущность тренировки микромодулей заключается в том, чтобы в условиях постоянного воздействия повышенной температуры и электрических напряжений вызвать ускоренное "выжигание" ненадежных элементов с целью исключения эксплуатации тех микромодулей, которые имеют скрытые дефекты. Термоэлектротренировка микромодулей осуществляется на специальных стендах, которые обеспечивают необходимый температурный и электрический режим. Несмотря на то, что термоэлектротренировка значительно удлиняет цикл изготовления микромодулей, включение ее в технологический процесс обязательно, так как в результате повышается качество выпускаемых микромодулей примерно на порядок и в конечном счете эта операция окупается.

После термоэлектротренировки микромодули проверяются на соответствие техническим условиям по объему. Проверка электрических параметров может производиться вручную с помощью стандартных измерительных приборов или полуавтоматически с помощью специальных установок. После контроля микромодули упаковываются в тару.

### 15. Проектирование микромодулей

Процесс разработки микромодулей от выбора схемы до проведения испытаний и составления паспорта разделяется на следующие этапы:

анализ электрической схемы и функциональное деление на микромодули;

лабораторное макетирование микромодулей;

конструирование и изготовление опытных образцов;

испытания и аттестация микромодулей (выпуск паспорта и технических условий).

При микромодульном конструировании разработчик электронной аппаратуры разделяет общую электрическую схему блока на отдельные функциональные узлы - микромодули. Для этого необходимо учитывать определенные критерии, в основе которых лежат ограничения, накладываемые спецификой микромодульного конструирования.

Таковыми критериями являются:

количество узловых функциональных точек схемы; максимально допустимое количество микроэлементов в микромодуле; максимально допустимая высота микромодуля; максимально допустимое количество разрезов соединительных проводников;



- количество плат с перемычками;
- допустимая мощность рассеяния микро модуля средней высоты в составе микро модульного блока;
- допустимая мощность рассеяния одиночного микро модуля средней высоты;
- максимально допустимые напряжения между соединительными проводниками.

Первые пять критериев являются первичными. Они учитываются при предварительном функциональном делении схем. Остальные, вторичные критерии, принимаются во внимание для физической оценки выполненного деления и выбора параметров микроэлементов.

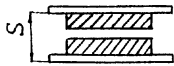
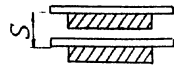
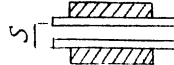
#### Конструирование микро модулей

Конструирование микро модулей начинается с раскладки электрической схемы. Под раскладкой понимается процесс создания монтажной схемы, определяющей взаиморасположение микроэлементов в составе микро модуля.

Если электрическая схема критична с точки зрения взаимного влияния цепей, то при ее раскладке учитывается влияние емкостных связей между микроэлементами (табл. У.23) и соединительными проводниками плат (табл. У.24), разносятся входные и выходные цепи, а также проводники, несущие высокочастотный потенциал, учитывается разность потенциалов между соседними проводниками и т.д.

Т а б л и ц а У.23

Емкостные связи между микроэлементами

Расположение микроэлементов в микро модулях	Расстояние (шаг), мм $S$	Емкость, пф	
		до герметизации	после герметизации
	0,75	1,775	3,62
	1,5	1,455	2,73
	3,0	1,450	2,34
	0,75	1,635	3,08
	1,5	1,38	2,36
	3,0	1,30	2,02
	0,75	1,435	2,81
	1,5	1,310	2,41
	3,0	1,265	1,91

Т а б л и ц а У.24

Емкостные связи между соединительными проводниками микро модуля

Высота микро-модуля, мм	Расстоя-ние (шаг), мм	Количест-во плат в микро-модуле	Номера соеди-нительных проводни-ков	Емкость, пф	
				до гермети-зации	после гер-метизации
15	0,75	20	I-2	1,26	1,68
			I-2	1,52	2,11
15	1,5	11	I-2	1,13	1,46
			I-2	1,28	1,74
15	3,0	6	I-2	1,0	1,37
			I-12	1,08	1,59

Так как дополнительные монтажные связи в составе микро модуля могут явиться причиной возникновения взаимного влияния в электрических цепях и, кроме того, вызвать увеличение размеров микро модуля за счет применения плат с перемычками, лучшим решением задачи следует считать вариант с меньшим количеством перемычек.

Обычно раскладка выполняется для двух положений опорного микроэлемента: нормального и перевернутого. Однако часто в поисках лучшего решения конструктор изменяет начальное положение многовыводного опорного микроэлемента, поворачивая его на определенный угол. При установке оксидно-полупроводниковых конденсаторов или диодов следует учитывать положение "+" вывода, который подключается к пазу с меньшим номером.

Значительное сокращение трудоемкости конструкторских работ достигается при использовании электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ).

Среднее машинное время на раскладку одного микро модуля составляет приблизительно минуту. Полное время на один микро модуль, которое складывается из машинного и вспомогательного, составляет 3-4 минуты. Это в 20-30 раз меньше времени, которое затрачивается в среднем на один микро модуль при конструировании обычным методом. При конструировании микро модулей с помощью ЭЦВМ полностью устраняются субъективные ошибки конструкторов, рассматриваются все возможные варианты схем раскладки микро модуля, из

которых конструктором выбираются оптимальные. Информация, выдаваемая ЭЦВМ, пригодна для непосредственного использования в автоматической линии для изготовления микромодулей.

В табл. У.25 приведены сравнительные данные по ручному и машинному конструированию микромодулей. Из таблицы видно, что в подавляющем большинстве микромодулей, сконструированных ЭЦВМ, или совсем отсутствуют перемычки и разрезы (16,6%), или имеются только одна-две перемычки (75%), в то время как большинство микромодулей, сконструированных человеком, содержит один-два разреза и от двух до пяти перемычек (более 55%).

Т а б л и ц а У.25

Эффективность машинного конструирования

Виды решений	Методы	
	машинный	ручной
	% от общего числа схем	
Без перемычек и разрезов	16,6	-
С одной перемычкой	37,5	8,4
С двумя перемычками	37,5	21,0
С тремя перемычками	-	4,2
С четырьмя перемычками	-	-
С одним разрезом	4,2	8,4
С одним разрезом и двумя перемычками	4,2	4,2
С одним разрезом и тремя перемычками	-	8,4
С одним разрезом и четырьмя перемычками	-	4,2
С одним разрезом и пятью перемычками	-	4,2
С двумя разрезами и двумя перемычками	-	16,8
С двумя разрезами и тремя перемычками	-	21,0

Основные требования к конструкции микромодулей заключаются в следующем. Все микроэлементы и микроплаты располагаются в составе микромодулей с шагом, равным  $S = n \cdot 0,25$ ,

где  $S$  - шаг сборки микроэлементов;

$n$  - 3,4,5.

Минимальное расстояние между выступающими частями соседних микроэлементов должно быть не менее 0,2 мм.

По условию обеспечения заданной механической прочности не рекомендуется изготавливать микромодули высотой более 25 мм.

Количество разрезов соединительных проводников в микромодуле строго ограничивается. Общее количество разрезов не должно превышать пяти. На каждой грани микромодуля допускается не более двух разрезов. Ширина вырезанного участка проводника принимает равной 0,2 мм. Разрезы в интервалах между крайними микроплатами не допускается. В точке разреза расстояние между микроплатами должно быть не менее 1 мм. Удобно делать разрезы в месте установки крупных микроэлементов - транзисторов, трансформаторов и др.

#### Виды конструкций микромодуля

С целью увеличения механической прочности микромодулей и защиты микроэлементов от воздействия внешней среды микромодули герметизируют. Наиболее широкое распространение получили два способа герметизации: заливка компаундом и создание металлических капсул. Применение компаундов позволяет обеспечить защиту микроэлементов в составе микромодулей в условиях повышенной влажности (98%) окружающей среды при температуре +40°C в течение не менее 10 суток. Благодаря металлическим капсулам продолжительность защиты в указанных условиях увеличивается до 30 и более суток.

Применяются алюминиевые капсулы, получаемые методом ударной штамповки. Этажерка микромодуля (сборка микроэлементов) предварительно заливается изоляционным составом с низким удельным весом (например, пеностиролом). Залитый микромодуль помещается в капсулу и герметизируется с торца. Обычно герметичность достигается путем заливки торца капсулы эпоксидным компаундом или с помощью специальной керамической крышки, отверстия и кромки которой металлизированы. Выводы микромодуля пропускаются в отверстия крышки и оплавляются. Крышка соединяется с капсулой путем пайки по периметру.

Соединительные проводники после герметизации выводятся с одной стороны микромодуля на длину около 10 мм. При монтаже микромодулей в радиоаппаратуре выводы обрезаются в зависимости от толщины печатной платы.

### Маркировка микромодулей

Выводы микромодулей условно нумеруют. Если смотреть на нижний торец микромодуля, отсчет выводов производится по часовой стрелке. При этом выводы, направляемые вниз микромодуля, обозначаются цифрами 1, 2, 3... I1, I2, а выводы, направленные вверх, - цифрами 1', 2', 3'... I1', I2'. Все внешние цепи микромодуля соответствуют выводам I+I2.

Для определения начала отсчета при сборке микроэлементов в этажерку выводы 1, 2, 3 укорачиваются на 1 мм, после чего микромодуль герметизируется. Ориентируясь по укороченным выводам, герметизированные микромодули маркируют, т.е. краской наносят номер чертежа микромодуля, дату изготовления, товарный знак завода-изготовителя и обозначение I-го вывода. Принято располагать номер и дату изготовления на блоковой поверхности микромодуля, а обозначение I-го вывода на торцах.

Основание маркировки обращено в сторону нижнего торца микромодуля и позволяет определить порядковый номер любого вывода в герметизированном микромодуле при его установке и монтаже в аппаратуре.

### Правила оформления чертежей

Однотипность геометрических форм и размеров микромодулей способствует типизации оформления конструкторской документации.

Комплект конструкторской документации на микромодуль включает принципиальную электрическую схему, сборочный чертеж герметизированного микромодуля, сборочный чертеж этажерки без герметизации, чертежи микроплат с перемычками, технические условия и паспорт.

Каждый из перечисленных документов является типовым, поскольку оформление его, независимо от функционального назначения и законченности электрической схемы, однотипно. Выпуск конструкторской документации сводится к заполнению выполненных определенным образом табличных чертежей или бланк-форматов, которые могут быть заранее отпечатаны типографским способом. Это способствует значительному росту производительности конструкторского труда, повышению его качества и в конечном итоге снижает себестоимость выпускаемой продукции.

### Схема сборки

Результаты, полученные при раскладке электрической схемы после дополнительной обработки, заносятся в сборочный чертеж микро модуля в виде таблицы, называемой схемой сборки. В таблице указывается взаимное расположение микровыводов в микро модуле, угол поворота платы, цоколевка микровывода, высота микровыводов и толщина микроплат, вид и положение плат с перемычками, места разрезов проводников. Горизонтальные линии схемы сборки соответствуют соединительным проводникам и нумеруются в соответствии с номерами пазов опорного микровывода. В случае разреза соединительного проводника горизонтальная линия разрывается.

Микровыводы и платы с перемычками записываются в столбцах схемы в соответствии с выбранной цоколевкой в виде контурных линий оканчивающихся окружностями. Число заполненных столбцов таблицы равно числу микровыводов в данном микро модуле. Полярность, или условные обозначения выводов микровыводов, указывается около соответствующих точек. Например, для транзисторов указывается - Б, Э, К, для трансформаторов - начало и конец каждой обмотки - Н, К, Н - К, для диодов - знаки плюс и минус и т.п.

Взаимное расположение элементов в составе микро модуля в основном определяется положением разрезов соединительных проводников. Например, элементы  $R_5$  и  $C_2$  не могут быть установлены перед транзистором III1, а  $R_1$  - перед III2.

Многовыводные элементы, являющиеся опорными при раскладке, располагаются в нижней части микро модуля, а элементы, используемые для настройки, - в верхней. Элементы, рассеивающие значительные мощности, распределяются по высоте микро модуля.

Если толщина плат крайних микровыводов менее 1 мм, с обеих сторон микро модуля устанавливаются свободные типовые микроплаты. Они вводятся для устранения отрывов проводников от пазов крайних элементов при одевании на них насадок, применяемых при герметизации микро модулей. Свободные микроплаты устанавливаются в нормальном положении.

Положение микровыводов и цоколевка их рассчитываются по приведенной ниже методике. Отсчет микровыводов и плат в схеме сборки ведется справа налево. При этом выводы, расположенные справа, обозначаются цифрами без штрихов, а выводы, расположенные слева, - цифрами со штрихами, например 1-1', 2-2', 3-3' и т.д.

Высота микроэлементов и толщина микроплат указывается с учетом верхнего предельного отклонения, например, 3,5 вместо  $3,1^{+0,4}$ .

Расчет положения микроэлементов

При вращении микроплаты нумерация пазов изменяется. Иначе говоря, номер каждого паза получает приращение  $\pm\delta$ . Приращения, получаемые при вращении микроплаты по часовой стрелке, будем обозначать положительными числами, против часовой стрелки – отрицательными. Приращения номера паза микроплаты в нормальном и перевернутом положениях будут противоположны по знаку.

Величина приращения номера каждого паза при повороте микроплаты на угол  $90^\circ$  равна 3. Переворот микроплаты эквивалентен приращению – 13. Значения приращений при различных положениях микроплаты приведены в табл. У.26.

Т а б л и ц а У.26

Приращения номеров пазов

Угол поворота		$0^\circ$	$90^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$
Приращение номера паза	Нормальное положение	-	+3	+6	+9
	Перевернутое положение	-13	-16	-19	-22

Таблица позволяет рассчитать положение или цоколевку микроэлементов в составе микромодуля по формуле

$$|N| = |N_0 + \delta|,$$

где  $N$  – номер паза микроэлемента при повороте;  
 $N_0$  – номер паза микроэлемента в нулевом положении,  
 $\pm\delta$  – приращение.

Если результат вычисления по абсолютной величине превышает общее количество пазов (12), то его необходимо уменьшить на эту величину.

В качестве примера определим нумерацию пазов микроэлемента (цоколевкой I-4 при повороте его на  $180^\circ$  в перевернутом положении

$$|N_1| = |N_{01} - \delta| \quad |N_4| = |N_{04} - \delta|$$

$$|N_{01}| = 1 \quad |N_{04}| = 4.$$

По табл. У.26 определяем:

$$\begin{aligned} |N_1| &= 1 - I9 & -I2 & = I8 & - I2 & = 6 \\ |N_4| &= 4 - I9 & -I2 & = I5 & - I2 & = 3 \end{aligned}$$

Результаты расчета положения микроэлементов для принятых вариантов цоколевки приведены в табл. У.27-У.29.

Т а б л и ц а У.27

Положение микроэлементов с цоколевкой I-4; I-5; I-8  
в микромодуле

Положение микроплаты (угол поворота)		Варианты подключения микроэлементов		
Нормальное	Перевернутое	I I-4	II I-5	III I-8
0°	-	4-7	4-8	4-II
90°	-	7-I0	7-II	7-2
180°	-	I0-I	I0-2	I0-5
270°	0°	I2-9	I2-8	I2-5
-	90°	3-I2	3-II	3-8
-	180°	6-3	6-2	6-II
-	270°	9-6	9-5	9-2

Т а б л и ц а У.28

Положение микроэлементов с цоколевкой I-6 и 5 в микромодуле

Положение микроплаты (угол поворота)		Варианты подключения микроэлементов	
Нормальное	Перевернутое	I	II
0°	-	I-6	2-5
90°	-	4-9	5-8
180°	-	7-I2	8-II
270°	-	I0-3	II-2
-	0°	I2-7	II-8
-	90°	3-I0	2-II
-	180°	6-I	5-2
-	270°	9-4	8-5



Положение транзисторов в микро модуле

Положение микроплаты (угол поворота)		Варианты подключения микроэлемента		
Нормальное	Перевернутое	Б	К	Э
0°	-	I	8	5
90°	-	4	II	8
180°	-	7	2	II
270°	-	10	5	2
-	0°	12	5	8
-	90°	3	8	II
-	180°	6	II	2
-	270°	9	2	5

Доработка принципиальной электрической схемы

После составления схемы сборки электрическая схема микро модуля дорабатывается. Доработка заключается в перенесении на электрическую схему обозначений соединительных проводников, разрезов и перемычек, которые проставляются в узловых точках схемы.

Если соединительный проводник не имеет разрезов, то около соответствующей ему узловой точки указывается полное обозначение проводника, например I-I, 2-2 и т.д.

В случае разреза проводника указывается только одна цифра, определяющая номер вывода, например I, 2, 3, 5. При наличии перемычки в микро модуле у соответствующей узловой точки проставляются цифры, определяющие номера всех соединяемых перемычкой проводников, например I0, 3-3'.

Расчет габаритных размеров микро модуля

В зависимости от положения соседних микроэлементов шаг их установки определяется по одной из следующих формул:

$$S_1 \geq 0,2 + t_{\text{макс}}, \quad (\text{У.1})$$

$$S_2 \geq 0,2 + h_{\text{макс}}, \quad (\text{У.2})$$

$$S_3 \geq 0,2 + h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} - t_{\text{мин}2}, \quad (\text{У.3})$$

$$S_4 \geq 0,2 + t_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} - t_{\text{мин}2}, \quad (\text{У.4})$$

где  $S$  - шаг установки соседних микроэлементов, мм;  
 $0,2$  - необходимое для прохождения компаунда минимальное расстояние между выступающими частями соседних микроэлементов;  
 $h_{\max}$  - максимальная высота микроэлемента, мм ( $h_{\max} = h + \Delta h$ );  
 $h$  - номинальный размер высоты микроэлемента, мм;  
 $\Delta h$  - величина верхнего предельного отклонения от размера  $h$ , мм;  
 $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  - предельные размеры толщины микроплаты микроэлемента, мм;  
 $t_{\max} = t + \Delta t$ ;  $t_{\min} = t - \Delta t$   
 $t$  - номинальный размер толщины микроплаты, мм;  
 $\Delta t$  - величина предельного отклонения размера  $t$ , мм.

Если между микроэлементами выполняется разрез соединительного проводника, то в зависимости от соотношения размеров шаг их установки рассчитывается по следующим формулам:

$$S_1 \geq 1 + t_{\max} \quad (У.5)$$

при  $h_{\max} - t_{\max} + 0,2 < 1$  ..  $S_2 \geq 1 + t_{\max}$ ;

при  $h_{\max} - t_{\max} + 0,2 > 1$   $S_2 \geq 0,2 + h_{\max}$ ;

при  $h_{\max 1} - t_{\max 1} + h_{\max 2} - t_{\min 2} + 0,2 < 1$   $S_3 \geq 1 + t_{\max 1}$ ;

при  $h_{\max 1} - t_{\max 1} + h_{\max 2} - t_{\min 2} + 0,2 > 1$   $S_3 \geq 0,2 + h_{\max 1} + h_{\max 2} - t_{\min 2}$ ;

при  $h_{\max 2} - t_{\min 2} + 0,2 < 1$   $S_4 \geq t_{\max 1} + 1$ ;

при  $h_{\max 2} - t_{\min 2} + 0,2 > 1$   $S_4 \geq 0,2 + t_{\max 1} + t_{\max 2} - t_{\min 2}$ .

Величина округления размера  $S$  изменяется при различных вариантах расположения микроэлементов.

Это свойство используется на практике для обеспечения допустимого максимального размера микромодуля, равного 25 мм.

Габаритный размер негерметизированного микромодуля с учетом приведенных выше соотношений может быть определен по формуле:

$$L_1 = \sum_1^n S_i + t_{\max n} \pm \Delta L, \quad (У.6)$$

где  $l_1$  - номинальный размер негерметизированного микро-  
дуля;  
 $S_i$  - шаг расположения микроэлементов;  
 $t_{\max n}$  - максимальный размер толщины последней микроплаты;  
 $n$  - количество элементов микро модуля;  
 $\Delta l$  - предельное отклонение размера  $l$ ,  $\Delta l = 0,5$  мм.

Величина поля допуска размера  $l$  ( $\delta = \pm 0,5$  мм) определя-  
ется допустимой точностью применяемого при сборке технологическо-  
го оборудования.

Размер герметизированного микро модуля определяется по формуле

$$l_2 = l_1 + 2\gamma + 2\Delta l + C, \quad (У.7)$$

где  $l_2$  - номинальный размер герметизированного микро модуля;  
 $\gamma$  - минимальная толщина слоя герметизации;  
 $C$  - величина округления размера  $l_2$ .

Для уменьшения количества применяемой оснастки и упрощения  
технологии герметизации размер  $l_2$  округляется до 0,5 мм в сторону  
увеличения, например, размер 23,25 мм округляется до 23,5 мм.

С учетом формулы (У.6) выражение (У.7) примет вид

$$l_2 = \sum_1^N S_i + t_{\max n} + 2\gamma + 2\Delta l + C.$$

## Г л а в а VI

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛЕНОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

#### I. Основные механизмы переноса носителей заряда в тонких пленках

Обычно под тонкой пленкой понимается пленка, имеющая толщину менее одного микрона.

Очевидно, что такое определение тонкой пленки весьма условно.

Для более точного определения понятия "тонкая пленка" ее толщина должна сравниться с определенными физическими параметрами ("физическими длинами").

Таковыми физическими параметрами, например, могут быть:

длина свободного пробега носителей заряда в пленке ;

дебаевская длина экранирования ;

радиус кривизны электрона в магнитном поле и т.п.

При толщине пленки  $\delta$ , меньшей длины свободного пробега  $L$ , электроны будут диффузно рассеиваться на поверхности пленки и сопротивление пленки возрастет, так как появился дополнительный механизм рассеяния, которым нельзя пренебречь. В этом случае на кривой зависимости удельного сопротивления от толщины пленки  $\rho = f(\delta)$  при  $\delta'_{кр} \approx L$  появится излом (рис. VI.1).

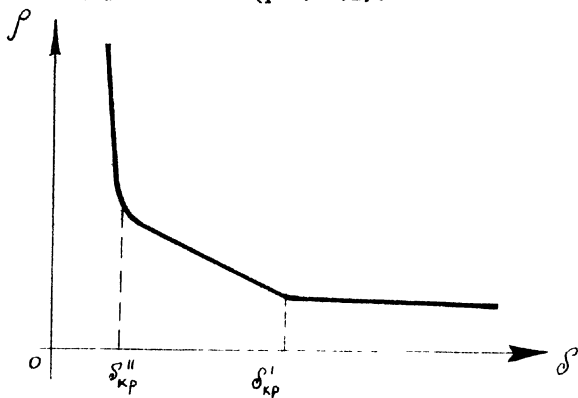


Рис. VI.1. Зависимость удельного сопротивления тонкой пленки от толщины

Тогда можно считать, что по отношению к удельному сопротивлению пленка будет тонкой при соблюдении условия  $\delta < \delta'_{кр} \cong L$ .

При дальнейшем уменьшении толщины пленки на кривой  $\rho = f(\delta)$  появится еще один излом в точке  $\delta''_{кр}$ , связанный с изменением морфологии (строения) пленки. При толщине пленки  $\delta < \delta''_{кр}$  сплошное непрерывное строение пленки нарушается и пленка приобретает "островковую" структуру, т.е. пленка, напыленная на подложку, состоит из отдельных островков. Сопротивление между отдельными островками велико, поэтому удельное сопротивление пленки с островковой структурой резко возрастает на несколько порядков.

При толщине пленок  $\delta \sim \delta''_{кр}$  их электрические свойства крайне нестабильны, появляется большой разброс параметров.

Поэтому пленочные активные и пассивные элементы изготавливают с толщиной пленок  $\delta \gg \delta''_{кр}$ , что обеспечивает удовлетворительную воспроизводимость параметров элементов.

По порядку величины  $\delta'_{кр} \sim 100 \text{ \AA}$ ,  $\delta''_{кр} \sim 10 \text{ \AA}$ .

Таким образом, по отношению к электропроводности в качестве критерия, определяющего тонкую пленку, может быть взят параметр  $\delta'_{кр} \cong L$  или  $\delta''_{кр}$ .

При рассмотрении свойств пленки в электрическом поле пленка может считаться тонкой при соблюдении условия

$$\delta_{кр} \cong 2Lg,$$

где  $Lg$  - дебаевская длина экранирования, т.е. расстояние, на котором потенциал в веществе со свободными носителями заряда уменьшается в  $e$  раз за счет экранирующего действия свободных зарядов.

При рассмотрении свойств пленки в магнитном поле пленка считается тонкой при условии

$$\delta_{кр} \cong 2R,$$

где  $R$  - радиус искривления траектории носителя заряда в магнитном поле, направленном параллельно плоскости пленки.

Из сказанного ясно, что понятие тонкой пленки строго может быть определено только по отношению к какому-либо свойству: электропроводности, теплопроводности, магнитным свойствам и т.п.

Прохождение электрического тока в тонких пленках может осуществляться за счет различных механизмов переноса носителей заряда: электронов, дырок, ионов.

По принятой классификации существуют следующие механизмы переноса носителей заряда (механизмы токопрохождения) в пленках:

токи в диэлектрических и полупроводниковых пленках за счет надбарьерной (шоттковской) эмиссии ;

токи за счет туннельного прохождения электронов сквозь тонкие диэлектрические и полупроводниковые пленки ;

токи в диэлектрических пленках, обусловленные термоэлектронной эмиссией ;

токи в диэлектрических пленках, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ) ;

токи в диэлектрических пленках с малой подвижностью электронов ;

токи в диэлектрических и полупроводниковых пленках, возникающие за счет проводимости по примесям ("прыжковая" проводимость) ;

токи, вызванные прохождением горячих электронов сквозь тонкие металлические пленки.

Свойства пленочного элемента определяются прежде всего механизмом токопрохождения в нем (туннелирование, ТОПЗ и т.п.). На практике часто реализуются сразу несколько механизмов токопрохождения с преобладанием одного из них. Поэтому важно знать основные свойства механизмов токопрохождения, а также уметь определять эти токи по вольт-амперной характеристике (ВАХ) элемента.

## 2. Токи надбарьерной эмиссии в тонкопленочных элементах

Токи надбарьерной эмиссии возникают при снижении высоты потенциального барьера под действием электрического поля.

С током надбарьерной эмиссии тесно связан ток термоэлектронной эмиссии, который входит в виде постоянной составляющей в надбарьерный ток.

Различие между термоэлектронным и надбарьерным токами иллюстрируется рис. У1.2, на котором:

а) пленочный элемент на подложке, состоящий из двух металлических электродов и диэлектрической пленки между ними ;

б) энергетическая диаграмма металла-диэлектрика-металла, не контактирующих друг с другом ;

в) энергетическая диаграмма системы "металл-диэлектрик-металл" при подаче небольшого смещения  $U$ , не изменяющего высоту потенциального барьера  $e\varphi'$  и  $f(\varepsilon)$  - функция распределения Ферми;

г) энергетическая диаграмма системы "металл-диэлектрик-металл" при подаче большого смещения, изменяющего высоту и форму потенциального барьера;

$\varepsilon_F, \varepsilon_C, \varepsilon_D$  - уровень Ферми, энергия дна зоны проводимости и потолка валентной зоны;

$E$  - напряженность электрического поля;

$U$  - напряжение;

$\rho$  - вероятность заполнения уровня;

$f(\varepsilon)$  - распределение Ферми;

$e\varphi$  - работа выхода в вакуум;

$e\varphi', e\varphi''$  - высота потенциального барьера;

$J_T$  - ток термоэлектронной эмиссии;

$J_H$  - ток надбарьерной эмиссии.

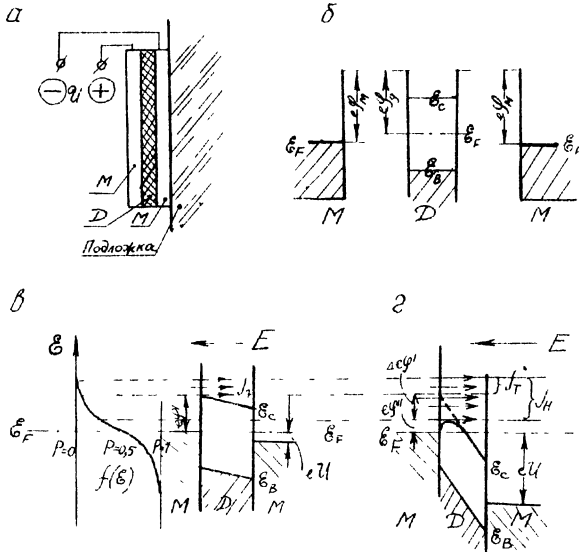


Рис. У1.2. Термоэлектронный  $J_T$  и надбарьерный  $J_H$  токи в пленочной системе металл-диэлектрик-металл (М/Д/М)

Из рисунка видно, что при  $T > 0^{\circ}\text{K}$  ток термоэлектронной эмиссии  $J_T$  образует электроны, энергия которых больше  $e\varphi'$ . При этом поле  $E$  не очень велико и высота потенциального барьера  $e\varphi'$  полем не снижается.

С ростом поля  $E$  высота потенциального барьера снижается на величину  $\Delta e\varphi'$  и количество электронов, могущих преодолеть потенциальный барьер, резко возрастает (рис. VI.2, г). Это возрастание тока, связанное со снижением высоты потенциального барьера, называется эффектом Шоттки, а ток  $J_H$  - надбарьерной или шоттквской эмиссией.

Токи надбарьерной эмиссии в системе металл-диэлектрик-металл

Плотность тока надбарьерной эмиссии для контакта металл-диэлектрик определяется выражением

$$J_H = J_T \exp \left[ \frac{1}{kT} \left( \frac{e^3 E}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (\text{VI.1})$$

где  $e$  - заряд электрона ;  
 $T$  - температура в  $^{\circ}\text{K}$  ;  
 $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость.

Выражение ( VI.1 ) можно преобразовать

$$\ln \frac{J_H}{J_T} = \frac{1}{kT} \left( \frac{e^3 E}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Если обозначить  $E = \alpha \cdot U$  , подставить значения констант и перейти к десятичным логарифмам, то получим

$$\lg \frac{J_H}{J_T} = \frac{1,906}{T} \sqrt{\frac{\alpha}{\epsilon}} \sqrt{U}$$

или, обозначив

$$\frac{1,906}{T} \sqrt{\frac{\alpha}{\epsilon}} = a$$

Уравнение ( VI.2 ) в координатах  $\lg \frac{J_H}{J_T} - \sqrt{U}$  является прямой, проходящей через начало координат при  $T = \text{const}$  и  $\epsilon = \text{const}$  (рис. VI.3).

На практике уравнение ( VI.2 ) удобнее использовать в виде

$$\lg J_H = a\sqrt{U} + \lg J_T, \quad (\text{VI.3})$$

которое является уравнением прямой вида  $y = ax + b$



Из уравнений (VI.2) и (VI.3) видно, что зависимость

$$\lg J_H = f(\sqrt{U}) \quad (\text{VI.4})$$

является линейной. Это обстоятельство позволяет легко определить обусловлен ли ток в тонкопленочном элементе током надбарьерной эмиссии (током Шоттки).

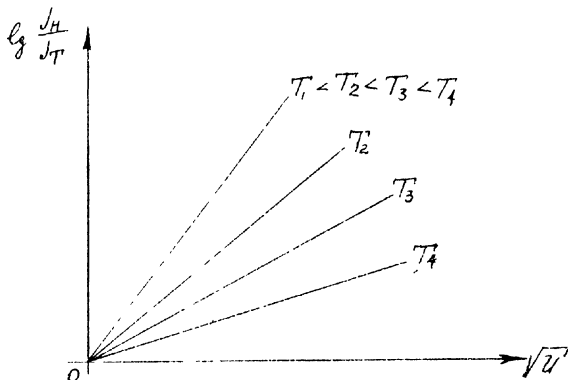


Рис. VI.3. Теоретические прямые Шоттки в координатах  $\lg \frac{J_H}{J_T} - \sqrt{U}$  при различных температурах

Для определения тока Шоттки снимается экспериментальная ВАХ, которая строится в координатах  $\lg J_H - \sqrt{U}$ , и если экспериментальные точки лягут на прямую, то данный ток обусловлен током надбарьерной эмиссии.

Теоретическая ВАХ тока надбарьерной эмиссии (рис. VI.4) отличается от экспериментальной ВАХ (рис. VI.5).

На экспериментальной ВАХ в области I ток надбарьерной эмиссии ограничен полем объемного заряда носителей, инжектированных в диэлектрик.

В области II влияние поля объемного заряда пренебрежимо мало.

Экстраполяция прямого участка экспериментальной ВАХ к нулевому полю определит ток термоэлектронной эмиссии  $J_T$ .

В области III, при значительных электрических полях, однако гораздо меньших, чем  $1 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{В}}{\text{см}} \right]$ , т.е. при полях, когда туннель-

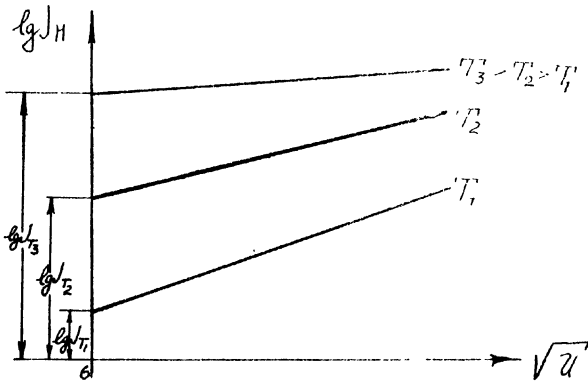


Рис. У1.4. Теоретические прямые Шоттки в координатах  $\lg J_H - \sqrt{U}$  при различных температурах

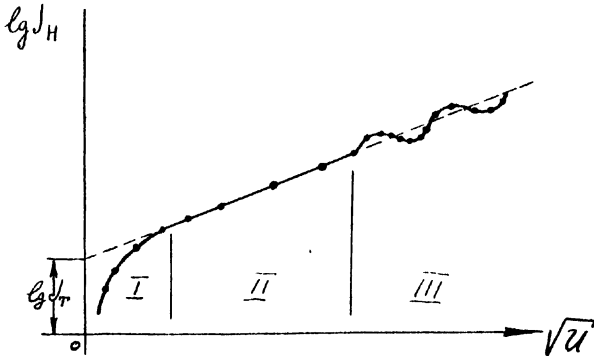


Рис. У1.5. Экспериментальная зависимость тока надбарьерной (шоттковской) эмиссии от напряжения

ные токи еще отсутствуют, наблюдается отклонение от закона (рис. VI.4)

В этом случае наблюдаются волнообразные колебания экспериментальной ВАХ около прямой  $I_g J_H = f(\sqrt{U})$  (рис. VI.5). Амплитуда колебаний фона составляет порядка 1% от общего тока.

Объяснение этих отступлений сводится к следующему.

При наличии внешнего электрического поля  $E$  потенциальный порог на границе металл-диэлектрик превращается в потенциальный барьер, ширина и форма которого меняются с напряженностью электрического поля. Электронные волны, соответствующие электронам, проходящим над барьером, как вытекает из уравнений квантовой механики, должны частично отражаться от такого барьера.

При этом коэффициент отражения подобно коэффициенту отражения света от двух поверхностей, ограничивающих тонкие пленки, будет периодической функцией толщины пленки вследствие интерференции волн. Поэтому средняя прозрачность потенциального барьера  $\bar{D} = \bar{D}(E)$  меняется не монотонно, а волнообразно. Поэтому и электронный ток, протекающий над барьером, будет изменяться с изменением  $E$  не только вследствие монотонного понижения высоты потенциального барьера, но и вследствие волнообразного изменения  $\bar{D}(E)$ .

#### Токи надбарьерной эмиссии в системе металл-полупроводник-металл

Выражение для надбарьерного тока в контакте металл-полупроводник остается прежним (см. рис. VI.1), если толщина полупроводниковой пленки достаточна для формирования области объемного заряда (рис. VI.6).

Однако зависимость электрического поля в области контакта от напряжения будет нелинейной в отличие от системы металл-диэлектрик.

Более сложная зависимость поля от напряжения объясняется тем, что в полупроводниках концентрация свободных носителей заряда значительно выше, чем в диэлектриках. В результате у контактов в полупроводнике образуются слои объемного заряда, экранирующие внутреннюю область полупроводниковой пленки от проникновения поля.

Энергетическая диаграмма системы металл-полупроводник-металл приведена на рис. VI.6, где:

$e\varphi_1$  и  $e\varphi_2$  - работы выхода из металла I и металла II в вакуум;

$e\varphi'_1$  и  $e\varphi'_2$  - работы выхода (высоты потенциальных барьеров) из

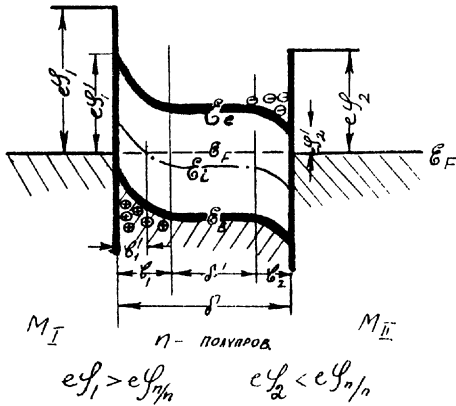


Рис. VI.6. Зонная энергетическая диаграмма системы металл-полупроводник-металл

металла I и металла II в полупроводник ;

$\delta_1$  - область объемного заряда в полупроводнике, обедненная основными носителями зарядов ;

$\delta_1'$  - толщина инверсного слоя (слоя с противоположным типом проводимости) ;

$\delta_2$  - область объемного заряда в полупроводнике, обогащенная основными носителями ;

$\delta'$  - область полупроводника, экранированная объемными зарядами от проникновения электрического поля (в области  $\delta'$  энергетические зоны не искривлены) ;

$\delta$  - толщина полупроводниковой пленки.

В контактирующей системе металл-полупроводник-металл уровень Ферми, как известно, становится общим.

В блокирующем контакте металл I-полупроводник

$$e\varphi > e\varphi_n,$$

поэтому электроны будут преимущественно переходить из полупроводника в металл, а не наоборот.

В результате приконтактная область полупроводника будет обеднена электронами на длине  $\delta_1$ , а в слое толщиной  $\delta_1'$  обеднение будет настолько большим, что концентрация дырок превзойдет концентрацию электронов и на длине  $\delta_1'$  произойдет инверсия проводимости ( $p$ -проводимость, вместо  $n$ -проводимости).

Постепенному понижению концентрации электронов в слое  $\delta_1$  соответствует изгиб зон полупроводника.

Слой  $\delta_1 - \delta_1'$  обеднен основными носителями, уровень  $\mathcal{E}_F$  выше уровня  $\mathcal{E}_i$ , поэтому здесь проводимость  $n$ -типа. В точке пересечения  $\mathcal{E}_F$  и  $\mathcal{E}_i$  имеет место собственная проводимость.

В слое  $\delta_1'$  имеет место проводимость  $p$ -типа, так как здесь уровень  $\mathcal{E}_F$  ниже  $\mathcal{E}_i$ .

Очевидно, что инверсия проводимости будет тем больше, чем больше разность работ выхода и чем ближе проводимость полупроводника к собственной.

В инжектирующем контакте металл II-полупроводник

$$e\varphi_2 < e\varphi_n,$$

поэтому электроны будут преимущественно переходить из металла в полупроводник. В результате приконтактная область полупроводника

будет обогащаться электронами на расстоянии  $\delta_2$ .

Постепенному повышению концентрации электронов в слое  $\delta_2$  соответствует изгиб зон полупроводника, как показано на рис. УІ.6

Толщина области объемного заряда, как известно, определяется выражением

$$\delta \sim (\mathcal{U} + \mathcal{U}_B)^{\frac{1}{2}},$$

где  $\mathcal{U}$  - приложенное смещение ;

$\mathcal{U}_B$  - диффузионный потенциал.

Напряженность поля в слое объемного заряда будет

$$E \sim \frac{\mathcal{U} + \mathcal{U}_B}{\delta} = (\mathcal{U} + \mathcal{U}_B)^{\frac{1}{2}}.$$

Тогда зависимость (УІ.І) для контакта металл-полупроводник может быть представлена линейной в виде

$$\lg J_n = f(\sqrt[4]{\mathcal{U}}). \quad (\text{УІ.5})$$

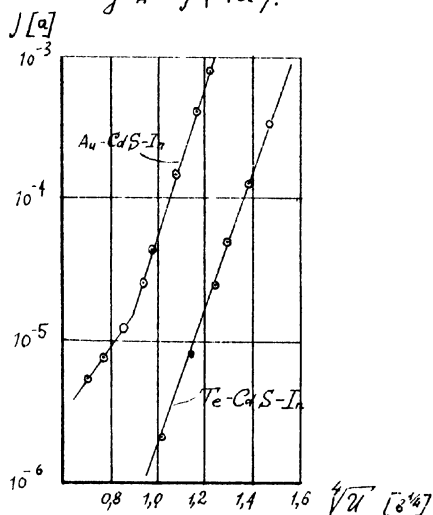


Рис. УІ.7. Токи надбарьерной эмиссии в пленочных элементах металл-полупроводник-металл

Таким образом, если точки экспериментальной ВАХ для контакта металл-полупроводник ложатся на прямую в координатах  $\lg J_{II} - \sqrt{U}$ , то данный ток является током надбарьерной эмиссии (ср. УИ.5 с УИ.4).

Зависимость (УИ.5) подтверждается экспериментом, однако на экспериментальных ВАХ могут наблюдаться изломы (рис. УИ.7), наличие которых свидетельствует о необходимости уточнений теории токов надбарьерной эмиссии в системах металл-полупроводник.

### 3. Токи термоэлектронной эмиссии в тонкопленочных элементах

Как указывалось выше, токи Шоттки и термоэлектронной эмиссии тесно связаны.

Значение тока термоэлектронной эмиссии можно получить экстраполируя экспериментальную прямую Шоттки к нулевому полю (рис. УИ.5).

Ток термоэлектронной эмиссии определяется уравнением Ричардсона-Дешмева

$$J_T = AT^2 \exp - \frac{e\varphi}{kT}, \quad (\text{УИ.6})$$

где  $A = 120 \left[ \frac{\alpha}{\text{см}^2 \text{град}^2} \right]$  - постоянная Ричардсона.

Уравнение (УИ.6), в котором  $J_T$  зависит от температуры, можно привести к виду

$$\ln \frac{J_T}{T^2} = - \frac{e\varphi}{k} \cdot \frac{1}{T} + \ln A$$

или, подставляя значения констант и заменяя натуральные логарифмы десятичными, получим

$$\lg \frac{J_T}{T^2} = - \varphi \frac{5040}{T} + \lg A. \quad (\text{УИ.7})$$

Последняя зависимость (рис. УИ.8) линейна в координатах

$$\lg \frac{J_T}{T^2} - \frac{5040}{T},$$

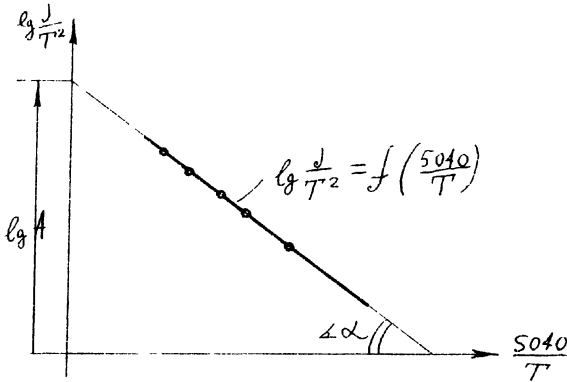


Рис. VI.8. Зависимость тока термоэлектронной эмиссии от обратной температуры. Прямая Ричардсона

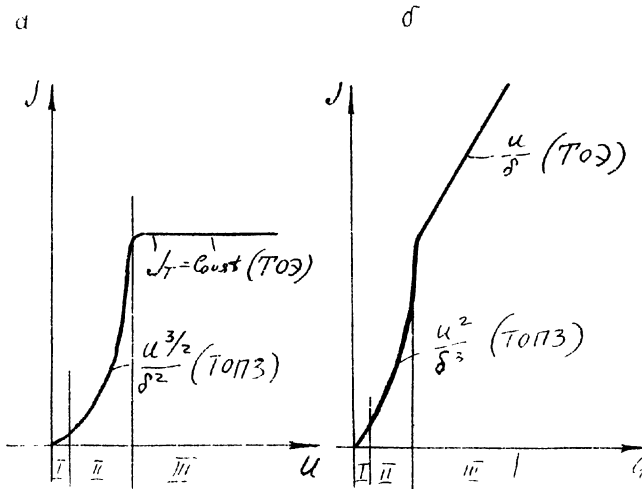


Рис. VI.9. ВАХ тока термоэлектронной эмиссии:  
 а - в вакууме ; б - в диэлектрике



Из уравнения (VI.7) и рис. VI.8 видно, что

$$\varphi = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \left( \ln \frac{1}{T^2} \right)}{\Delta \left( \frac{5049}{T} \right)}$$

Отрезок, отсекаемый прямой Ричардсона на оси ординат, равен  $\ell g A$ .

Итак, для тока термоэлектронной эмиссии температурная зависимость

$$\ell g \left( \frac{1}{T^2} \right) = f \left( \frac{1}{T} \right) \quad (\text{VI.8})$$

является линейной. Это обстоятельство дает возможность установить обусловлен ли исследуемый ток током термоэлектронной эмиссии.

ВАХ, определяемые током термоэлектронной эмиссии в вакууме и диэлектрике, существенно различны (рис. VI.9).

Каждая ВАХ состоит из трех областей:

I - области малых напряжений ;

II - области токов, ограниченных объемным зарядом (ТОПЗ) носителей, эмиттированных в межэлектродный промежуток (в вакуум или диэлектрик) ;

III - области токов, ограниченных эмиссией (ТОЭ).

Различие отношений  $\frac{\ell}{\delta}$  в вакууме и диэлектрике определяет различие ВАХ ( $\ell$  - длина свободного пробега ;  $\delta$  - межэлектродное расстояние).

В вакууме  $\frac{\ell}{\delta} \gg 1$ .

В диэлектрике  $\frac{\ell}{\delta} \ll 1$ .

В результате в диэлектрике, в отличие от вакуума, дрейфовая скорость электрона мала по сравнению с тепловой скоростью.

Сравним средние дрейфовые скорости и длины свободного пробега в вакууме и диэлектрике для областей, соответствующих ТОПЗ (рис. VI.9).

Средняя скорость носителей, перемещающихся в вакууме, определяется из соотношения

$$\frac{m v_{cp}^2}{2} = e U, \quad \text{откуда} \quad v_{cp} = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot U} \sim \sqrt{U}.$$

Средняя скорость носителей в диэлектрике, как известно, определяется выражением  $v_{cp} \sim \frac{U}{\delta}$ .

Если  $t_{cp}$  - среднее время переноса,  $Q$  - объемный заряд подвижных носителей в межэлектродном пространстве, то плотность тока

$$J = \frac{Q}{t_{cp}}.$$

Учитывая, что  $t_{cp} = \frac{\delta}{v_{cp}}$ ;  $Q = C U$ ,

где емкость  $C \sim \frac{1}{\delta}$ , получим

$$J = \frac{C U v_{cp}}{\delta} \sim \frac{U v_{cp}}{\delta^2} \sim \begin{cases} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{\delta^2} & \text{при } v_{cp} \sim \sqrt{U} \text{ для вакуума (VI.9)} \\ \frac{U^2}{\delta^3} & \text{при } v_{cp} \sim \frac{U}{\delta} \text{ для диэлектрика (VI.10)} \end{cases}$$

так как  $v_{cp \text{ вак}} = \frac{\delta}{t_{cp \text{ вак}}} \sim \sqrt{U}$ ;  $\delta = \sqrt{U} \cdot t_{cp \text{ вак}}$ ;

$$v_{cp \text{ диэл}} = \frac{\delta}{t_{cp \text{ диэл}}} \sim \frac{U}{\delta}; \quad \delta = \sqrt{U} \cdot \sqrt{t_{cp \text{ диэл}}}.$$

Приравнивая, получим

$$t_{cp \text{ вак}} = \sqrt{t_{cp \text{ диэл}}},$$

то есть

$$t_{cp \text{ вак}} \ll t_{cp \text{ диэл}};$$

$$v_{cp \text{ вак}} \gg v_{cp \text{ диэл}};$$

$$l_{cp \text{ вак}} \gg l_{cp \text{ диэл}}.$$

Итак, выражение (VI.9) описывает ВАХ в вакууме в режиме ТОПЗ (известный закон "степени 3/2"), выражение (VI.10) описывает ВАХ в диэлектрике в режиме ТОПЗ.

В вакууме ТОПЗ проявляется в возвращении полем объемного заряда части эмиттированных электронов обратно на катод.

В диэлектрике поле объемного заряда проявляется по-иному.

Если поле объемного заряда меньше внешнего поля, последнее не может растянуть электронное облако на весь объем диэлектрика. При этом

изменение внешнего напряжения приводит к перераспределению концентрации носителей в межэлектродном пространстве

$$n = f(u, x).$$

Поэтому при термоэлектронной эмиссии в диэлектрик ВАХ в области ТОПЗ нелинейна.

Режим насыщения (режим тока, ограниченного эмиссией) наступает в вакууме, когда тормозящее поле у катода сменяется тянущим полем (исчезает виртуальный катод, ток приходит к насыщению и определяется по уравнению (VI.6) Ричардсона-Дешмена).

В диэлектрике ток термоэлектронной эмиссии ограничен не только полем объемного заряда, но и рассеянием электронов.

При этом рассеяние играет доминирующую роль и продолжает действовать практически при всех реальных напряжениях. Поэтому область ТОЗ в диэлектрике соответствует омическому режиму тока с проводимостью, определяемой равномерным распределением эмиттированных электронов по всей толще диэлектрика (рис.VI.9,б).

#### 4. Токи в тонкопленочных элементах, обусловленные туннельной эмиссией

Как известно, с ростом поля потенциальный порог на границе металл-диэлектрик превращается в остроугольный потенциальный барьер. Толщина потенциального барьера уменьшается с ростом поля, и при толщине потенциального барьера одного порядка с длиной волны электрона появляется конечная вероятность прохождения электрона сквозь потенциальный барьер.

Прохождение электронов сквозь потенциальный барьер, как известно, называется туннельным эффектом.

Электроны могут туннелировать не только сквозь остроугольный потенциальный барьер на границе металл-диэлектрик (рис.VI.10,а), но и сквозь тонкий диэлектрик - сквозь запрещенную зону тонкого диэлектрика (рис.VI.10,б).

Впервые теория туннелирования была развита для остроугольного потенциального барьера при следующих упрощающих допущениях:

состояние системы электронов в металлических электродах описывается теорией свободных электронов ;

температура предполагается равной  $0^{\circ}\text{K}$  ;  
 весь скачок потенциала сосредоточен на границе металл-диэлектрик.

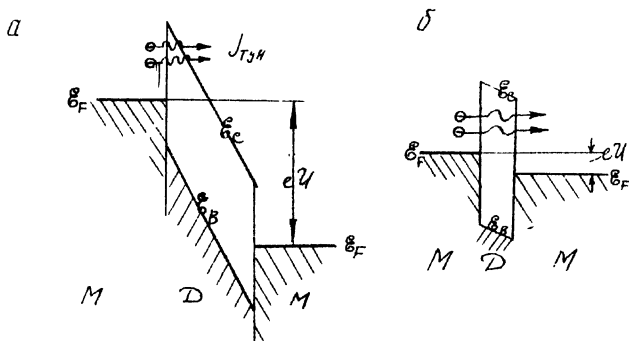


Рис. VI.10. Туннелирование:

а - сквозь остроугольный потенциальный барьер ;  
 б - сквозь запрещенную зону диэлектрической пленки

При этих допущениях ток туннелирования определяется выражением

$$J = \frac{e^2}{2\pi h} \cdot \frac{W_F^{\frac{1}{2}}}{W_a \cdot \varphi^{\frac{1}{2}}} E^2 \cdot \exp - \left[ \frac{8\pi(2m)^{\frac{1}{2}} \cdot \varphi^{\frac{3}{2}}}{3h} \cdot \frac{1}{E} \right] . \quad (\text{VI.11})$$

Здесь значения  $W_a$  ,  $W_F$  ясны из рис. VI.11, на котором приведены энергии по шкале  $W$  и по шкале  $\mathcal{E}$ .

Нетрудно видеть, что уравнение (VI.11) представляет собой зависимость вида

$$\lg \frac{J}{E^2} = f\left(\frac{1}{E}\right). \quad (\text{VI.12})$$

Из сравнения (VI.11) и (VI.8) видно, что ток туннелирования зависит от напряженности поля  $E$  так же, как ток термоэлектронной эмиссии зависит от температуры, т.е. туннельный ток так же очень чувствителен к изменению поля, как ток термоэлектронной эмиссии к изменению температуры.

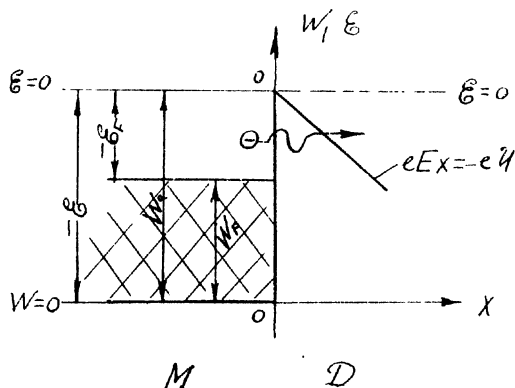


Рис. VI. II. Шкала энергий  $\epsilon$  и  $W$

Если ток в пленочной структуре металл-диэлектрик-металл (МДМ) обусловлен током туннелирования, то точки экспериментальной ВАХ в координатах

$$\lg \frac{J}{E^2} - \frac{1}{E}$$

должны ложиться на прямую (рис. VI. 12).

Из уравнения (VI. II) следует, что высота потенциального барьера  $\varphi$  определяется выражением

$$\varphi \sim \operatorname{tg} \alpha \cong \frac{\Delta (\lg \frac{J}{E^2})}{\Delta (\lg \frac{1}{E})} . \quad (\text{VI. 13})$$

В дальнейшем в теории туннелирования учитывались следующие явления: силы зеркального отражения; влияние объемного заряда в межэлектродном пространстве; диффузное рассеяние электронов на потенциальном барьере; туннелирование сквозь потенциальный барьер любой формы и т.д.

Представляют интерес резонансные явления при туннелировании.

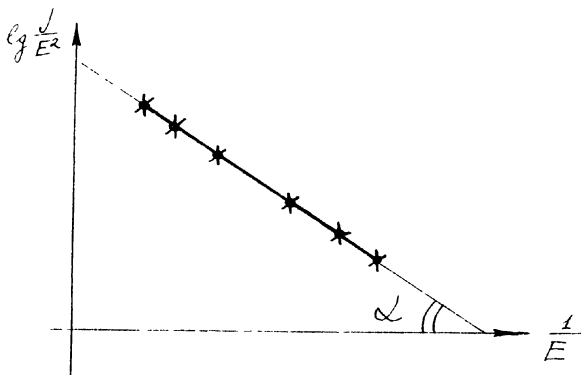


Рис.УІ.І2. Зависимость туннельного тока от обратной напряженности поля

### 5. Токи в тонкопленочных элементах, ограниченные пространственным зарядом

Обычно в пленочных диэлектриках имеется высокая плотность структурных дефектов (дислокаций, вакансий, дислоцированных атомов, дефектов упаковки и т.п.). Подвижные носители заряда могут захватываться этими дефектами (ловушками). Каждому типу ловушек соответствуют определенные энергетические уровни, лежащие на различной глубине в запрещенной зоне (рис.УІ.І3).

Свободные носители заряда, захваченные глубокими ловушками, могут оставаться там длительное время, минут и даже часы. Носители, захваченные мелкими ловушками, задерживаются там значительно меньше, порядка  $10^{-8}$ сек.

Концентрация ловушек колеблется в пределах  $10^{13}$ – $10^{20}$ см<sup>-3</sup> и зависит от способа изготовления пленочного диэлектрика.

Носители, захваченные ловушками, не переносят тока, а создают неподвижный пространственный заряд, ограничивающий величину тока через диэлектрик.

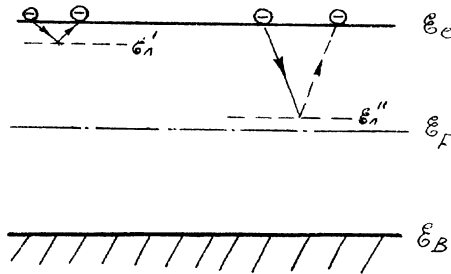


Рис. VI.13. Мелкие ловушки  $\epsilon_n'$  и глубокие ловушки  $\epsilon_n''$

Концентрация заполненных ловушек, незаполненных ловушек и свободных электронов находится в динамическом равновесии.

Очевидно, при инжекции свободных носителей в диэлектрике равновесие будет сдвигаться в сторону повышенной концентрации заполненных ловушек и при подъеме квазиуровня Ферми выше уровня ловушек все ловушки окажутся заполненными.

Нормальная ВАХ в диэлектрической пленке с током, ограниченным пространственным зарядом, имеет квадратичный характер (рис. VI.9, б). Однако форма ВАХ существенно зависит от концентрации ловушек и их природы.

На ВАХ в диэлектрике с ТОПЗ может наблюдаться несколько участков (рис. VI.14).

На первом участке наблюдается омическая проводимость

$$J = en\mu E = G_1 U.$$

Закон Ома выполняется до тех пор, пока концентрация инжектированных носителей не превысит концентрацию равновесных.

На втором участке токопрохождение обусловлено заполнением глубоких ловушек

$$J = G_2 \cdot U^2.$$

На третьем участке ток резко возрастает по закону

$$J = G_3 \cdot U^n,$$

где показатель степени  $n = 3-8$  и зависит от природы диэлек-

трика, технологии изготовления и т.п.

На четвертом участке заполняются мелкие ловушки.

$$J = G_4 U^2.$$

На пятом участке начинаются пробойные явления в диэлектрике. В приведенных формулах  $G_1, G_2, G_3$  и  $G_4$  - константы.

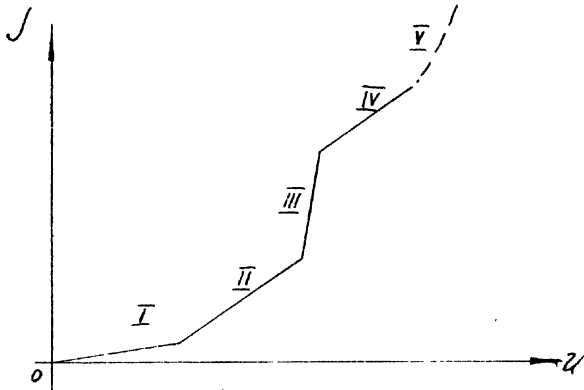


Рис. VI.14. ВАХ тока в диэлектрике, ограниченного пространственным зарядом

Наиболее типичными для диэлектрика с ТОПЗ являются области 2, 4 и переходная область 3 между ними.

Представляет интерес двойная инжекция в пленочных элементах с ТОПЗ и появление участка с отрицательным сопротивлением (ОС) в результате двойной инжекции.

Можно подобрать металлические электроды в пленочном элементе так, что вблизи одного контакта образуется инверсный слой с проводимостью  $n$ -типа, а вблизи другого - с проводимостью  $p$ -типа. В результате при приложении прямого смещения один контакт будет инжектировать в диэлектрическую пленку электроны, другой дырки - двойная инжекция.

ВАХ, у которых напряжение является однозначной функцией тока (прибор, управляемый током - ПУТ), называется ВАХ  $S$ -типа (рис. VI.15, а).



ВАХ, у которых ток является однозначной функцией напряжения (прибор, управляемый напряжением - ПУН), называется ВАХ  $N$ -типа (рис.УІ.15,б)

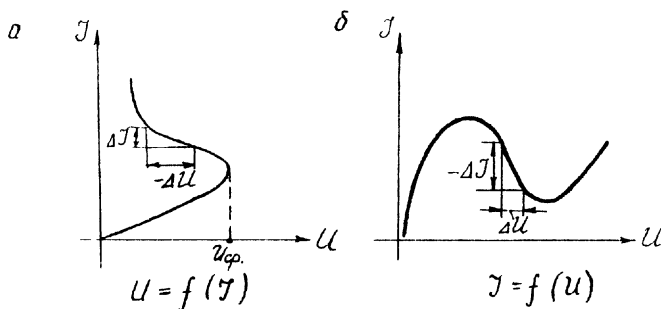


Рис.УІ.15. ВАХ:

- а - -типа с отрицательным сопротивлением;
- б - -типа с отрицательной проводимостью

На ВАХ  $S$ -типа имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОС)

$$R_{\theta} = \frac{-dU}{dJ} \approx \frac{-\Delta U}{\Delta J}.$$

На ВАХ  $N$ -типа имеется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОП)

$$\sigma_{\theta} = \frac{-dJ}{dU} \approx \frac{-\Delta J}{\Delta U}.$$

Применение приборов с ОС или ОП, в том числе и пленочных элементов, значительно упрощает схемные решения.

Элементы с ОС и ОП могут выполнять функции автогенераторов без внешней обратной связи, усилителей, переключателей и т.п.

К появлению ОС на ВАХ может привести любой механизм, обуславливающий резкий рост электропроводности, например, возрастание времени жизни носителей с ростом уровня инжекции.

Один из таких механизмов рассматривается для случая двойной инжекции в диэлектрике, у которого много рекомбинационных центров, расположенных ниже уровня ферми и полностью занятых электронами в отсутствие инжекции.

Рекомбинация идет только через эти центры.

Наличие отрицательно заряженных рекомбинационных центров ограничивает ток дырок, т.е. для дырок существует рекомбинационный барьер. Очевидно, при низком уровне инжекции время жизни дырок будет мало.

Если  $\sigma_p$  - сечение захвата дырки на рекомбинационный центр, занятый электроном (отрицательно заряжен), и  $\sigma_n$  - сечение захвата электрона на такой же рекомбинационный центр, занятый дыркой (не заряжен), то нетрудно видеть, что

$$\sigma_p \gg \sigma_n,$$

т.е. дырки захватываются рекомбинационными центрами намного активнее, так как рекомбинационные центры для дырок отрицательно заряжены.

Тогда при возрастании уровня инжекции время жизни дырок будет возрастать, так как уменьшается число центров, захватывающих дырки, и при уровне инжекции, соответствующем  $U_{cr}$ , все рекомбинационные центры окажутся заполненными дырками. Это приведет к резкому возрастанию времени жизни дырок и появлению участка ОС на ВАХ.

## 6. Токи в диэлектрических пленках с малой подвижностью электронов

Эти токи имеют большое внешнее сходство с токами надбарьерной эмиссии.

Токи в диэлектриках с малой подвижностью электронов имеют ряд особенностей.

### 1. Линейная зависимость

$$U = f(\delta) \quad \text{при } J = \text{const},$$

где  $\delta$  - толщина пленки диэлектрика.

2. Весьма малая инерционность тока при импульсных измерениях (малая величина переднего фронта импульса) и незначительные изменения при длительной эксплуатации пленочных элементов свидетельствует об отсутствии ионной составляющей тока в таких диэлектриках.

3. Симметрия ВАХ при изменении полярности внешнего напряжения для элементов с различными металлическими электродами свидетельствует о том, что токи в таких элементах определяются объемными процессами, а не процессами на контактах, как в токах надбарьерной эмиссии.

4. Температурная зависимость

$$\lg J = f\left(\frac{1}{T}\right) \quad \text{для диэлектриков с малой подвижностью электронов обычно линейная.}$$

5. Отсутствие люминесценции или эмиссии в вакууме для диэлектриков с токами, обусловленными малой подвижностью, свидетельствует об отсутствии разогрева электронного газа и о малой длине свободного пробега.

6. Для диэлектриков с малой подвижностью носителей экспериментально наблюдается зависимость  $\lg J \sim \beta \sqrt{U}$ .

Такая же зависимость может быть обусловлена токами надбарьерной эмиссии.

Однако для токов надбарьерной эмиссии наклон прямой в координатах

$$\lg J - \sqrt{U}$$

должен быть вдвое большим.

Перечисленные выше особенности дают возможность определять токи в диэлектриках, обусловленные малой подвижностью электронов.

#### 7. Проводимость по примесям (прыжковая проводимость)

Этот вид проводимости реализуется за счет туннельных переходов электронов между локальными уровнями, расположенными в запрещенной зоне.

Такой "прыжковый" переход возможен, например, в полупроводниках  $n$ -типа при переходе с занятого донорного уровня на свободный (рис. У1.16).

По мере повышения концентрации донорной примеси расстояние между донорными центрами уменьшается и в результате даже незначительного перекрытия волновых функций появляется конечная вероят-

ность туннельного перехода электрона с занятого уровня на свободный.

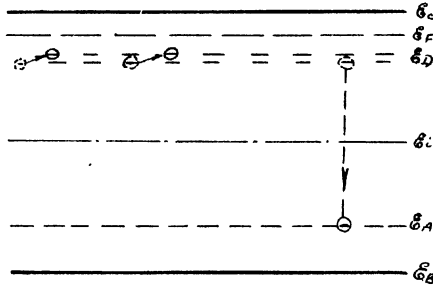


Рис.УІ.І6. Схема механизма проводимости по примесям

Для реализации процесса прыжковой проводимости необходимо соблюдение ряда условий:

1. Достаточно низкая температура, для того чтобы проводимость зонными носителями была пренебрежительно малой. Под зонными носителями понимаются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне.

2. Донорные уровни должны быть расположены достаточно глубоко в запрещенной зоне для того, чтобы исключить переходы с донорных уровней в зону проводимости.

3. Часть локальных донорных уровней для реализации прыжковой проводимости должна быть свободной. Свободные донорные уровни могут быть получены за счет переходов электронов с донорных уровней на акцепторные (рис.УІ.І6). Следовательно, для реализации прыжковой проводимости полупроводник должен быть частично компенсирован.

При достаточно большой концентрации примесей волновые функции соседних центров перекрываются настолько сильно, что может наступить металлическая (не "прыжковая") проводимость по примесям. Очевидно, что при столь значительных концентрациях примеси компенсации, как необходимое условие проводимости, становится ненужной.

4. Степень легирования для реализации прыжковой проводимости

должна быть в относительно узких пределах, чтобы волновые функции локальных центров перекрывались и появился туннельный эффект.

Но, с другой стороны, легирование не должно быть настолько большим, чтобы наступила металлическая проводимость, по примесям.

5. Температура должна быть достаточно низкой ( $2 \div 10^0\text{K}$ ) для предотвращения тепловой генерации носителей.

### 8. Прохождение горячих электронов сквозь тонкие металлические пленки

Горячие электроны образуются при импульсном приложении к диэлектрикам или полупроводникам больших полей. В этом случае обладающие малой массой электроны по существу мгновенно возбуждаются до значительных энергий, т.е. электронный газ разогревается (горячие электроны). Температура кристаллической решетки ввиду значительной инерционности ионов остается при этом практически неизменной.

Это явление используется в пленочных триодах с металлической базой.

Основным параметром горячих электронов является длина поглощения  $L$ , т.е. то расстояние, на котором горячий электрон теряет свою избыточную энергию в результате рассеяния и передает ее кристаллической решетке. От длины поглощения зависят также важные параметры, как коэффициент усиления пленочного триода с металлической базой и эффективность эмиттера (см. ниже).

Длина поглощения определяется рядом механизмов рассеяния: электрон-электронным, электрон-фононным, рассеянием на примесях и т.п.

Типичная зависимость длины поглощения горячих электронов от их энергии приведена на рис. У1.17.

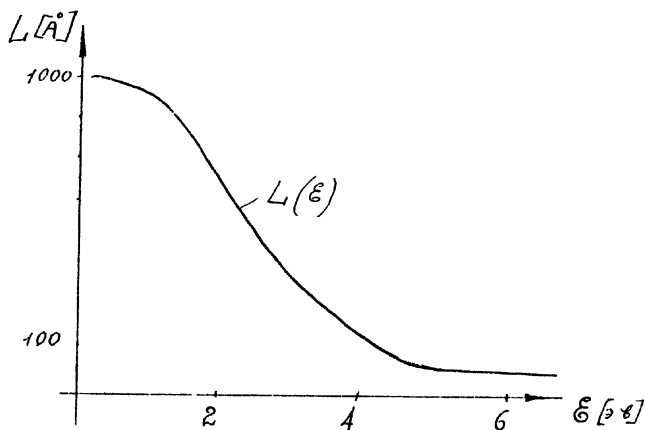


Рис. VI.17. Зависимость длины поглощения  $L$ , горячих электронов от их энергии

### 9. Пленочные активные элементы (ПАЭ)

Активным называется пленочный элемент, который может выпрямлять, усиливать или генерировать электрический сигнал.

К настоящему времени, несмотря на большие усилия исследователей многих стран мира, не разработана технология, позволяющая получать пленочные активные элементы с удовлетворительными характеристиками и параметрами.

В этом отношении пленочные элементы уступают бескорпусным навесным полупроводниковым приборам и активным элементам полупроводниковых микросхем.

#### Пленочные диоды

Если в пленочном элементе МДМ или МПМ один контакт сделать флюирующим, а другой инжектирующим, то в таком диоде будет наблюд-

даться выпрямление.

Зонная диаграмма для такого пленочного диода приведена на рис. VI.6.

В результате исследования пленочных диодов с ТОПЗ были установлены следующие характерные особенности.

1. Диоды при работе на низких частотах имеют высокие коэффициенты выпрямления ( $10^6$  и выше). Высокие коэффициенты выпрямления наблюдаются и при небольших смещениях в прямом направлении (рис. VI.18).

2. Диэлектрические пленочные диоды имеют широкую запрещенную зону и вследствие этого пригодны для работы при высоких температурах. Так диод  $Ga - CdS - C$  хорошо работает при  $300^\circ C$ . Эта особенность пленочных диэлектрических диодов выгодно отличает их от кристаллических диодов на  $p-n$ -переходах.

3. В диэлектрических и полупроводниковых пленках обычно имеется высокая плотность глубоких ловушек, концентрация которых велика. Эти ловушки образуют объемный заряд у запирающего контакта. Так как концентрация ловушек высокая, то область объемного заряда оказывается очень узкой, а барьерная емкость у запирающего контакта весьма высокой. Это в свою очередь приводит к резкому снижению коэффициента выпрямления диода с повышением частоты (снижается предельная частота диода). Для снижения емкости запирающего контакта между полупроводником и металлом вводится слой диэлектрика подобно тому, как это сделано в  $p-n-i-p$  транзисторах. Зависимость емкости запирающего контакта от напряжения для диода со слоем диэлектрика в запирающем контакте приведена на рис. VI.19.

Зонная энергетическая диаграмма диода со слоем диэлектрика приведена на рис. VI.20.

В прямом направлении ток определяется надбарьерной эмиссией через низкий потенциальный барьер из М1 в полупроводник и диэлектрик.

В запирающем направлении ток определяется надбарьерной эмиссией через высокий потенциальный барьер контакта МП - диэлектрик.

4. В пленочных диодах падение напряжения в прямом направлении относительно велико

$U_{np} \approx 2 \div 3 \text{ в}$ , что является их недостатком по сравнению с диодами на  $p-n$ -переходах, у которых

$$U_{np} \approx 0,5 \div 1,0 \text{ в.}$$

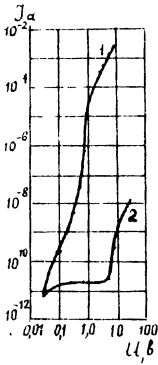


Рис.УІ.18. ВАХ пленочного диода ( $Jn - CdS - Te$ ):

1 - прямая ветвь ;  
2 - обратная ветвь

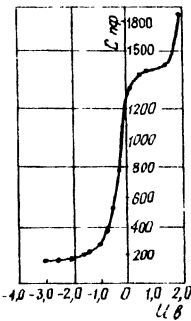


Рис.УІ.19. Зависимость емкости пленочного диода со структурой металл-полупроводник-диэлектрик-металл от напряжения смещения

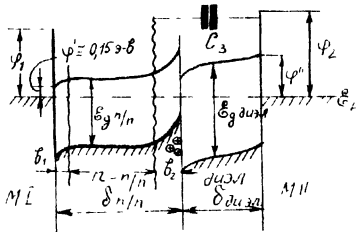


Рис.УІ.20. Зонная энергетическая диаграмма пленочного диода со структурой металл-полупроводник-диэлектрик-металл



5. Плотность токов в прямом направлении у пленочных диодов ниже, чем у диодов на р-п-переходах.

6. У пленочных диодов относительно низкая воспроизводимость параметров и стабильность в работе.

### Пленочные полевые триоды (ППТ)

Принцип действия ППТ основан на эффекте поля, т.е. изменении продольной проводимости полупроводниковой пленки под действием внешнего поперечного электрического поля.

В последние годы были созданы ППТ, приближающиеся по своим параметрам к транзисторам. ППТ являются единственным типом пленочных активных элементов, нашедших практическое применение. Различные модификации принципиальных конструкций ППТ приведены на рис.У1.21.

Конструкция (рис.У1.21, г и д) выполнена с несколькими затворами, что позволяет в принципе осуществить более глубокую модуляцию проводимости канала исток-сток.

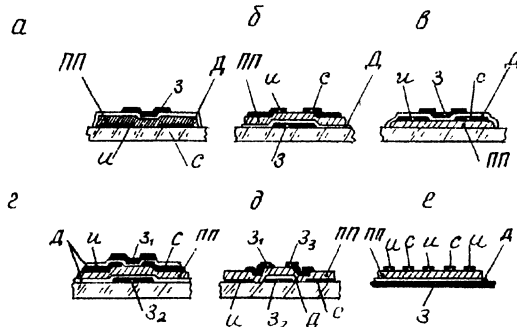


Рис.У1.21. Различные модификации принципиальных конструкций пленочных полевых триодов:

и - исток; з - затвор, с - сток,  
д - диэлектрик, пп - полупроводник

ППТ имеют весьма высокое входное сопротивление порядка 1 Мом, что значительно выше, чем у биполярных транзисторов.

ППТ являются униполярными приборами, т.е. исток и сток можно менять местами без изменения параметров и характеристик прибора.

Эта особенность в ряде случаев позволяет получать более простые схемные решения по сравнению с биполярными транзисторами.

ППТ могут работать в режиме обогащения или обеднения.

В режиме обогащения используется высокоомная полупроводниковая пленка и для появления тока в цепи исток-сток на затвор необходимо подать потенциал больше нуля (для  $p$ -полупроводника). При  $U_3 \leq 0$  ток в цепи исток-сток отсутствует.

В режиме обеднения используется низкоомная полупроводниковая пленка и для прекращения (отсечки) тока в цепи исток-сток на затвор необходимо подавать напряжение  $U_3 < 0$  для полупроводниковой пленки  $p$ -типа.

Статическая выходная ВАХ ППТ. Параметры ППТ. Теоретическая модель ППТ приведена на рис. У1.22, где  $U_n$  - потенциал истока,  $U_c$  - потенциал стока,  $U_3$  - потенциал затвора,  $C_3$  - емкость затвора,  $\mu$  - подвижность носителей заряда,  $\sigma_n$  - удельная проводимость,  $n$  - концентрация носителей.

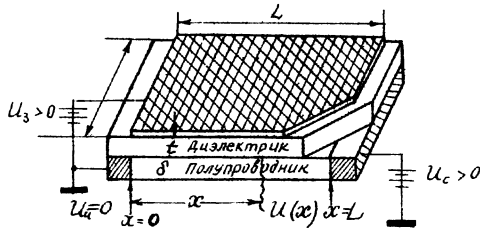


Рис.У1.22. Модель к выводу уравнения ВАХ пленочного полевого триода

ВАХ выводится при следующих упрощениях:

подвижность носителей в проводящем канале везде одинакова и не зависит от напряжения на затворе во всем интервале используемых напряжений ;

емкость затвора  $C_3$  постоянна и не зависит от потенциала затвора  $U_3$  .

Несмотря на эти допущения, между теоретической и экспериментальной ВАХ наблюдается хорошее совпадение.

Для определенности примем в пленочном полупроводнике проводимость  $p$ -типа.

Ёмкость системы затвор-диэлектрик-полупроводник определяется выражением

$$C_3 = \frac{dQ}{dU} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{e \Delta n(x) WL}{[U_3 - U(x)]},$$

$$\Delta U = U_3 - U(x),$$

$$\Delta Q = e \Delta n(x) WL,$$

где  $\Delta n(x)$  - поверхностная концентрация электронов, индуцированных полем затвора на поверхности полупроводника, см<sup>-2</sup>.

Заряд, индуцированный на единице площади потенциала затвора  $U_3$ , равен

$$e \cdot \Delta n(x) = \frac{C_3}{WL} [U_3 - U(x)]. \quad (\text{VI.14})$$

Полный ток в цепи исток-сток

$$J = \mathcal{C}_n \cdot E = e \mu \cdot n E.$$

Концентрация носителей в полупроводнике между истоком и стоком

$$n = \frac{n_0}{L \cdot W d} + \frac{\Delta n(x)}{\delta} \quad [\text{см}^{-3}],$$

где  $n_0$  - полное количество электронов, первоначально присутствующих в полупроводнике.

Тогда полный ток в цепи исток-сток определяется выражением

$$J_0 = e \mu \delta W \left[ \frac{n_0}{L W \delta} + \frac{\Delta n(x)}{\delta} \right] E, \quad (\text{VI.15})$$

откуда

$$\Delta n(x) = \left( \frac{J_0}{e \mu \delta W E} - \frac{n_0}{L W \delta} \right) \delta.$$

Подставляя выражение (VI.15) в (VI.14), получим

$$\mathcal{J}_c = \frac{\mu C_3}{L} \left[ \frac{e n_0}{C_3} + U_3 - U(x) \right] \frac{dU(x)}{dx}.$$

Здесь

$$\frac{dU(x)}{dx} = E.$$

Далее разделим переменные и проинтегрируем

$$\mathcal{J}_c \int_0^l dx = \frac{\mu C_3}{L} \int_0^{U_c} \left[ \frac{e n_0}{C_3} + U_3 - U(x) \right] dU(x);$$

$$\mathcal{J}_c = \frac{\mu C_3}{L^2} \left[ \left( \frac{e n_0}{C_3} + U_3 \right) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right].$$

(VI.16)

В полученном уравнении  $\frac{e n_0}{C_3}$  можно заменить напряжением  $U_0$ , которое необходимо приложить к затвору, чтобы появился ток в цепи исток-сток.

Для полупроводников  $n$ -типа  $U_0 > 0$ , если ППТ работает в режиме обогащения, и  $U_0 < 0$  для ППТ, работающих в режиме обеднения.

Тогда выражение для  $\mathcal{J}_c$  примет вид

$$\mathcal{J}_c = \frac{\mu C_3}{L^2} \left[ (U_3 + U_0) U_c - \frac{U_c^2}{2} \right].$$

(VI.17)

В этом уравнении толщина полупроводника обозначена через  $l_0$ , толщина диэлектрика - через емкость  $C_3$ . Семейство выходных характеристик  $\mathcal{J}_c = f(U_c) | U_3$ , рассчитанное по формуле (VI.17), приведено на рис. VI.23.

Уравнение (VI.17) справедливо только до области насыщения ВАХ.

Из уравнения (VI.17) легко определить основные параметры ППТ: дифференциальное сопротивление  $R_i$ , крутизну управления  $S$  и коэффициент усиления  $K$ .

Входное сопротивление до области насыщения

$$R_i = \left. \frac{\partial U_c}{\partial \mathcal{I}_c} \right|_{U_3} = \frac{L^2}{\mu C_3 [(U_3 + U_0) - U_c]} \text{ [ом]}.$$

Крутизна управления до области насыщения

$$S = \left. \frac{\partial \mathcal{I}_c}{\partial U_3} \right|_{U_c} = \frac{\mu C_3 U_c}{L^2} \left[ \frac{\alpha}{\beta} \right],$$

откуда

$$\frac{S}{C_3} = \frac{\mu U_c}{L^2}.$$

Здесь левая часть пропорциональна произведению крутизны  $S$  на ширину полосы пропускания  $1/C_3$ .

Правая часть равна обратному времени пролета  $\frac{1}{\tau}$  носителей между истоком и стоком

$$\frac{\mu U_c}{L^2} = \frac{\mu}{L} \cdot \frac{U_c}{L} = \frac{\mu E}{L} = \frac{v_{др}}{L} = \frac{1}{\tau} \left[ \frac{1}{\text{сек}} \right].$$

Коэффициент усиления до области насыщения

$$\kappa = \left. \frac{\partial U_c}{\partial U_3} \right|_{\mathcal{I}_c} = S R_i.$$

Основными факторами, ограничивающими возможность получения высоких параметров ППТ, являются подвижность  $\mu$  и расстояние исток-сток  $L$ .

Значения этих факторов определяются существующим уровнем технологии.

Как указывалось выше, уравнение (VI.17) справедливо только до области насыщения ВАХ, т.е. для области

$$0 \leq U_3 + U_0 \leq U_c.$$

Насыщение наступает при

$$U_3 + U_0 \cong U_{c \text{ пер}}.$$

$U_{c \text{ пер}}$  - напряжение, соответствующее перегибу (точки, соответствующие  $U_{c \text{ пер}}$  перегиба, соединены пунктирной кривой на рис. VI.23).

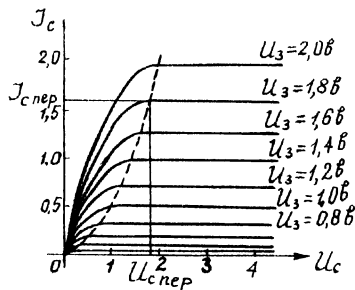


Рис.У1.23. Семейство ВАХ ППТ

Действительно,

$$(U_3 + U_0)(U_3 + U_0) - \frac{(U_3 + U_0)^2}{2} = \frac{U_3 + U_0}{2} = const.$$

Тогда

$$J_{c пер} = \frac{\mu U_3}{L^2} \frac{(U_3 + U_0)^2}{2} = const.$$

Эффект насыщения зависит от геометрии ППТ и является результатом отсечки проводящего канала при

$$U_c \geq U_3 + U_0.$$

Таким образом, развитая теория применима только до области насыщения ВАХ, за которой ток считается постоянным.

Однако на экспериментальных ВАХ насыщения не наблюдается и ток медленно растет с напряжением, и дифференциальное сопротивление в области квазинасыщения в лучших образцах ППТ доходит до  $8 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$  [ом].

Для построения семейства выходных ВАХ ППТ их можно рассчитывать по уравнению (У1.17) до точек перегиба, а после перегиба можно считать, что в основном наклон прямых определяется их дифференциальным сопротивлением  $R_i$ , которым задаются.

Основные причины отсутствия насыщения на выходных характеристиках следующие:

1. Присутствие в цепи исток-сток параллельного канала с немодулируемой проводимостью. Такой канал должен возникать в сравнительно низкоомных полупроводниках, если толщина полупроводниковой пластинки превышает максимально допустимую ширину слоя пространственного заряда.

2. Недостаточное электростатическое экранирование полем затвора области зазора исток-сток от проникновения электрического поля со стороны стока может проявляться в высокоомных полупроводниках, когда расстояние исток-сток слишком мало, толщина диэлектрика слишком велика.

3. Внутренний пробой полупроводникового канала.

4. Пробой диэлектрика между затвором и стоком или истоком.

5. Поверхностные состояния.

Более подробно остановимся на влиянии поверхностных состояний. Поверхность реального кристаллического полупроводника или пленки всегда покрыта слоем окислов.

Толщина слоя окисла на *Ge*, *Si* составляет около 30 Å и более.

Слой окислов имеет аморфную или мелкокристаллическую структуру с отступлением от стехиометрического состава, на поверхности окисла и на поверхности раздела окисел - полупроводник.

Очевидно, что такая сложная структура поверхности вызывает появление дополнительных энергетических уровней: донорных, акцепторных и типа ловушек.

На этих дополнительных уровнях могут находиться заряды, для компенсации которых в соответствии с условиями электрической нейтральности должен появиться заряд в объеме полупроводника, что приведет к появлению электрического поля и изгибу энергетических зон с образованием в объеме полупроводника обогащенных, обедненных и инверсных слоев.

Толщина области пространственного заряда, где энергетические зоны существенно искривлены, составляет обычно  $10^{-4} \div 10^{-6}$  [см].

На поверхности полупроводника могут быть два вида дополнительных энергетических уровней (рис.У1.24):

- уровни, расположенные в запрещенной зоне на границе раздела полупроводника и окисла (быстрые состояния);

- уровни, расположенные на внешней поверхности пленки окисла и частично в самой пленке окисла (медленные состояния).

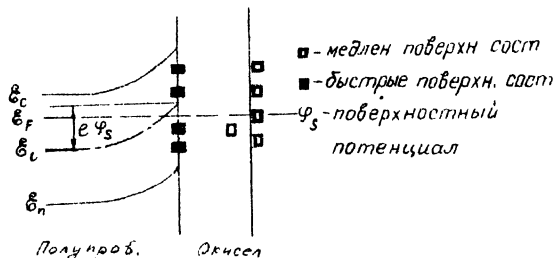


Рис. УГ.24. Искривление энергетических зон вблизи поверхности полупроводника и появление поверхностного потенциала при наличии быстрых и медленных поверхностных состояний

Быстрые состояния имеют время установления равновесия зарядов около  $10^{-8}$  сек и плотность  $10^{-11} \div 10^{-12}$  [см $^{-2}$ ], которая зависит от обработки поверхности полупроводника. Эти состояния обычно имеют большие сечения захвата как для электронов, так и для дырок, т.е. являются рекомбинационными ловушками. Некоторые быстрые состояния могут являться донорами или акцепторами.

Медленные состояния имеют время установления равновесия зарядов от миллисекунд до минут и даже до многих часов (при толстой пленке окисла).

Плотность этих состояний  $\sim 10^{13} \div 10^{15}$  [см $^{-2}$ ], и зависит от окружающей среды так же, как и их уровни.

Таким образом, на поверхности появляется поверхностный потенциал  $\phi_s$ .

При наличии поверхностных состояний энергетические зоны, как указывалось выше, изгибаются. Вклад в изгиб зон дает также и  $U_n$ .

Неподвижный объемный заряд, созданный поверхностными состояниями в диэлектрике под затвором ПИТ, экранирует проводящий канал от управляющего поля затвора. В результате сколько-нибудь эффективное управляющее действие затвора становится невозможным.



На рис.УІ.25 приведены энергетические диаграммы системы полупроводник-диэлектрик-металл при наличии акцепторных и донорных

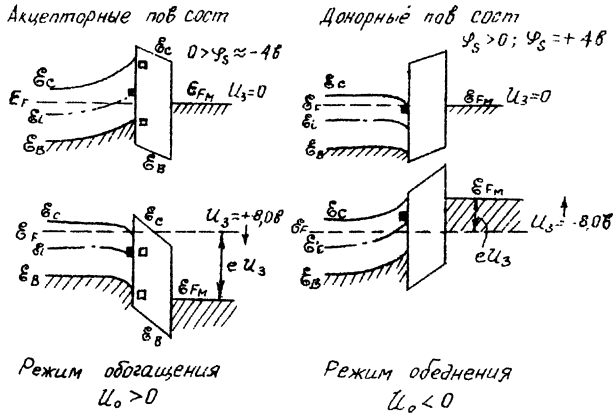


Рис.УІ.25. Зонные энергетические диаграммы при наличии поверхностных состояний для ППТ, работающего в режимах обеднения и обогащения

поверхностных состояний для ППТ, работающего в режиме обогащения и обеднения.

Пленочный транзистор с металлической базой

Принцип действия транзистора с металлической базой основан на прохождении неравновесных (горячих) электронов сквозь тонкую металлическую базу (имеется некоторая аналогия с п-р-п-транзистором). Конструкция транзистора схематически показана на рис.УІ.26.

В таких транзисторах соответствующим подбором диэлектрических или полупроводниковых пленок эмиттера и коллектора можно создать различные входные и выходные сопротивления так, что  $R_{вх} \ll R_{вых}$  при  $I_{вх} \cong I_{вых}$ .

В таких элементах в принципе можно получить усиление по напряжению и мощности

$$R_{вх} \ll T_{вых} \quad R_{вых}; \quad U_{вх} \ll U_{вых};$$

$$U_{вых} \ll T_{вых} \quad U_{вых}; \quad P_{вх} \ll P_{вых}.$$

При этом конструкция транзистора должна быть такой, чтобы на коллектор можно было подавать достаточно большое напряжение, которое ограничивается пробойными явлениями и туннелированием из базы в коллектор.

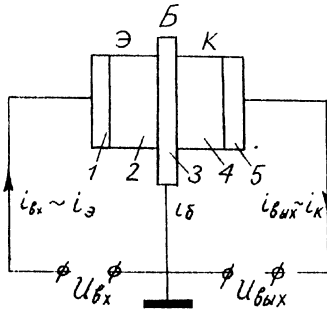


Рис. У1.26. Схема пленочного транзистора с металлической базой:

1 - металлический электрод эмиттера; 2 - эмиттер (полупроводник или диэлектрик); 3 - металлическая база; 4 - коллектор (полупроводник или диэлектрик); 5 - металлический электрод коллектора

Кроме того, выходной ток  $T_o$   $v_{вых}$  при  $U_{вх} = 0$  должен быть существенно меньше выходного тока  $T_{вых}$  при  $U_{вх} < 0$ , т.е. когда слева на коллектор падает поток горячих электронов.

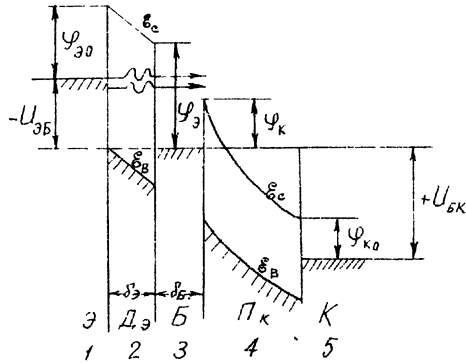
Толщина металлической базы должна быть меньше эффективной длины поглощения горячих электронов.

Например, базу из золота толщиной  $200\text{Å}$  проходит 60% горячих электронов при энергии их над уровнем Ферми 1 эв.

Таким образом, в транзисторах с металлической базой толщина последней должна быть порядка  $200\text{Å}$ .

Конструкция пленочного транзистора с металлической базой может быть реализована в следующих трех основных вариантах эмиттера

а



б

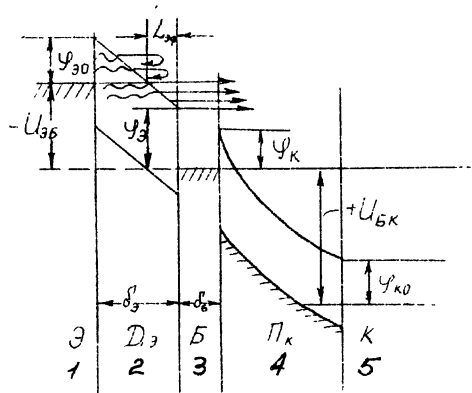


Рис. VI.27. Зонная энергетическая диаграмма транзистора с металлической базой:

а - туннелирование сквозь запрещенную зону эмиттера; б - туннелирование в зону проводимости эмиттера

как источника горячих электронов:

- туннельный эмиттер ;
- эмиттер с потенциальным барьером Шоттки ;
- эмиттер с ТОПЭ.

Энергетическая диаграмма транзистора с туннельной инжекцией электронов приведена на рис. У1.27.

В транзисторе (рис.У1.27,а) туннелирование горячих электронов происходит из металлического электрода эмиттера 1 в базу транзистора сквозь запрещенную зону тонкого диэлектрика эмиттера 2. Очевидно, в такой конструкции для туннельного токопрохождения сквозь эмиттер необходимо, чтобы его толщина лежала в пределах  $20 \div 100 \text{ \AA}$ . При  $d_2 = 100 \text{ \AA}$  проницаемость потенциального барьера (эмиттера) близка нулю. Кроме того, необходимо соблюдение условия

$$\psi'_3 > \psi_k.$$

В транзисторе (рис.У1.27,б) горячие электроны туннелируют из электрода 1 в зону проводимости эмиттера 2 и затем инжектируются в базу. При этом электроны туннелирования, у которых путь в эмиттере больше эффективной длины поглощения  $L_{\text{эф}}$ , в базу транзистора не попадают.

В транзисторах на рис.У1.27,б диэлектрическая пленка эмиттера может иметь большую толщину, чем в транзисторах, показанных на рис.У1.27,а.

В транзисторах с барьером типа Шоттки (рис.У1.28) эмиттером является полупроводниковая пленка, толщина которой не имеет особых ограничений.

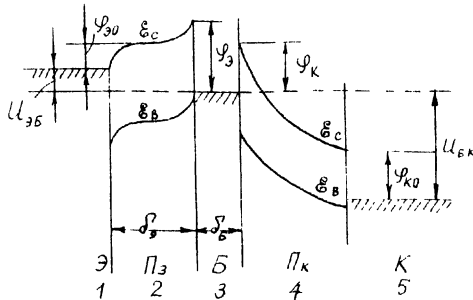


Рис.У1.28. Зонная энергетическая диаграмма транзистора с металлической базой

Контакт электрода I с эмиттером 2 инжектирующий, почти омический. Контакт база-коллектор блокирующий, при этом желательно выполнение условия  $\varphi_{\text{Э}} > \varphi_{\text{К}}$ .

Инжекция в базу горячих электронов осуществляется из эмиттера с потенциальным барьером Шоттки.

В транзисторе механизм токопрохождения в эмиттере обусловлен ТОПЭ (рис.УІ.29).

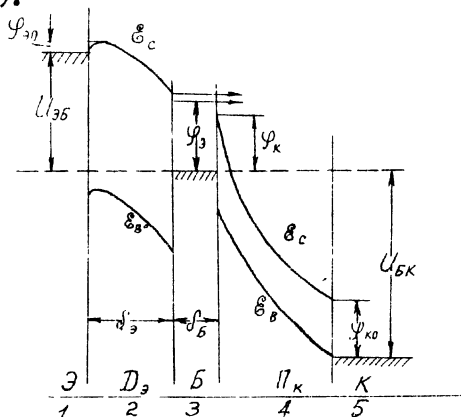


Рис.УІ.29. Зонная энергетическая диаграмма транзистора с металлической базой

В этом случае на толщину пленки эмиттера также не накладывается особых ограничений.

Различие входных ВАХ, описанных выше транзисторов (рис.УІ.27-УІ.29), определяет различие их параметров.

Один из вариантов конструкции транзистора с туннельной эмиссией приведен на рис.УІ.30.

Для транзисторов (рис.УІ.30) были получены коэффициенты передачи тока

$$\alpha = \frac{dI_{\text{К}}}{dI_{\text{Э}}} \Big|_{U_{\text{ЭБ}}} \cong 0,1 \div 0,3.$$

Однако воспроизводимость параметров и характеристик была неудовлетворительной.

В реализации транзисторов с металлической базой имеются следующие трудности:

- сочетание пяти пленок должно обеспечить заданные величины потенциальных барьеров, при этом не должно возникать значительных

механических напряжений ;

- сохранение пространственной однородности в пленках в двух измерениях. Это особенно важно при туннелировании, когда в пленке эмиттера толщиной  $50\text{\AA}$  изменение толщины в  $5\text{\AA}$  приводит к изменению величины тока на 2+3 порядка ;

- отвод тока от очень тонкой базы ( $100+300\text{\AA}$ ) встречает определенные трудности, ввиду очень высокого сопротивления базы ;

- реализация вариантов с туннельной эмиссией встречает особые трудности, ввиду очень малой толщины  $\delta_{\text{Э}}$  и  $\delta_{\text{Б}}$ , при этом потенциальный барьер эмиттера работает в предпробойном режиме ;

- при взаимной диффузии возможно изменение толщины и химического состава весьма тонких пленок даже при комнатной температуре.

Таким образом, при создании транзисторов с металлической базой имеются значительные технологические трудности.

#### ПАЗ на основе управляемой эмиссии

Конструкция ПАЗ на основе управляемой эмиссии из металла в полупроводник схематически показана на рис. VI.31.

**Принцип действия таких элементов заключается в следующем.**

Если на подложку из монокристаллического германия проводимость  $n$ -типа подать положительный потенциал, а на пленки алюминия и золота - одинаковый отрицательный потенциал, то распределение поля в германии будет почти однородным (рис. VI.31,а).

Если затем начать повышать потенциал  $AE$ , то поле ввиду малого диэлектрического зазора будет эффективно концентрироваться вблизи кромок  $Au$  (рис. VI.31,б).

Величина поля может оказаться достаточной для появления надбарьерной или туннельной эмиссии с кромок  $Au$  (эмиттера).

При этом траектории эмиттированных электронов таковы, что на  $AE$  попадает лишь незначительная их часть, т.е. коэффициент передачи тока  $Au$  (эмиттер) -  $BE$  (коллектор) близок к единице. Изменяя потенциал эмиттер ( $Au$ ) - база ( $AE$ ) можно управлять эмиссией с эмиттера.

Очевидно, что соответствующим изменением потенциалов можно поменять местами эмиттер с базой (рис. VI.31,в).



Для успешной работы прибора необходим правильный выбор высоты потенциального барьера эмиттер-коллектор. С понижением высоты потенциального барьера понижается входное напряжение прибора, тогда при этом будет возрастать составляющая неуправляемого тока термоэлектронной эмиссии.

Однако при контакте, близком к омическому, может реализоваться иной физический принцип - управление токами, ограниченными пространственным зарядом.

Описываемый ПАЗ основан на использовании краевых эффектов, поэтому управление токами с больших площадей и изменение мощности прибора за счет изменения рабочих площадей не могут быть реализованы в принципе.

Основным недостатком прибора, как и всех приборов, использующих туннельную эмиссию с кромки или острия, является нестабильность условий на эмиттирующей кромке.

В этом случае происходит активное перемещение (миграция) атомов на поверхности кромки, а следовательно, и изменение условий эмиссии и характеристик прибора.

К числу очевидных недостатков прибора следует отнести большую емкость эмиттер-база.

Исследовано много различных конструктивных модификаций приборов с управляемой эмиссией. В приборах наблюдаются пентодообразные выходные характеристики при коэффициенте передачи тока  $\alpha \cong 0,95$ . Однако стабильность работы приборов, а также воспроизводимость параметров и характеристик пока недостаточно удовлетворительны.

#### Аналоговые триоды на основе ТОПЗ

Элементы называются аналоговыми потому, что их конструкция и принцип действия аналогичны вакуумным триодам, при этом вакуумный промежуток заменен пленочным диэлектриком.

На рис.6.32 приведены различные конструкции аналоговых триодов, где К -катод, С -сетка, А -анод, Д -диэлектрик.

Для успешной работы в аналоговом триоде должны быть выполнены определенные условия.

1. Контакт катод-диэлектрик должен обеспечивать высокий уровень инжекции носителей в диэлектрике.



2. Контакт сетка-диэлектрик должен быть блокирующим, при этом триод может работать только при отрицательных смещениях по отношению к катоду.

Это ограничение может быть в принципе снято, если сетку дополнительно изолировать тонким слоем вспомогательного диэлектрика, дающего блокирующие контакты с металлом сетки и с рабочим диэлектриком. В этом случае при положительных потенциалах сетки ток в цепи сетки будет отсутствовать.

3. Материал рабочего диэлектрика должен иметь по возможности высокую подвижность носителей заряда.

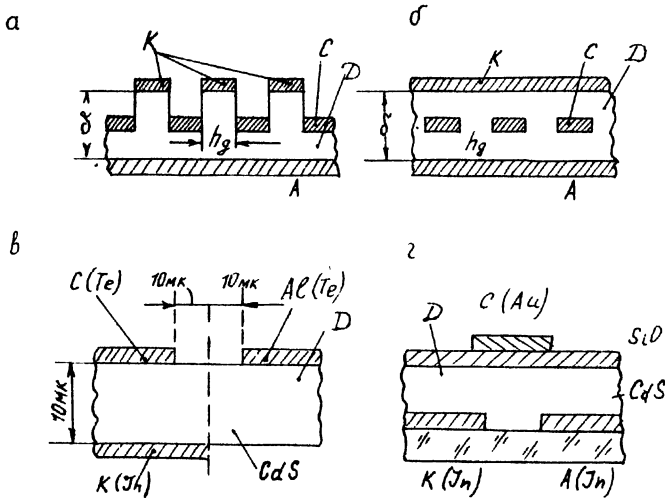


Рис. У1.32. Схемы конструкций аналоговых триодов на основе ТОПЗ

4. В триоде необходимы малые межэлектродные расстояния катод-анод и катод-сетка, управляющий электрод (сетка) также должен быть с густыми ячейками. Это объясняется весьма сильной зависимостью плотности тока, ограниченного пространственным зарядом от межэлектродных расстояний.

$$j \sim \frac{1}{d^2}$$

Для реализации аналоговых триодов на основе монокристаллического рабочего диэлектрика необходимы межэлектродные расстояния  $\delta = 10 \div 100$  мкм. Для поликристаллического рабочего диэлектрика  $\delta = 0,5 \div 10$  мкм.

Столь малые межэлектродные расстояния приводят к большим затруднениям в реализации аналоговых триодов.

Теоретические расчеты показывают, что у аналоговых триодов можно получить высокие параметры, например, крутизну управления

$$S \cong 140 \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{в}} \right].$$

На практике были изготовлены экспериментальные образцы аналоговых триодов упрощенной конструкции (рис.УІ.32,в,г).

Параметры экспериментальных триодов значительно ниже предсказываемых теорией (крутизна управления  $S' \cong 1,0$  ма/в).

## Г л а в а У П

### ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

#### 1. Общие сведения о пленочных интегральных схемах

При разработке и изготовлении пленочных микросхем используется следующая терминология.

Пленочная интегральная схема (или пленочная микросхема, пленочная схема) представляет собой интегральную схему, все элементы которой выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность подложки.

Подложка – это основание, на поверхности или в объеме которого создаются элементы микросхемы.

Гибридная интегральная схема (или гибридная микросхема, гибридная схема) – интегральная микросхема, в которой наряду с элементами, неразъемно связанными на поверхности или в объеме подложки, используются навесные микроминиатюрные элементы (транзисторы, диоды, индуктивности и т.д.). В зависимости от метода изготовления неразъемно связанных элементов различают следующие типы гибридных микросхем: пленочная, тонкопленочная, толстопленочная, полупроводниковая и т.д.

Маска – трафарет, обеспечивающий избирательную защиту отдельных участков микросхемы от технологической обработки.

Фотошаблон – негативное или позитивное изображение оригинала микросхемы, выполненное путем его фотографирования с высокой точностью в масштабе 1:1 по отношению к размерам микросхемы.

Оригинал микросхемы – специальный чертеж конфигурации технологического слоя структуры микросхемы, выполненный с высокой точностью в увеличенном масштабе по отношению к размерам микросхемы.

Фотолитография - способ получения маски в фотослое, нанесенном на поверхность подложки, для защиты участков подложки от травления.

Топология микросхем - раздел микроэлектроники, в котором рассматриваются вопросы размещения и соединения элементов микросхем.

Пленочные интегральные схемы имеют следующие достоинства:  
возможность создания широкого класса схем для дискретной и линейной техники при сравнительно коротком цикле разработки новых типов схем;

возможность получения достаточно полной шкалы номинальных значений пассивных элементов с жесткими допусками;

благодаря дискретному характеру пленочных элементов и соединений возможно применение методов анализа, разработанных для схем с сосредоточенными параметрами, если при этом перекрестные наводки сведены к минимуму;

возможность реализации устройства, выполняющего более сложную электронную функцию, чем полупроводниковая схема, которая также может быть элементом гибридной пленочной схемы;

допускается относительно большая свобода выбора размещения элементов для достижения оптимального теплового рассеяния (например, активные элементы можно размещать в местах, не занятых сопротивлением); имеется возможность сведения до минимума соединений схем за счет свободного выбора оптимальных условий сборки;

пленочный метод позволяет выбрать активный элемент, обеспечивающий минимальную стоимость или лучшие рабочие характеристики независимо от того, будет ли это отдельный диод или транзистор или более сложная функциональная полупроводниковая схема;

сравнительно высокий процент выхода годных изделий на различных операциях технологического процесса.

## 2. Основные технологические этапы изготовления гибридных пленочных микросхем

При конструировании гибридных пленочных схем элементы электрической схемы изготавливают на подложке одновременно в одном или нескольких технологических циклах с последующим монтажом навесных элементов. Резисторы, конденсаторы, контактные площадки и проводники в гибридных пленочных микросхемах изготавливают либо путем последовательного напыления на подложку различных материалов в вакуумных установках (метод напыления через маски, метод фотолитографии) либо нанесением соответствующих материалов в виде пленок иными способами (химическими, способом шелкографии и т.п.). Навесные активные элементы (транзисторы, диоды и др.) в гибридной пленочной микросхеме крепят на плату с пленочной схемой, или на основание корпуса гибридной микросхемы, а при необходимости, на дополнительную плату. Выводы активных элементов присоединяют к соответствующим контактным площадкам с помощью пайки, сварки или другим способом. В гибридной пленочной микросхеме могут быть установлены навесные конденсаторы, индуктивности, трансформаторы и другие микроминиатюрные элементы.

Гибридные пленочные микросхемы, предназначенные для использования в разных типах аппаратуры, должны быть по возможности функционально законченными узлами, герметизированными и должны допускать индивидуальный контроль электрических параметров.

Процесс изготовления тонкопленочной гибридной микросхемы включает следующие основные операции:

составление приближенного эскиза схемы инженером-разработчиком;

разработка и изготовление специалистом-чертежником оригинала микросхемы (точного чертежа) с увеличением действительного размера схемы в 20-30 раз;

анализ оригинала микросхемы и разработка ее топологии в целях выделения всех технологически разнородных групп ее элементов, например сопротивлений, соединений и т.д., с последующим

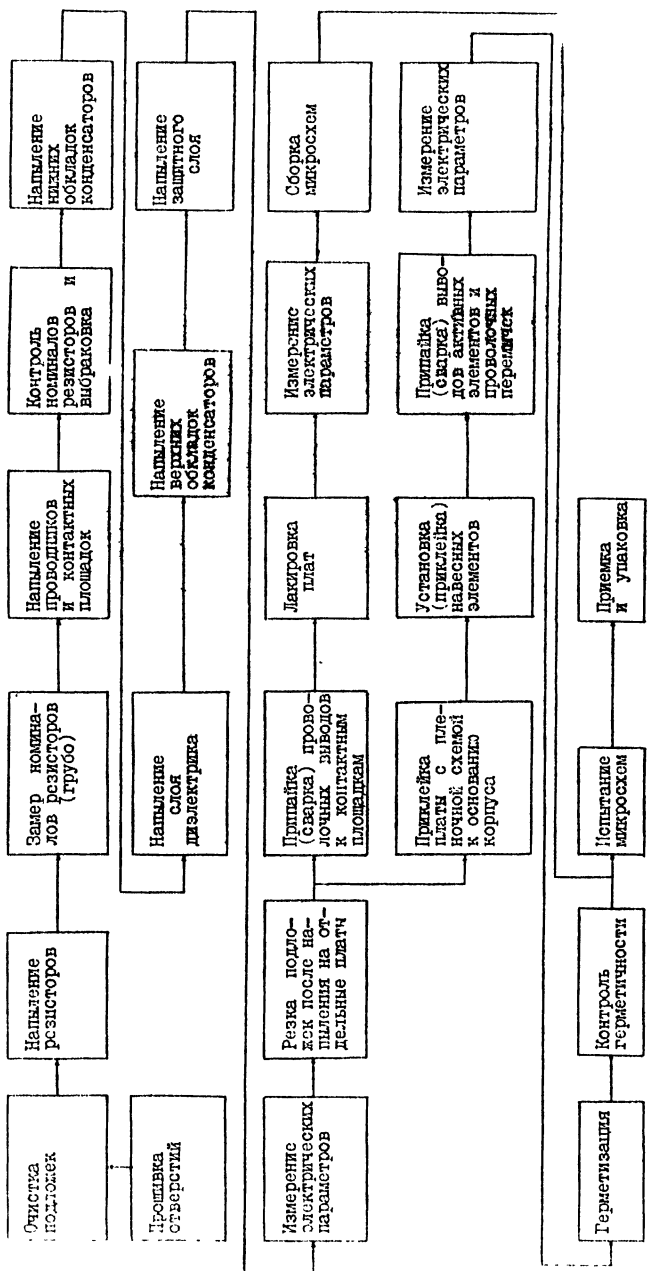


Рис. УЛ.1. Схема технологического процесса при изготовлении ГМО-  
\*ридных тонкопленочных схем

изготовлением точных изображений соответствующих участков схемы;

изготовление прецизионных фотошаблонов путем однократного или последовательного уменьшения оригинала до размера действительной микросхемы и изготовление масок, необходимых при вакуумном осаждении паров различных материалов;

осаждение в вакууме материалов, требующихся для изготовления элементов микросхемы, и производство пленочных элементов путем осаждения паров через маски или травления пленочных покрытий после их осаждения;

монтаж активных элементов, присоединение электрических выводов к подложке и герметизация микросхемы.

Следует отметить, что в технологии изготовления гибридных тонкопленочных схем различают основные и вспомогательные процессы производства. К основным этапам производства относят подготовку подложек, напыление, фотолитографию, монтаж, сборку и контроль микросхемы, а к вспомогательным - изготовление испарителей, фотошаблонов и масок, а также входной контроль активных элементов.

Примерная схема технологического процесса изготовления гибридных тонкопленочных микросхем показана на рис.УП.1. Как видно из этого рисунка, изготовление микросхемы требует проведения большого числа различных операций, а следовательно, и разнообразного оборудования.

### 3. Подложки для пленочных микросхем

Подложки в пленочных микросхемах играют очень большую роль. Во-первых, подложка является конструктивной основой пленочной микросхемы. На нее наносят в виде тонких пленок пассивные элементы схемы и размещают контакты для подключения микросхемы в аппаратуру. Во-вторых, материал подложки и его обработка оказывают существенное влияние на параметры осаждаемых пленочных слоев и на надежность всей микросхемы.

Материал подложки должен обладать высоким удельным электрическим сопротивлением, быть механически прочным при небольших толщинах, химически инертным к осаждаемым веществам, иметь высокую физическую и химическую стойкость при нагревании до нескольких сот градусов, не иметь газовыделений в вакууме, хорошо полироваться. Значения коэффициентов термического расширения материала подложки и напыляемых слоев должны быть по возможности близки. Кроме того, материал должен быть недефицитным и недорогим.

В настоящее время нет такого материала для подложек, который в одинаковой мере удовлетворял бы этим требованиям. К сожалению, большая группа органических материалов не может быть использована в качестве подложек, поскольку технологическая обработка схем ведется в вакууме и при повышенных температурах. Поэтому при подборе материала для подложек остается использовать только стекло, керамику и монокристаллы. Однако следует отметить, что применение монокристаллов в качестве подложек пленочных гибридных схем ограничивается трудностью их получения и высокой стоимостью. Следовательно, наилучшими материалами для подложек являются стекло и керамика. При этом рекомендуются только некоторые типы стекол и керамики.

Из стекол лучшими для подложек являются боро- и алумосиликатные сорта. Путем листового проката этих стекол получают достаточно гладкую поверхность, не прибегая к полировке. (Полировка хотя и снижает микронеровности, делая их менее 100А, но она значительно дороже листового проката. Кроме того, при полировке стеклянных подложек может произойти ухудшение их поверхностных свойств).



Применение щелочных стекол ограничено нестабильностью их свойств, например, при нагреве в электрическом поле наблюдается интенсивное выщелачивание. К недостаткам подложек из стекла следует отнести также плохую теплопроводность, что не позволяет применять их при интенсивном нагреве. В этом случае предпочтительнее использовать стекло "Пирекс", а также кварц и кварцевое стекло.

Основным преимуществом керамических подложек перед стеклянными является их высокая теплопроводность. Так, например, керамика на основе окиси бериллия имеет в 200-250 раз большую теплопроводность, чем стекло. Однако даже незначительная добавка некоторых примесей (например, окиси алюминия) резко снижает ее теплопроводность.

К недостаткам керамики следует отнести большую шероховатость ее поверхности. Микронеровности необработанной керамики достигают нескольких тысяч ангстрем и значительно снижаются после полировки, однако полировка может загрязнить поверхность и изменить свойства керамики.

Значительное снижение шероховатости достигается путем глазурирования поверхности керамики тонким слоем бесщелочного стекла. При этом высокая теплопроводность керамической основы сочетается с гладкой поверхностью стеклянной глазури.

Электрофизические свойства некоторых материалов, применяемых для подложек пленочных схем, приведены в табл. УП.1.

В последнее время все большее применение для подложек пленочных схем находят новые материалы: ситалл и фотоситалл. Ситалл представляет собой стеклокерамический материал, получаемый путем термообработки (кристаллизации) стекла. По своим свойствам ситалл превосходит исходное стекло. В отличие от большинства высокопрочных тугоплавких кристаллических материалов ситалл хорошо обрабатывается. Его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом.

Температурный коэффициент линейного расширения ситалла имеет значение порядка  $5 \cdot 10^{-6}$  1/град в интервале температур от +20 до +300°C, теплопроводность  $3,4 \cdot 10^{-3}$  кал/см.сек.град, диэлектрическую проницаемость 8,5 и тангенс угла диэлектрических потерь при частоте  $1 \cdot 10^6$  гц и температуре +20°C порядка  $2 \cdot 10^{-3}$ . Температура деформации ситалла выше, чем температура

начала размягчения исходного стекла. Ситалл выдерживает резкие перепады температур в воздушной среде от  $-60$  до  $+700^{\circ}\text{C}$ .

Ситалл обладает высоким электрическим сопротивлением, которое несколько уменьшается с повышением температуры. По электрической прочности он не уступает лучшим видам вакуумной керамики. По механической прочности ситалл в 2-3 раза прочнее стекла. Ситалл имеет высокую сопротивляемость истиранию, обладает высокой химической стойкостью к кислотам. Он не порист, дает незначительную объемную усадку, газонепроницаем и имеет малую теплоотдачу при высоких температурах.

Фотоситалл - это стеклокристаллический материал, получаемый путем кристаллизации светочувствительного стекла. Основными составными частями фотоситалла являются окись кремния (75%), окись лития (11,5%), окись алюминия (10%) и окись калия (3,5%)

Т а б л и ц а 7.1.

Электрофизические свойства материалов для подложек пленочных гибридных схем

Наименование материала	Температура коэфф. лин. расширения $\lambda \cdot 10^7$ 1/град. (в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$ )	Теплопроводность, $\lambda, 10^3$ кал/см.сек.-град.	Диэлектрическая прочность (при $+200^{\circ}\text{C}$ и частоте 1 Мгц)	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность кВ/мм
Стекло типа С41-1	41 (20-300)	-	7,5	$20 \cdot 10^{-4}$	$\geq 40$
Стекло типа С48-3	48 (20-300)	2-3,2	6,8	$15 \cdot 10^{-4}$	$\geq 40$
Керамика типа 22ХС	75 (20-900)	$\geq 20$	10	$6 \cdot 10^{-4}$	$\geq 50$
Керамика (полнокор)	70-75 (20-800)	60-90	10,5	$1 \cdot 10^{-4}$	-
Керамика (глазурированная)	73-78 (до 400)	2,5-3,5	13-16	$18 \cdot 10^{-4}$	$\geq 50$
Кварц расплавленный	5	3	3,8	-	-
Фотокеран	104	5	5,6	-	-
Титанат бария	81	3	100-10000	-	-
Ситалл-окись бериллия	61	500	6,3	-	-

с небольшими добавками азотнокислого серебра и двуокиси церия. Фотоситалл устойчив к кислотам, обладает высокой механической и термической стойкостью. Его теплопроводность в несколько раз превышает теплопроводность ситалла, температурный коэффициент линейного расширения в диапазоне температур от +20 до +120°C составляет  $9 \cdot 10^{-6}$  1/град, удельное объемное сопротивление при 150°C равно  $1 \cdot 10^9 + 1 \cdot 10^{10}$  ом.см.

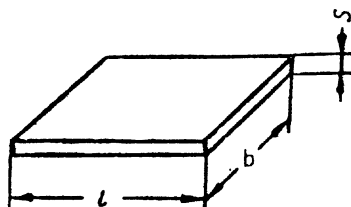


Рис.УП.2. Подложка для пленочных интегральных схем

Подложки, применяемые для интегральных схем, имеют, как правило, квадратную или прямоугольную форму (рис. УП.2.). Рекомендуемые размеры подложек и их заготовок приведены в таблицах УП.2 и УП.3.

Т а б л и ц а УП.2

Рекомендуемые размеры подложек (заготовок) для пленочных гибридных схем

Ширина $b$ , мм	Длина $l$ , мм	Материал
100	100	Стекло
50	50	Стекло
48	60	Стекло, ситалл
30	48	Ситалл
24	30	Ситалл, керамика
20	24	Керамика
16	20	Керамика
10	16	Керамика
10	12	Керамика

Т а б л и ц а УП.3

Рекомендуемые размеры подложек для пленочных гибридных микросхем

Ширина $b$ , мм	30	24	20	16	16	16	12	12	10	10
Длина $l$ , мм	48	30	24	60	30	20	48	30	16	12

Толщину подложек  $S$  рекомендуется принимать равной 0,6 и 1,6 мм. В отдельных случаях подложки могут быть и более тонкими - до 0,2 мм.

Подложки размерами 48x60 мм из стекла и ситалла и 100x100 мм, 50x50 мм из стекла используются обычно для одновременного напыления одной или нескольких плат с пленочной схемой с последующей разрезкой в соответствии с размерами, приведенными в табл.УП.3. Материал подложки и технология ее изготовления должны обеспечивать требуемый класс чистоты поверхности подложки.

Тщательная очистка поверхности подложек перед напылением тонкопленочных слоев является необходимой, так как даже малая шероховатость или загрязнение ухудшают условия конденсации и влияют на качество схемы. Шероховатость поверхности подложки под напыление должна соответствовать I3-I4 классу чистоты.

Поверхность подложки характеризуется двумя параметрами: плоскостностью и микрорельефом. Применяемые подложки микросхем имеют в большинстве случаев удовлетворительную плоскостность и основное внимание уделяется микрорельефу. Очень важно, чтобы поверхность пленки имела возможно меньшие неровности по высоте, и, главное, была бы без резких выступов и впадин. Диэлектрические пленки особенно чувствительны даже к единичному незначительному дефекту на поверхности подложки. Высота гребешков микрорельефа допускается не более 250Å.

Микрорельеф меньше влияет на резистивные пленки, чем на емкостные элементы микросхемы. Это связано с тем, что поры и другие единичные дефекты составляют, как правило, лишь небольшую часть ширины полоски сопротивления и они обычно не вызывают обрывов или чрезмерной концентрации тока в этих местах. Однако гру-

ый микрорельеф вызывает дополнительный разброс удельного сопротивления пленки при производстве микросхемы.

Оценку микрорельефа производят профилографом, а в случае необходимости детального исследования поверхности — с помощью электронного микроскопа.

Профилограф с иглой (рис.УП.3) дает профиль одной линии вдоль поверхности с разрешающей способностью около  $50-100\text{Å}$  по глубине и  $2,5\text{ мк}$  в плоскости. Полученные с его помощью профилограммы дают наглядную картину микрорельефа различных подложек (рис.УП.4)

Высокая чистота обработки поверхности подложки необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров элементов микросхемы и создания благоприятных условий для вакуумного осаждения или фототравления. Очень важно, чтобы на поверхности подложки не было различных загрязнений: пыли, жировых пленок, влаги и т.п. Источниками загрязнений подложек могут быть полирующие составы, состоящие из органических жидкостей, абразивных частиц или из химически активных водных растворов кислот, масла из насосов, атмосфера окружающего помещения, из которой на поверхности подложки конденсируется влага и оседает пыль органического и неорганического происхождения, отпечатки пальцев.

Перед напылением поверхность подложки должна быть тщательно очищена. На практике применяются различные способы очистки в зависимости от материала подложки. Однако существуют некоторые общие требования, которым должны удовлетворять все способы очистки подложек. Наиболее важное из них состоит в том, что при очистке подложки не должна ухудшаться чистота отделки поверхности. Поэтому нельзя использовать сильные химические травители и допускать попадание абразивных материалов на поверхность стекла.

Очистка стеклянных подложек состоит, например, в выполнении следующих технологических операций:

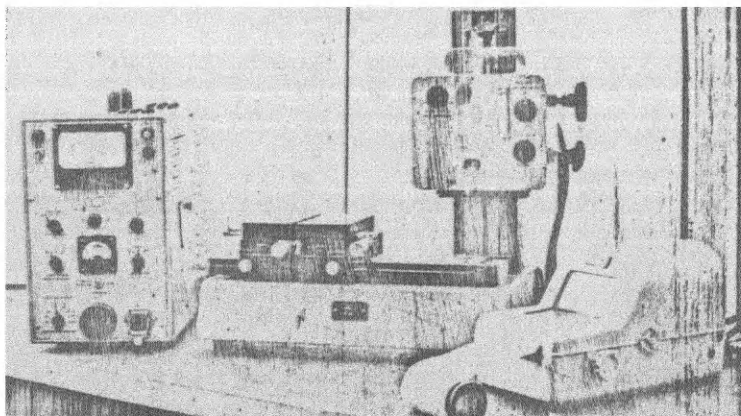


Рис.УП.3. Общий вид профилографа для оценки микрорельефа подложек

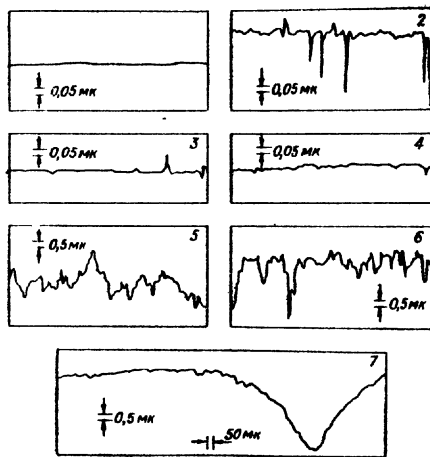


Рис.УП.4. Профилограммы поверхностей различных подложек:  
1 - полированное боросиликатное стекло; 2 - полированное алмосиликатное стекло; 3 - полированный фотоситалл; 4 - полированный ситалл; 5 - необработанное боросиликатное стекло; 6 - протравленный и неполированный ситалл; 7 - необработанный ситалл  
(масштаб по оси абсцисс одинаков во всех случаях, а по оси ординат масштаб на профилограммах 5, 6 и 7 на порядок мельче, чем на остальных)

протирки подложек синтетической кожей, смоченной в ионном моющем веществе, в результате которой удаляются крупные загрязняющие частицы и резко выраженные пятна на стекле;

ополаскивания в деионизованной дистиллированной воде;

промывки подложек в сосуде с деионизованной водой, циркулирующей через деионизирующую колонку, и одновременном воздействии на подложки ультразвука;

промывки подложек в чистом этиловом спирте с последующим высушиванием их в атмосфере паров этилового спирта. Для очистки подложек возможно также использование некоторых физических способов, например полирование пламенем, плавление или обжиг, бомбардировка положительными ионами в глубоком вакууме. Эти методы особенно эффективны в сочетании с применением жидкостей.

Наиболее эффективный способ очистки керамических подложек состоит в прокаливании их при температуре  $+500+600^{\circ}\text{C}$  в электрических нагревательных печах. При прокаливании все загрязнения, имеющиеся на поверхность керамики, полностью выгорают.

#### 4. Пленочные резисторы

В гибридных схемах широко применяются тонкопленочные резисторы, которые наносятся на подложки в виде узких полосок или иной формы, заканчивающихся контактными площадками с высокой проводимостью (рис. УП.5). Качество резистивных пленок оценивается величиной удельного электрического сопротивления на квадрат площади  $R_s$ . Значение  $R_s$  зависит лишь от удельного сопротивления материала и толщины пленки и является величиной постоянной для квадратного сопротивления любых размеров. Действительно, если принять, что сторона квадрата пленки из материала с удельным сопротивлением  $\rho$  равна  $a$  а толщина  $t$ , то ее сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{S} = \rho \frac{a}{at} = \frac{\rho}{t} = R_s, \text{ [ом/квadrat]}.$$

Ширину резистивной линии принимают обычно не менее 0,2 мм, так как ее уменьшение может привести к обрывам из-за дефектов маски или подложки, а также из-за случайных пылинок. Кроме того, чем уже линия, тем сильнее влияние зоны подпыления или тени в цели маски на получение требуемого номинала сопротивления резистора.

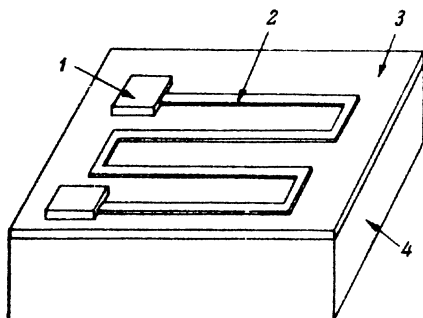


Рис.УП.5. Характерная конфигурация тонкопленочного резистора в гибридной микросхеме:

1 - металлический контакт; 2 - пленка резистора; 3 - подложка; 4 - основание

Практически установлено, что лучше всего изготавливать резисторы прямоугольной формы. При одной и той же толщине резистивной пленки можно получать различные сопротивления, отличающиеся по величине в десятки раз. Для этого достаточно изменить отношение длины пленки к ее ширине. Максимальная рассеиваемая мощность на сопротивление ограничена допустимой температурой сопротивления и зависит от теплопроводности подложки, от отношения площади, занятой сопротивлением, по всей площади подложки, а также от выбранного способа охлаждения и температуры окружающей среды.



Материал, используемый для получения резистивных пленок, должен обеспечивать широкий диапазон стабильных во времени сопротивлений, обладать низким температурным коэффициентом сопротивления и высокой коррозионной стойкостью. При напылении материал резистора должен образовывать тонкие, четкие линии с хорошей повторяемостью их от образца к образцу.

Свойства некоторых материалов, используемых при изготовлении тонкопленочных резисторов, приведены в табл. УП.4. Значения поверхностных сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления, приведенные в этой таблице, являются ориентировочными, так как они зависят от метода нанесения пленки и режима ее обработки. Удельное сопротивление пленки зависит как от ее состава, так и от структуры, которая изменяется в процессе термообработки.

На рис. УП.6 показана типичная зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины. При малой толщине свойства пленки

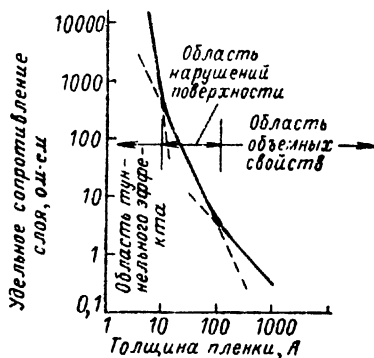


Рис. УП.6. Зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины

сильно зависят от характера микронеровностей на поверхности подложки. Здесь могут наблюдаться нарушения непрерывности структуры

пленки и проводимость осуществляется за счет туннельного эффекта и термоэмиссии между отдельными кристаллитами. Наиболее целесообразно использовать пленки толщиной, при которой существенно сказываются их объемные свойства. В этом случае легче регулировать толщину пленки и, кроме того, нарушения поверхности не будут иметь существенного значения.

Т а б л и ц а УП.4.

Характеристики материалов для тонкопленочных резисторов

Наименование материала	Диапазон поверхностных сопротивлений, ом/квadrat	Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), $10^6, 1/\text{град}$
Золото	5-10	3000
Платина	15-20	3000
Палладий	20-30	2000
Титан	50-100	700
Хром	50-300	600
Нихром	10-400	50-500
Нитрид тантала	50-500	100
Кремний-хром	$10^3-10^4$	50-250
Моноксид кремния-хрома	$10^2-10^4$	250
Тантал (окисль)	$10-10^4$	100
Рений	$10-10^4$	-
Углерод	$10-10^7$	-
Никель	10-300	250
Оксид олова	$10-10^3$	250
Вольфрам	$10^2-10^4$	100
Танталово-хромовый силикат	$10^2-10^4$	500
Палладиево-серебряная глазурь	$10^2-10^5$	500

Металлическая пленка толщиной порядка  $10\text{Å}$ , независимо от природы металла, имеет очень большое удельное электрическое сопротивление, которое экспоненциально уменьшается с увеличением толщины. Пленки такой малой толщины весьма нестабильны и практически не применяются. Для того, чтобы заведомо получить сплошную пленку при имеющихся в производстве отклонениях от выбранного технологического режима, за нормальную толщину пленки, наносимой вакуумным испарением, принимают толщину порядка  $1000\text{Å}$ . Следует отметить, что пленки из тугоплавких металлов могут быть более тонкими, так как они обладают более стабильными характеристиками.

Тонкопленочные резисторы могут быть изготовлены из металлов, сплавов (в том числе многокомпонентных), полупроводников и керметов (смесей металлов с керамикой). Широкое применение находит хромоникелевый сплав (20% хрома и 80% никеля). Поверхностное сопротивление пленки из этого сплава достигает  $300\text{ ом/кв. см}$  при малом температурном коэффициенте сопротивления. Температура испарения у этого сплава порядка  $1600^{\circ}\text{C}$ , причем для высококачественного пленочного сопротивления подложка должна подогреваться до  $300-350^{\circ}\text{C}$ . Из сплава железа с хромом (79% железа, 21% хрома) и железоникелевого сплава (71,5% железа, 21% хрома, 7,5% никеля) получают пленки, обладающие поверхностным сопротивлением  $150\text{ ом/кв. см}$  с температурным коэффициентом сопротивления не более  $1 \cdot 10^{-4}$  1/град. Значительно большим удельным сопротивлением (до  $400\text{ ом/кв. см}$ ) обладает многокомпонентный сплав, состоящий из 74% никеля, 20% хрома, 3% железа и 3% алюминия.

Стабильность металлических пленок зависит до некоторой степени от температуры плавления металла, его плотности и возможности образования стабильного окисного поверхностного слоя. Как правило, чем выше температура плавления, тем лучше стабильность пленки. Вольфрам образует очень стабильные пленки в вакууме, но эти пленки весьма нестабильны на воздухе. Рений - тугоплавкий металл, обладающий такими свойствами, которые обеспечивают образование очень стабильных пленок. Поэтому рений находит все большее применение для получения пленочных резисторов.

Резисторы из рения напыляются методом электронной бомбардировки в вакууме. Температура подложки поддерживается равной  $275 \pm 450^\circ\text{C}$ . В качестве материала для подложки используется в большинстве случаев плавненный кварц. Резисторы из рения обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением (обычно порядка нескольких тысяч ом на квадрат), стабильны в вакууме при температурах до  $+500^\circ\text{C}$ . Стабильность вне вакуума зависит от типа защиты поверхности и метода термообработки. Защитным поверхностным слоем для резисторов из рения служит окись кремния.

В том случае, когда необходимо получить высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением (несколько тысяч ом на квадрат) и малым температурным коэффициентом сопротивления, применяют тантал. Применение тантала для пленочных резисторов объясняется также еще и следующими причинами: поверхность тантала легко покрывается пленкой окиси и становится малоактивной, хотя тантал и относится к активным металлам; тонкий прозрачный поверхностный слой окиси хорошо связан с танталом, обладает высоким сопротивлением износу и коррозии в различных атмосферных условиях и не поддается воздействию многих кислот; процесс окисления тантала легко управляем, что может быть использовано для регулирования толщины пленки и ее сопротивления; пятиокись тантала является хорошим диэлектриком, что позволяет использовать тантал для изготовления не только пленочных сопротивлений, но и пленочных конденсаторов.

Большим поверхностным сопротивлением (до  $10000$  ом/квadrat) обладают пленки из сплава 24% хрома и 76% кремния. Напыление пленок в этом случае производится по методу "вопышки", при котором порошок или небольшие кусочки сплава падают на разогретый до высокой температуры вольфрамовый испаритель. Образующееся при этом облако пара конденсируется на подложке, разогретой до  $200 \pm 500^\circ\text{C}$ . Полученные таким путем пленки отличаются малым температурным коэффициентом сопротивления ( $5 \cdot 10^{-5}$  I/град) и высокой стабильностью (после 2000 час работы изменение сопротивления не превышает 0,2%, а после 5000 час - сопротивление изменяется не более чем на 3%).

Еще большим поверхностным сопротивлением (до 50000 ом/кв.д-рат) обладают пленки из "керметов", представляющих собой смеси металлов с диэлектриками. Типичными керметами являются пленки палладиево-серебряной глазури или танталово-хромового стекла. Резисторы на основе этих пленок используются в схемах, где допустимо высокое значение температурного коэффициента сопротивления.

Наиболее удачной пленкой из кермета является тонкая пленка из смеси монооксида кремния и хрома. Эти пленки обладают хорошими адгезионными свойствами, однородностью, стабильностью, высокой температуростойкостью и хорошими механическими свойствами. Сопротивление пленки в широких пределах может варьироваться в зависимости от состава смеси. Наилучшие характеристики пленок получаются при 70% хрома и 30% монооксида кремния. Испарение смеси производится с вольфрамовой спирали при температуре 1300-1600°C на подложку, нагретую до 200-250°C. После напыления пленки ее нагревают в контролируемой среде при температуре 400-450°C для стабилизации параметров.

Наиболее простой метод регулирования осаждения резистивных пленок заключается в том, что в рабочий объем вакуумной установки вблизи напыляемых подложек помещается контрольная подложка с серебряными контактами (свидетель). Когда сопротивление между контактами контрольной подложки достигнет определенной величины, испарение может быть сразу же прекращено поворотом заслонки. Как показывает опыт, величина сопротивления обычно уменьшается после того, как подложка извлекается из вакуумной системы или когда она подвергается дальнейшей температурной обработке. Объясняется это тем, что атомы газа или другие примесные атомы сорбируются пленкой в процессе ее напыления, а затем при нагреве химически реагируют с ней. Другая причина заключается в возникновении в материале пленки напряжений, которые могут изменяться в процессе отжига.

При изготовлении пленочных резисторов могут использоваться и химические методы их осаждения. При этом необходимая конфигурация пленки получается с помощью съемной маски. Наибольшее распро-

странение получили стannатные резистивные пленки, состоящие в своей основе из двуокиси олова. В этих пленках имеется избыток олова по отношению к стехиометрическому составу, благодаря чему в этом окисле, который в чистом виде относится к классу полупроводников, преобладает электронная проводимость, обеспечивающая значительную собственную электропроводность. Удельное сопротивление стannатной пленки без добавок невысокое - до 20 ом/квaдpат.

Основным положительным качеством стannатных пленок является высокая теплостойкость (до 250°C), высокая химическая и механическая стойкость, влагуостойчивость. Эти свойства при хорошей технологичности способствуют широкому применению стannатных пленок при производстве резисторов.

Следует отметить, что чистая пленка двуокиси олова неустойчива при протекании тока, поэтому всегда вводят добавки. Введение окиси сурьмы (до 50%) позволяет повысить устойчивость и управлять температурным коэффициентом сопротивления в весьма широких пределах, вплоть до изменения его знака. Добавление в пленку двуокиси титана повышает ее удельное сопротивление.

## 5. Пленочные конденсаторы

Пленочные конденсаторы гибридных схем изготавливаются в большинстве случаев вакуумным напылением. При этом требуется по меньшей мере три напыления: нижней проводящей обкладки, диэлектрической пленки и верхней проводящей обкладки (рис.УП.7). В пленочных конденсаторах больше двух обкладок применять не рекомендуется, так как применение конденсаторов с большим числом обкладок затрудняет процесс их изготовления и повышает стоимость.

Емкость пленочного конденсатора определяется по известной формуле плоского конденсатора

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon \cdot S}{d}, \quad (\text{УП.1})$$

где  $C$  - емкость, пф;  
 $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость;  
 $S$  - площадь обкладки, см<sup>2</sup>;  
 $d$  - толщина диэлектрика, см.

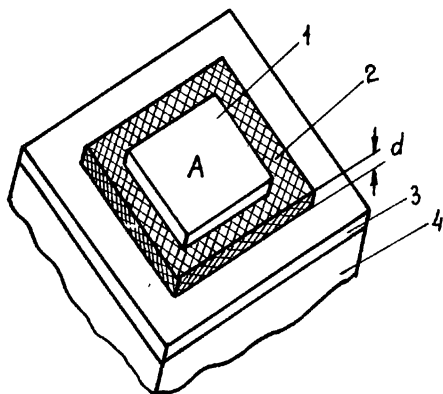


Рис.УП.7. Общий вид тонкопленочного конденсатора:

1 - верхняя металлическая обкладка;  
2 - диэлектрическая пленка;  
3 - нижняя металлическая обкладка;  
4 - подложка

Если число обкладок  $N$ , то емкость определяется по формуле

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S(N-1)}{d} . \quad (\text{VII.2})$$

Основным элементом пленочного конденсатора, определяющим его параметры и свойства, является диэлектрик. В качестве диэлектрика применяются изоляционные материалы, способные образовывать непористые тонкие пленки, обладающие необходимыми электрофизическими свойствами. Материал для изготовления диэлектрических пленок должен удовлетворять следующим основным требованиям: прочно сцепляться с материалом подложки и металлами, быть плотным и не подвергаться механическому разрушению при воздействии температурных циклов, обладать высоким пробивным напряжением и малыми диэлектрическими потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость, не разлагаться в процессе испарения и осаждения и обладать минимальной гигроскопичностью. Кроме того, желательно, чтобы температура испарения материала лежала в диапазоне 1000–1800°C, поскольку более низкая температура свидетельствует о недопустимо высокой подвижности атомов, а при более высокой температуре испарения возникают большие трудности в создании испарителей.

Исследования показали, что указанным выше требованиям удовлетворяет весьма небольшое число диэлектриков. Наиболее часто применяются монооксид кремния  $SiO_2$ , трехсернистая сурьма  $Sb_2S_3$ , монооксид германия  $GeO$ . Могут использоваться также сульфид цинка  $ZnS$ , фтористый магний  $MgF_2$ , а также некоторые редкоземельные окислы и фтористые соединения. Возможно применение в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов ферроэлектрических пленок, например, титаната бария  $BaTiO_3$  и смеси титаната бария с титанатом стронция  $BaTiO_3 + SrTiO_3$ . Пленки этих соединений, полученных испарением в вакууме, могут иметь в некоторых случаях очень высокую диэлектрическую проницаемость (до 1000).

Пленки монооксида кремния имеют высокое пробивное напряжение (до 150 в/мкм) и диэлектрическую проницаемость 5–6. На свойства пленок монооксида кремния сильно влияют условия осаждения. Так,



например, плотность пленок, полученных при высоких скоростях осаждения (25-30 Å/сек), превышает плотность чистой монооксида кремния, а электронографический анализ таких пленок выявляет наличие твердого раствора кремния. Наиболее стабильные пленки монооксида кремния могут быть получены при температурах испарения 1250-1400°C или при более низких температурах, если во время осаждения в камеру добавить водяной пар. Однако в этом случае пленки более гигроскопичны. Следует указать на положительный эффект тепловой обработки пленочных конденсаторов с диэлектриком из монооксида кремния. На рис. VII.8 приведены сравнительные температурные зависимости диэлектрической проницаемости конденсатора

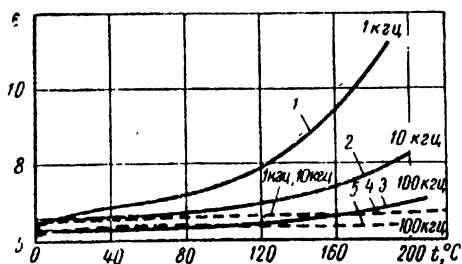


Рис. VII.8. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости пленочного конденсатора на основе окиси кремния на разных частотах:

1, 2, 3 - до тепловой обработки;  
4, 5 - после тепловой обработки на воздухе при 400°C в течение 30 мин.

на основе окиси кремния на разных частотах до тепловой обработки и после отжига на воздухе при 400°C в течение 30 минут. Эти данные говорят о возможности стабилизации параметров конденсаторов и расширении области рабочих температур до 160-170°C в результате тепловой обработки.

Исследования показали, что наилучшим материалом для обкладок пленочного конденсатора является алюминий. По сравнению с другими металлами, которые могли бы использоваться, например, никель, хром, золото, применение алюминия значительно уменьшает число коротких замыканий. Это объясняется низкой температурой испарения алюминия и пониженной подвижностью его атомов на поверхности подложки из-за тенденции к окислению.

Характеристики пленочных конденсаторов с использованием наиболее часто применяемых диэлектриков с обкладками из алюминия приведены в табл.УП.5.

Т а б л и ц а У П . 5

Характеристики пленочных конденсаторов

Материал диэлектрика	Максимальная удельная емкость, пф/см <sup>2</sup>	Рекомендуемый диапазон удельной емкости, пф/см <sup>2</sup>	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность $E \cdot 10^{-6}$ , в/см	Рабочее напряжение при максимальной удельной емкости, в
Моноксид кремния $SiO_2$	15000	10000-12000	5-6	0,002-0,02	2-5	15
Трехсернистая сурьма	20000	10000-15000	18-21	0,004-0,01	0,2-1,0	4
Два слоя: моноксид кремния - трехсернистая сурьма	20000	10000-15000	13-14	0,005-0,001	0,7-2,0	6-10
моноксид германия	15000	10000-12000	10-11	0,001-0,005	0,5-1,5	6-10

Диэлектрические пленки можно получать термическим испарением в вакууме (из резистивного испарителя или с помощью электронного луча); катодным распылением; анодированием осажденных на подложку металлических пленок; химическим осаждением - реакцией в газовой фазе и полимеризацией адсорбированных на подложке мономеров.

Термическое испарение в вакууме - наиболее простой и производительный метод получения пленочных конденсаторов, резистивных и коммутационных элементов. Основное преимущество этого метода состоит в унификации технологических операций получения различных элементов, в возможности изготовления микросхемы в едином технологическом цикле.

Метод термического испарения диэлектрических пленок уже давно широко используется для изготовления оптических просветляющих покрытий. Поэтому материалы, применяемые для оптических покрытий ( $MgF_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnS$ ,  $CaF_2$ ,  $Sb_2S_3$  и др.), начали применяться и в пленочной электронике. Но оказалось, что электрические характеристики пленок большинства этих соединений являются неудовлетворительными для применения их в конденсаторах.

Пленки фторидов кальция и магния, криолита оказались сильно гигроскопичными. Кроме того, склонность к кристаллизации этих материалов увеличивает вероятность катастрофических отказов вследствие растрескивания, шелушения и т.д. Большое распространение за рубежом вначале получили пленочные конденсаторы на основе  $ZnS$ , у которых диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  составляет 8-9 при толщине пленки около  $1000\text{Å}$ , электрическая прочность  $E_{пр}$  равна  $0,8 \cdot 10^6$  в/см, тангенс угла потерь  $tg\delta = 0,01$ ,  $TKE = (1-4) \cdot 10^{-4}$  1/град. Таким образом, основные характеристики пленок удовлетворительны. Однако при отработке технологии оказалось, что параметры пленок  $ZnS$  критичны к примесям, скорости осаждения и температуре испарения. Пленки  $ZnS$  обычно получают с избытком металла, что сказывается на зависимости емкости от частоты и воспроизводимости характеристик. Кроме того, эти конденсаторы обладают повышенной чувствительностью к атмосферной влажности.

Как отмечалось выше, монооксид кремния является пока наилучшим диэлектриком для пленочных конденсаторов. Однако и этот материал требует эффективного строгого контроля во время осаждения, так как воспроизводимость одинаковых характеристик пленок сильно зависит от фазового состава исходного материала для напы-

ления и изменения технологических факторов во время напыления (рис. УП.9 и УП.10). Используя эффективные методы контроля во время осаждения монооксида кремния, удается получать конденсаторы на основе  $SiO$  с удельной емкостью до  $10000 \text{ пф/см}^2$ , с хорошими электрофизическими характеристиками.

Близки по некоторым физическим свойствам к монооксиду кремния пленки и  $GeO$ , хотя значение  $\epsilon$  у них в два раза выше, чем у  $SiO$ , и испарение материала происходит при более низкой температуре ( $800-900^\circ\text{C}$ ), что очень важно с технологической точки зрения. Однако  $E_{\text{пр}}$  пленок монооксида германия меньше, чем у монооксида кремния.

Некоторые распространение получили конденсаторы на основе халькогенидных стекол. Температура испарения этих материалов невелика ( $400-700^\circ\text{C}$ ), а величина  $\epsilon$ , например, в пленках трехсернистой сурьмы  $Sb_2S_3$  достигает  $18-21$ . Эти конденсаторы критичны к влажности окружающего воздуха, к примесям исходного материала. Температурный диапазон работы и  $E_{\text{пр}}$  невелики и соответственно равны  $-60(+85+100^\circ\text{C})$  и  $\approx 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ в/см}$ . Таким образом, несмотря на высокое значение  $\epsilon$  трехсернистой сурьмы, удельная емкость конденсаторов на ее основе обычно не превышает  $15-20 \text{ тыс. пф/см}^2$ ; недостаточную стабильность и электрическую прочность приходится компенсировать большей толщиной диэлектрического слоя.

Испарение целого ряда тугоплавких окислов из резистивного испарителя оказывается невозможным из-за реакции окисла с материалом испарителя при высокой температуре и термической диссоциации. Для испарения таких тугоплавких материалов, как  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и др., применяют электронный луч. Однако несмотря на высокую скорость осаждения (до  $24000 \text{ \AA/мин}$  для  $SiO_2$ ), при напылении возможна диссоциация испаряющегося материала. Регулируя скорость осаждения и температуры подложки, можно получать конденсаторы на основе  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , стабильность которых такая же, как и конденсаторов на основе  $SiO$ .

В последнее время ведутся исследования по напылению пленок сложного состава окисных стекол, титанатов и др., которые в большей степени удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к меха-

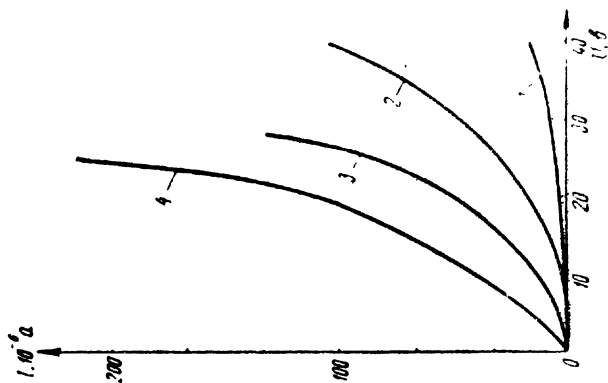


Рис. УП. 10. Вольт-амперные характеристики конденсаторов на основе монооксида кремния, нанесенных при различном давлении остаточных газов (в мм рт. ст.): 1 -  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 -  $1 \cdot 10^{-5}$  (кислород); 3 -  $1 \cdot 10^{-5}$ ; 4 -  $1 \cdot 10^{-7}$

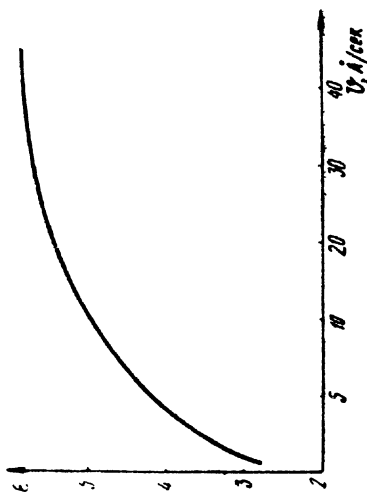


Рис. УП. 9. Изменение диэлектрической проницаемости пленок монооксида кремния в зависимости от скорости осаждения

ническим, электрическим и химическим свойствам пленочных диэлектриков.

Катодное распыление получило широкое распространение при осаждении пленок металлов, полупроводников и их композиций. Однако распыление диэлектрических материалов таким путем практически невозможно, так как на поверхности катода быстро образуется положительный заряд, который не может быть нейтрализован. Для получения окисных диэлектрических пленок катодное распыление металлов производят в атмосфере кислорода, и молекулы металла при испарении, вступая в химическое взаимодействие с атомами кислорода, образуют окислы. При этом определенный состав и композиция окислов обеспечивается композицией сплава в катоде. Таким путем получают, например, окислы  $Ta_2O_5$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  и др., которые могут быть использованы в качестве диэлектриков пленочных конденсаторов.

Основной недостаток катодного распыления - низкая скорость осаждения (порядка 40Å/мин) может быть устранен, если применить высокочастотное катодное распыление. В этом случае в качестве катода можно использовать и диэлектрический материал. Положительный заряд, который возникает на поверхности катода в течение отрицательного периода напряжения, будет нейтрализован электронами во время положительного периода. Этим способом можно получать диэлектрические пленки из некоторых типов стекла. Конденсаторы с такими пленками имеют хорошие характеристики.

Методом анодирования можно получать окисные пленки ряда вентильных металлов (тантал, титан, ниобий, цирконий, алюминий и др.). Наиболее часто на практике применяются пленочные конденсаторы, полученные анодированием пленок тантала. Их осаждают катодным распылением или с помощью электронного луча. Для получения рисунка микросхемы используются методы фотолитографии.

Удельная емкость конденсаторов на основе анодированного тантала может быть значительной ( $0,1-0,2$  мкф/см<sup>2</sup>),  $tg\delta=0,01$  ( $I$  кгц).  $E_{пр}=(1-1,5)\cdot 10^6$  в/см,  $TKE=(2-3)\cdot 10^{-4}$  1/град. Однако частотный предел этих элементов ограничивается диапазоном  $0,1-1,0$  Мгц вследствие большого удельного поверхностного сопротивления тан-

таловых пленок. Танталовые конденсаторы получили ограниченное распространение из-за малой устойчивости к катастрофическим отказам, особенно в условиях повышенной влажности. Конденсаторы на основе анодированного титана обладают еще большими значениями диэлектрической проницаемости и удельной емкости, однако их устойчивость к катастрофическим отказам, вследствие также неотработанности технологии, еще ниже, чем у конденсаторов на основе анодированного тантала.

В последнее время получают распространение конденсаторы на основе анодированного алюминия. Несмотря на небольшую величину диэлектрической проницаемости (8-9), имеет место высокая воспроизводимость и простота получения исходных металлических пленок и стабильность окисной пленки  $Al_2O_3$ . Травление алюминия не представляет трудностей; рисунок на плате может быть получен и обычным масочным способом. Высокое значение электропроводности обкладок позволяет создавать высокочастотные емкостные элементы. Конденсаторы мало критичны к технологическим факторам при анодировании.

Химические методы получения диэлектрических пленок не нашли еще широкого применения, и исследования в этом направлении продолжают. Наилучшим пока является метод осаждения диэлектрических пленок реакцией в газовой фазе, например, разложением тетразтоксида при температуре выше  $600^{\circ}C$  можно получить пленки двуоксида кремния. Существенным недостатком этого метода является невысокая воспроизводимость параметров пленок, обусловленная наличием примесей.

В качестве диэлектрика пленочных конденсаторов можно использовать полимерные пленки, например полистирола, полипараксилена, фторопласта-4 и др. Хотя диэлектрическая проницаемость полимерных пленок и невелика (2-4), они эластичны и имеют хорошие диэлектрические характеристики вплоть до сверхвысоких частот. Одним из существенных недостатков применения в конденсаторах полимерных пленок является трудность получения заданного рисунка микросхемы.

## 6. Индуктивности в пленочных микросхемах

В микросхемах, так же как и в любых радиотехнических схемах, необходимы индуктивные элементы. Величина индуктивности зависит от частоты. В табл.УП.6 приведены расчетные значения максимальной индуктивности, практически необходимые для различных частот. Добротность  $Q$ , требующаяся для таких катушек, зависит от функции, выполняемой ими в данной схеме, однако величина  $Q$ , равная порядка 100, является приемлемой для большинства схем.

Т а б л и ц а У П . 6

Значения индуктивности в схемах при различных частотах

Частота, Мгц	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	50,0	100
Индуктивность, мкГн	10000	1000	350	35	15	1,5	0,5

Получение пленочных индуктивностей в микросхемах с такими характеристиками практически очень трудно, хотя работы в этом направлении ведутся.

Небольшие индуктивности для гибридных схем можно получать двумя путями: путем осаждения на подложку проводящей спирали через соответствующую маску методом вакуумного испарения (рис.7.1) и изготовлением миниатюрной торроидальной катушки с магнитным

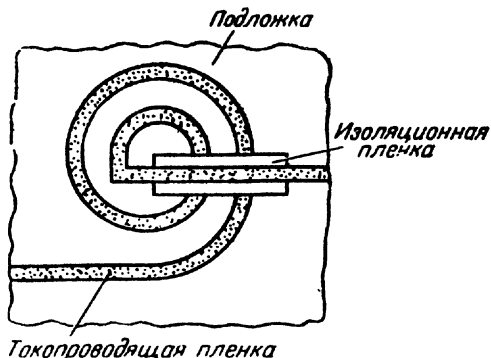


Рис.УП.11. Тонкопленочная спиральная катушка индуктивности



сердечником. Пленочная спираль из 20 витков диаметром 8,3 мм, осажденная на стеклянной подложке и на кремний с удельным сопротивлением 50 ом.см, имеет характеристики, приведенные в табл.УП.7.

Т а б л и ц а У П . 7

Характеристики катушки индуктивности, выполненной в виде 20-витковой спирали на стеклянной и кремниевой подложках

f, Мгц	С т е к л о		К р е м н и й	
	L, мкГн	Q	L, мкГн	Q
20	2,18	36,2	2,26	4,9
40	2,33	49,4	2,57	3,4
60	2,82	47,1	3,20	1,7
80	3,91	35,1	4,42	0,9

Из таблицы видно, что индуктивные элементы на стекле имеют добротность на порядок выше, чем на кремнии, однако они еще не полностью удовлетворяют необходимым требованиям. Напыляемые катушки индуктивности могут иметь форму и в виде прямоугольной спирали. Однако во всех случаях не удается получить в приемлемых габаритах индуктивность более 5 мкГн. В некоторых случаях такая индуктивность оказывается достаточной. Обычно конструкторы избегают использовать напыляемые катушки индуктивности в тонкопленочных микросхемах, работающих на частотах ниже 30 Мгц.

Величина индуктивности в виде плоской спирали может быть определена по следующей приближенной формуле:

$$\alpha = \left( \frac{\kappa}{\sigma} \right)^2 D_1^3, \quad (\text{УП.3})$$

где L - индуктивность, мкГн;

$\sigma$  - шаг спирали, мм;

$\kappa$  - коэффициент, зависящий от отношения

$D_1$  - внутренний диаметр спирали, мм;

$D_2$  - внешний диаметр спирали.

$\frac{D_2}{D_1}$  (рис.УП.12);

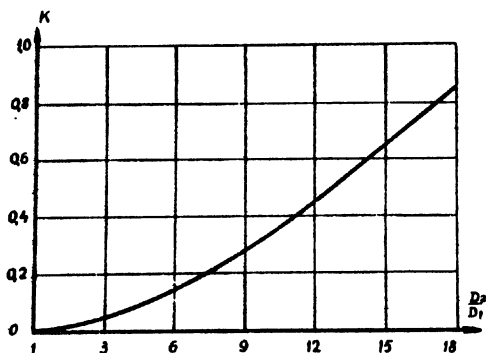


Рис. УП.12. К расчету индуктивности плоской спирали

Ширина витка при заданной добротности  $Q$  может быть определена по формуле (без учета влияния поверхностного эффекта)

$$\delta_0 = \frac{\rho d \left( \frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right) \cdot 10^4}{16 f D_1 \kappa^2 t} Q, \quad (\text{УП.4})$$

где  $\delta_0$  - ширина витка, мм;  
 $\rho$  - удельное сопротивление материала индуктивности, ом.см;  
 $f$  - рабочая частота, Мгц;  
 $t$  - толщина проводящего слоя, мм.

Значения внутреннего и внешнего диаметров спирали выбираются, исходя из возможных размеров индуктивности, размещаемой в гибридной микросхеме. Так как формула (УП.4) не учитывает влияние поверхностного эффекта, то значение  $\delta_0$ , полученное по этой формуле, следует увеличивать в 1,5-2 раза. В случае, если получается  $\delta_0 \geq d$ , то, оставляя  $D_1$  прежним и задавая шаг спирали  $\delta_0 > d$ , из формулы (УП.3) определяется диаметр  $D_2$ , при котором возможно получить заданную величину индуктивности.

Если нанести две спирали на обе стороны подложки, можно получить пленочный трансформатор. Толщина подложки, разделяющей первичную и вторичную обмотки в виде спиралей, определяет взаимную индуктивность. Коэффициент взаимной индукции в этом случае очень мал, так как материал подложки обычно диамагнитный.

При необходимости в системах, выполненных на интегральных схемах, можно применять миниатюрные тороидальные катушки индуктивности с сердечником из порошкового железа или из специальных ферритов. Эти катушки можно размещать, например, в корпусе типа ТО-5, в котором размещаются и некоторые типы гибридных схем.

Во многих случаях вместо катушек индуктивности можно использовать транзисторные схемы, эквивалентные индуктивностям, которые часто используются в интегральных схемах.

### 7. Пленочные проводники и контактные площадки

Для электрического соединения различных элементов схем на одной подложке используются тонкопленочные проводники и контактные площадки. Применяемые для этой цели необходимые материалы должны обладать высокой электрической проводимостью и хорошей адгезией к подложке, а также обеспечивать надежное соединение внешних выводов с контактными площадками схемы с помощью пайки или сварки. Процесс значительно упрощается, если для внутрисхемных соединений и контактных площадок используются одинаковые материалы. Алюминий с успехом используется для проводников, но очень трудно обеспечить хорошее механическое и электрическое соединение с алюминиевой пленкой. Соединение золота и серебра усложняет процесс осаждения пленок с очень низким сопротивлением, а медь легко окисляется. Все эти материалы обладают сравнительно низкой адгезией и поэтому для ее повышения необходимо применять подслои из другого металла.

Исходя из опыта работы, для напыления проводников и контактных площадок рекомендуются золото, никель, медь вакуумной плавки и алюминий. Для улучшения адгезии токопроводящих материалов напыляют подслои хрома или нихрома на подложки из ситалла, стекла, керамики или на межслойную изоляцию из монооксида кремния. В качестве подслоя можно применять также марганец.

В табл.(УП.8) приведены характеристики исходных материалов для проводников, контактных площадок и материалов для подслоя, улучшающего адгезию проводника с подложкой.

Т а б л и ц а У П . 8

Характеристики материалов, применяемых для проводников и контактных площадок гибридных пленочных схем

Материал проводников, контактных площадок и подслоя	Толщина слоя, А	Удельное сопротивление, ом/кв.см.	Рекомендуемый способ контактирования внешних выводов
1. Подслой-нихром Слой - золото	100-300 6000-8000	0,03-0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
2. Подслой - нихром Слой - медь Покрытие-никель	100-300 6000-8000	0,02-0,04	Сварка импульсным косвенным нагревом
3. Подслой - нихром Слой - медь Покрытие-серебро	100-300 4000-10000 800-1000	0,02-0,04	Пайка микропаяльником или сдвоенным электродом, сварка импульсным косвенным нагревом или сдвоенным электродом
4. Подслой - нихром Слой - медь Покрытие-золото	100-300 6000-8000 500-600	0,02-0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
5. Подслой - нихром Слой - алюминий Покрытие - никель	400-500 2500-3500 500	0,1-0,2	Пайка сдвоенным электродом

Контактирование внешних выводов и навесных элементов с контактными площадками рекомендуется производить с помощью пайки или сварки различными методами, например, сварка ультразвуком, сварка (пайка) импульсным косвенным нагревом, сварка (пайка) сдвоенным электродом, пайка микропаяльником.

### 8. Межслойная изоляция

В конструкции тонкопленочной микросхемы часто возникает необходимость пересечения одного проводника другим. В месте их пересечения проводники изолируют друг от друга тонкой пленкой диэлектрика. Пересечение представляет собой маленький конденсатор, ибо проводники имеют конечное сопротивление и между ними существует конечная емкость. Экспериментально установлено, что при большом числе пересечений в схеме каждое пересечение проводников должно иметь сопротивление не более 0,8 ом.см, а емкость не более 2 пф. Для межслойной изоляции применяются в большинстве случаев монооксид кремния и халькогенидное стекло. Характеристики этих материалов приведены в табл. УП.9.

При выборе материала межслойной изоляции и прилегающих проводников необходимо учитывать совместимость материалов. Несовместимость может иметь место, например, при использовании хрома для проводника и монооксида кремния для изолятора. Хром будет диффундировать в монооксид кремния, снижая пробивное напряжение. Может возникнуть и другое явление - гальвано-диффузионный эффект.

Т а б л и ц а УП.9

Характеристики материалов, применяемых для межслойной изоляции

Материал диэлектрика	Удельная емкость, пф/см <sup>2</sup> , не более	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц, не более	Удельное объемное сопротивление, ом.см, не менее	Пробивная напряженность, в/см, не менее
Монооксид кремния	1700	0,03	$1 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^6$
Халькогенидное стекло	5000	0,01	$1 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^6$

Этот эффект может появляться в структурах "металл-диэлектрик-металл"; он увеличивает ток утечки в месте пересечения проводников и разрушает их. При этом возникает электрохимическое взаимодействие между двумя проводниками или между одним проводником и кислородом, что в свою очередь влечет за собой появление тока между двумя проводниками.

## 9. Методы получения конфигураций пассивных элементов

### Тонкопленочных микросхем

Пленочные резисторы, конденсаторы, соединительные проводники, контактные площадки должны иметь определенную конфигурацию для выполнения конкретных функций. Заданную конфигурацию пленок получают несколькими способами: методом фотолитографии, свободной маски, контактной маски, химического травления и др. Выбор того или иного метода получения заданной конфигурации зависит от способов нанесения и свойств материалов тонких пленок, требований по точности, плотности размещения элементов, воспроизводимости, производительности и других факторов.

Фотолитография - это метод получения заданного расположения и конфигурации элементов микросхемы с помощью светочувствительных покрытий-фоторезистов. Наиболее распространен метод контактной фотолитографии, начальной стадией которого является вырезание изображения слоев микросхемы, увеличенных в 100-200 раз координатографом на стекле, покрытом специальной краской, или на пленочных материалах с малой усадкой. В результате получают фотооригинал микросхемы. Применение координатографов с точностью отсчета координат 12,5 мк и точностью определения координаты 25 мк обеспечивает высокую точность изготовления фотооригиналов. Так, если минимальный размер элемента микросхемы 2,5 мк увеличить в 200 раз, то ошибка выполнения фотооригиналов, равная 25 мк, не имеет существенного значения (0,125 мк), так как она составляет 5%.

Затем с фотооригинала изготавливают репродукционной камерой промежуточный негатив, с которого осуществляется мультиплицирование с помощью фотоповторителя и изготовление окончательного

негатива-фотошаблона, на котором расположение и размеры элементов микросхемы соответствуют реальным размерам. Полученный фотошаблон должен изготавливаться с применением высоко разрешающей оптики на фотопластинках с разрешением около 1000 линий/мм. С целью повышения износоустойчивости с полученного фотошаблона можно скопировать металлизированный фотошаблон, который применяется для контактной печати изображения на пленке фоторезиста. Для этого на стеклянную пластинку, покрытую слоем хрома, наносят фоторезист, экспонируют контактным способом через фотошаблон с высоким разрешением, проявляют и травят. На металлизированных фотошаблонах удается получить линии шириной 0,4-0,7 мк.

Менее разработан, но более точен метод фотолитографии, использующий на последней стадии не контактную, а проекционную печать. Применяется он как для получения микросхем, в том числе и без изготовления мультиплицированных негативов, так и для получения металлизированных мультиплицированных фотошаблонов, если в обоих случаях проекцию проводить непосредственно на слой фоторезиста.

Важную роль в процессе фотолитографии играют фоторезисты - органические светочувствительные материалы, изменяющие свою растворимость под действием света. Они должны обладать высокой светочувствительностью к ультрафиолетовой области спектра, высокой контрастностью и соответствующей разрешающей способностью обеспечивать получение резко очерченных краев рельефа, сохранять геометрию изображения после проявления и фиксации, обладать высокой химической стойкостью к селективным травителям. Для изготовления многослойных микросхем необходимы как позитивные, так и негативные фоторезисты. Используемые в настоящее время фоторезисты позволяют получать на стадии проявления линии шириной 0,3 мк.

Метод свободной маски применяется при нанесении пленок термическим испарением в вакууме. Он основан на экранировании части подложки от потока частиц напыляемого вещества с помощью специально изготовленной свободной маски (свободной потому, что она изготавливается и существует отдельно от подложки). Свободная маска представляет собой тонкий экран с отверстиями, очертания и распо-

ложения которых соответствуют желаемой конфигурации напыляемой пленки. Свободную маску укрепляют в маскодержателе, который обеспечивает плотный "прижим" маски и ее фиксированное положение по отношению к подложке. Осаждение испаряемого вещества происходит только на не закрытых маской местах подложки.

Существуют различные виды свободных масок и соответственно способы их изготовления. Если маска изготовлена из одного материала, например, металлической фольги, то ее можно назвать моно-металлической. К материалу, из которого изготавливается маска, предъявляются следующие требования: он должен выдерживать температурные условия вакуумного напыления и не выделять при этом газов и паров, не реагировать с напыляемым материалом и должен быть достаточно жестким и упругим для обеспечения плотного "прижима" к подложке во избежание "подпыла" и точного воспроизведения размеров элементов. Маска из такого материала должна иметь и сохранять в процессе эксплуатации требуемую точность, зависящую как от размера и конфигурации отверстий, так и от размеров рабочего поля маски, которое обычно соответствует размеру подложки. Этим требованиям отвечают некоторые металлы (сплавы меди, молибден, тантал, инструментальная сталь) и такие материалы, как графит и фотоситалл.

Изготовление масок из указанных выше материалов возможно и механическим способом. С этой целью в тонкой металлической фольге (50-100 мк) или графитовой пластинке вырезают отверстия заданной конфигурации и расположения с помощью сверл, фрез, ультразвуковых инструментов и т.д. Этим способом изготавливают очень простые по рисунку маски с низкой точностью воспроизведения. Близкие результаты дает и электроэрозионный способ. По одному из вариантов этого способа в пачке заготовок из фольги делают отверстие, которое пропускает проволоку диаметром 30-50 мк. Она используется как электрод и вырезает на всех заготовках одновременно требуемую конфигурацию. Размеры вырезанных отверстий в маске одной пачки отличаются друг от друга на 10-15 мк, несмотря на непрерывное протягивание проволоки с целью сохранения ее диаметра. Поэтому эти способы не находят широкого применения для серийного изготовления микросхем.



При изготовлении маски способом электрохимического наращивания на полированную пластину из нержавеющей стали наносят светочувствительное покрытие (фоторезист), экспонируют через фотошаблон и проявляют. На поверхности пластины образуется изолирующий рельефный рисунок, соответствующий будущим местам отверстий на маске. Затем на открытые места пластины гальваническим способом наращивают слой меди или никеля требуемой толщины, после чего отделяют изготовленную маску от пластины. Снятие маски не вызывает особых затруднений из-за слабого сцепления осажденного металла с полированной поверхностью нержавеющей стали. С одной пластины заготовки можно получить несколько масок. Точность изготовления может быть достаточной, если осадить тонкий слой металла, но такая маска непрочна. Укрепление маски другими металлами или утолщение ее снижает точность и воспроизводимость результатов. Кроме того, изготовление этим способом масок со сложной конфигурацией затруднительно из-за возможности повреждения элементов при отделении от стальной пластинки. Производительность этого способа ограничена длительностью электрохимического процесса наращивания слоя металла толщиной 40-50 мк.

Наиболее прост и производителен способ травления или фотохимического фрезерования. В этом случае за основу маски берут фольгу какого-либо металла, наносят на нее светочувствительное покрытие - фоторезист, экспонируют через фотошаблон, проявляют и на поверхности ее получают рельефное изображение из фоторезиста, стойкое к химическим реагентам - травителям материала фольги. При воздействии травителя незащищенные места материала заготовки растворяются, в результате чего в маске образуются отверстия. После снятия защитного покрытия получается готовая маска (рис.УП.13). Существенные недостатки этого метода заключаются в том, что, как видно из рисунка, помимо травления вглубь, происходит растравливание материала маски, в результате чего изменяется размер получаемого отверстия. Величина растравливания зависит от многих факторов, в том числе от материала маски, состава и консистенции травителя. В общем случае при одностороннем травлении (когда травление производится только со стороны нанесенного рисунка) величина растравливания приблизительно равна глубине травления.

Таким образом, нельзя вытравить линии, ширина которой меньше толщины используемой фольги. Это справедливо и для случая двухсторонней печати и одновременного или последовательного травления заготовки с двух сторон. С помощью последней модификации способа на фольге толщиной 50 мк можно получить сеть шириной 50 мк с точностью  $\pm 2$  мк при печатании на фоторезисте изображения линии шириной 25 мк.

Свободные маски из молибдена, тантала, вольфрама, полученные этим способом, обладают высокой термостойкостью. Это обеспечивает их многократное использование (до 1000 раз) в процессах напыления с жесткими условиями. Однако существенный недостаток этих масок - ограниченная точность перенесения рисунка с фотошаблона. Поскольку практически очень трудно выдерживать совершенно одинаковые условия для всех последовательно изготавливаемых масок даже при индивидуальном контроле, в размерах одних и тех же элементов возникает расхождение в 5-15 мк на разных масках. Применение этих масок целесообразно в тех случаях, когда условия напыления требуют высокой температуры, а указанная точность вполне приемлема для работы микросхемы.

Устранить изменения размеров элементов маски из-за растравливания можно при использовании биметаллических масок. Биметаллические маски состоят из двух слоев металла. Один, более толстый ( $\approx 100$  мк), служит основой и обеспечивает жесткость и механическую прочность маски. Другой слой, относительно тонкий, является образующим и обеспечивает высокую точность воспроизводимого рисунка. Наиболее распространены биметаллические маски типа бронза - никель (основа - бронза, а образующий слой - никель). Металлы для основного слоя биметаллических масок должны химически растворяться в растворителях, не действующих на образующий слой.

Биметаллические маски типа бронза - никель, сталь - никель создают следующим способом (рис. УП.14). На заготовку маски наносят негативное фоторезистивное покрытие, экспонируют через соответствующий фотошаблон и проявляют. Защитив обратную сторону лаком, заготовку электрохимически покрывают слоем никеля толщиной 7-10 мк, что позволяет воспроизводить на маске перегородки шириной до 5 мк и ширины до 10 мк. Затем удаляют фоторезист и заготовку

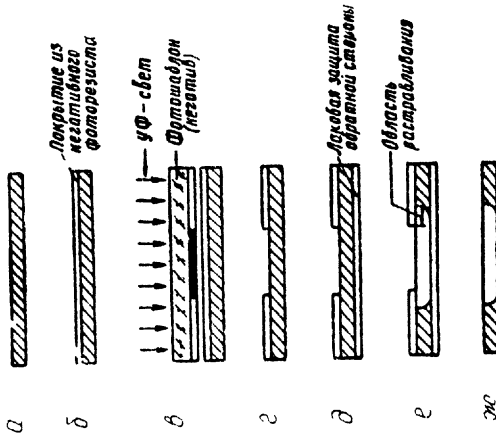


Рис. УП. 13. Схема фотохимического способа изготовления масок: а — подготовка; б — нанесение фоторезиста; в — экспонирование; г — проявление; д — нанесение лаковой защиты; е — травление; ж — готовая маска после удаления лаковой защиты

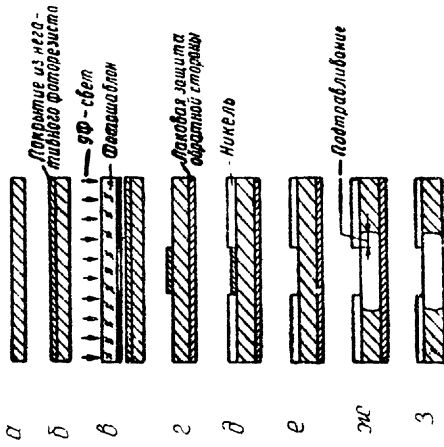


Рис. УП. 14. Схема изготовления биметаллических масок: а — подготовка; б — нанесение фоторезиста; в — экспонирование; г — проявление; д — электролитическое нанесение никеля; е — удаление фоторезиста; ж — селективное травление металла; з — готовая маска после удаления лаковой защиты

подвергают травлению в селективном травителе для основы маски.

Высокая точность изготовления, относительная простота оборудования, легкость воспроизведения процессов делают биметаллические маски в настоящее время наиболее перспективными для применения их в производстве тонкопленочных микросхем. Основным недостатком биметаллических масок - разность коэффициентов линейного расширения образующего слоя и основы. Поэтому маска при нагревании в условиях напыления коробится и выходит из строя. Для устранения этого недостатка проводится или предварительная термическая обработка заготовок для масок, что способствует увеличению их срока службы, или изготавливаются трехслойные биметаллические маски (рис.УП.15).

Определенные трудности в данном случае встречаются при изготовлении второго "зеркального" фотошаблона и совмещении этих фотошаблонов с высокой точностью в процессе двухсторонней печати. Для обеспечения требуемой точности номинала при напылении резистора шириной 100 мк точность совмещения должна быть в пределах до 3-5 мк. Таким образом, после успешного решения данной проблемы этот вид свободных масок можно рекомендовать для массового производства.

Точность совмещения может быть небольшой, если применять "зеркальный" фотошаблон с равномерно увеличенным по ширине изображением щелей.

Применение свободных масок, изготовленных любым методом, наталкивается на некоторые принципиальные ограничения, так, невозможно напыление элемента в виде кольца или напыление через одну маску элемента в виде спирали, "змейки". С усложнением топологии маски увеличиваются затраты на ее изготовление, тогда как число напылений, которое можно произвести через такую маску, сокращается до 3-5 из-за быстрого выхода маски из строя.

При напылении через узкие щели, ширина которых приближается к толщине маски, начинает сказываться "краевой эффект". Уменьшение размеров элементов и повышение плотности их расположения на поверхности подложки, разница в коэффициентах линейного расширения подложки, маски и маскодержателя увеличивают трудности точного последовательного совмещения и также ограничивают применение свободных масок.

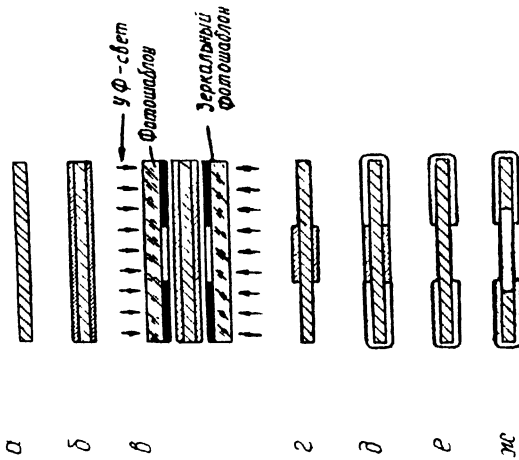


Рис. УЛ. 15. Схема изготовления трехслойных биметаллических масок  
 а - заготовка; б - двухстороннее покрытие из негаливного фоторезиста; в - экспонирование; г - проявление; д - электрохимическое нанесение никеля; е - удаление фоторезиста; ж - травление и получение готовой маски

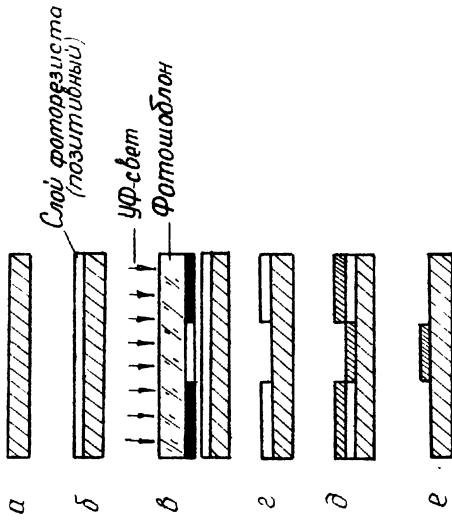


Рис. УЛ. 16. Схема получения тонкопленочных элементов с применением контактной маски (прямой вариант):

а - подложка; б - нанесение фоторезиста; в - экспонирование; г - проявление; д - нанесение слоя материала тонкопленочного элемента; е - готовый тонкопленочный элемент на подложке

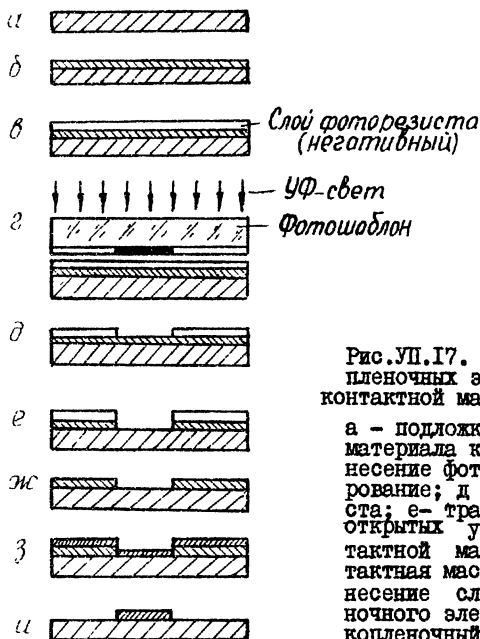


Рис. УП.17. Схема получения тонкопленочных элементов с применением контактной маски (косвенный вариант)

а - подложка; б - сплошной слой материала контактной маски; в- нанесение фоторезиста; г - экспонирование; д - проявление фоторезиста; е- травление или растворение открытых участков материала контактной маски; ж - готовая контактная маска на подложке; з- нанесение слоя материала тонкопленочного элемента; и - готовый тонкопленочный элемент на подложке

Метод контактной маски. Контактная маска изготавливается непосредственно на подложке и держится на ней благодаря адгезии, что позволяет отказаться от маскодержателя. Материал контактной маски (медь, алюминий, никель, окись висмута, фоторезист) должен отвечать определенным требованиям: не испаряться и химически не взаимодействовать с материалом тонкой пленки; обладать малым коэффициентом диффузии; легко удаляться с подложки способами, не влияющими на свойства материала тонкой пленки. В зависимости от

материала контактной маски существуют два способа изготовления. Сущность первого способа (прямой вариант) состоит в том, что на чистую подложку наносят слой фоторезиста, экспонируют и проявляют его, открывая требуемые участки подложки, а затем на полученное рельефное изображение наносят сплошной слой материала тонкопленочного элемента. Полученная заготовка обрабатывается в растворе для фоторезиста, что приводит к удалению участков материала тонкой пленки, лежащих на слое фоторезиста (рис.УП.16).

Второй способ (косвенный вариант) заключается в том, что на подложку для микросхемы наносят сплошной слой материала контактной маски, на него - слой фоторезиста и проводят обычный процесс фотолитографии, удаляя открытые участки материала контактной маски в подходящем травителе или растворителе. При этом открываются заданные участки поверхности подложки (рис.УП.17). Затем снимают фоторезист и на подложку с контактной маской наносят слой материала тонкопленочного элемента. Если теперь на получившуюся заготовку подействовать травителем или растворителем для материала маски, то маска, удаляясь с подложки, увлекает с собой и лежащие на ней участки материала тонкопленочного элемента, который остается только на тех местах, где был нанесен непосредственно на поверхность подложки. Поэтому косвенный вариант довольно сложен и трудоемок и пользуются им при невозможности применения других способов из-за жестких условий нанесения материала тонкой пленки, например, при нанесении резистивной пленки  $SnO_2$ .

Оба варианта метода контактной маски иногда называют методом "взрывной" фотолитографии. По прямому варианту можно получить, например, танталовые сопротивления. При использовании в качестве фоторезиста позитивного продукта AZ - 1350 можно получить линии шириной 0,4 мк при высокой четкости края.

Метод контактной маски является весьма перспективным. Он обеспечивает большую точность и четкость края и применим не только для вакуумного, но и для катодного распыления (в последнем случае самый сложный процесс - маскирование), а также для пиролизных способов получения тонких пленок.

Условия формирования тонкопленочных элементов при их нанесении с применением свободной маски далеки от идеальных. Это связано с тем, что теплопроводность маски и подложки различна и на от-

крытых участках подложки возникает определенный градиент температуры. В условиях применения контактной маски этот градиент значительно снижается.

Наиболее благоприятным для снижения градиента температур является нанесение тонкой пленки сплошным слоем на однородную подложку. Это возможно в случае применения метода селективного химического травления.

Метод селективного химического травления применяется в случае, когда необходимо получить высокую точность воспроизведения рисунка при изготовлении топологически сложной схемы с большим числом элементов. Как уже указывалось, для сложной схемы свободная маска или вообще не может быть изготовлена, или выдерживает лишь несколько напылений. Метод селективного химического травления, так же как и метод контактной маски, позволяет отказать от маскодержателя и высокоточного совмещения масок в условиях напыления. Технология этого метода заключается в том, что на подложку напыляют сплошные пленки алюминия толщиной около  $3000\text{Å}$ . Затем заготовку извлекают из-под колпака, на нее наносится фоторезист, печатают изображение, проявляют, затем проводят травление и анодирование до получения пленки окиси алюминия требуемой толщины. После этого вновь помещают подложку под колпак и напыляют сплошные пленки никрома и никеля, достают из-под колпака, наносят фоторезист, печатают изображения проводников и резисторов и травливают никель и никром с незащищенных мест. Затем повторяют процесс с фоторезистом, но наносят рисунок, повторяющий рисунок проводников, за исключением участков для будущих резисторов. Последующее селективное травление на этих местах только никеля заканчивает процесс получения резисторов. Толщина пленки никрома составляет около  $150\text{Å}$ , никеля -  $10-15\text{ тыс.Å}$ . Описанная технология позволяет получать без подгонки резисторы с разбросом менее чем 5% для номиналов до  $600\text{ ком/кв.кв.}$

Существуют два способа, позволяющие получать микросхемы, содержащие коммутацию и резисторы. Первый - одианное селективное травление (или одианная фотолитография) применяется для изготовления микросхем, коммутация которых может быть выполнена с помощью масок, а для получения резисторов требуется фотолитография.



При этом устраняется необходимость изготовления сложной и нестойкой маски первого слоя. Сущность способа заключается в том, что на подложку напыляют сплошной резистивный металлосилицидный слой, а сверху через маску - проводники и контактные площадки из золота с подслоем никрома. Затем наносят фоторезист и проводят фотопечать, совмещая с контактными площадками изображения концов резисторов на фотошаблоне. После проявления на заготовке остаются защищенные слоем фоторезиста места для будущих резисторов. Для травления незащищенных участков применяют травитель, который хорошо растворяет металлосилицидный слой, но не действует на золото и подслои никрома. После травления образуется готовая схема, содержащая резисторы, коммутации и контактные площадки для сварки или пайки (рис. УП.18).

Ввиду того, что одинарное селективное травление не позволяет получать коммутации высокой сложности из-за ограничений, накладываемых применением свободных масок, был разработан другой способ - двойное селективное травление, или двойная фотолитография (рис. УП.19). Здесь на ситалловую подложку напыляют три сплошных слоя: металлосилицидный, адгезионный подслои и проводящий слой золота. Толщина металлосилицидного слоя около 400 Å (удельное сопротивление 500 ом/квadrat), для адгезионного подслоя толщина определяется сопротивлением 60-100 ом/квadrat, для золота она составляет 0,5-0,7 мк. На полученную заготовку наносят фоторезист, проводят печать и получают изображение коммутации. Затем травят в селективном травителе, растворяющем золото, но не действующем на адгезионный подслои. Потом снимают фоторезист, травят адгезионный подслои в травителе, не действующем ни на золото, ни на металлосилицидный слой. После промывки заготовки процесс проходит аналогично способу одинарной фотолитографии. Изготовление микросхем двойной фотолитографией снимает все ограничения в отношении сложности конфигурации коммутаций и сопротивлений.

Следует указать, что способ двойной фотолитографии создает наилучшие условия для получения резисторов с малыми отклонениями

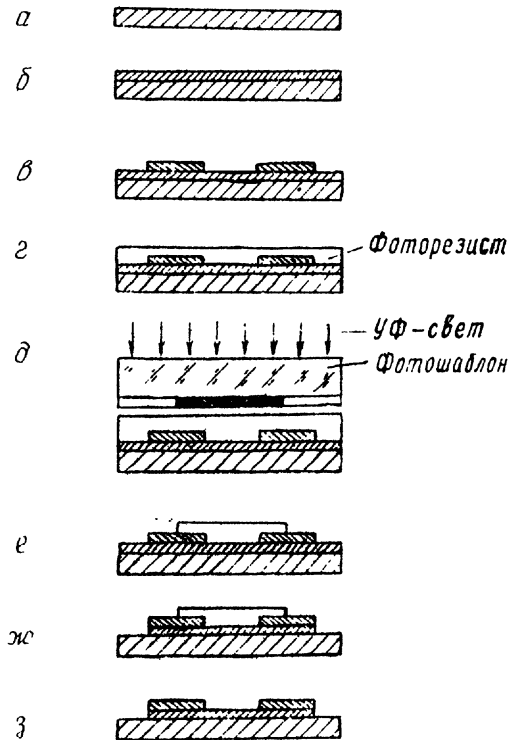


Рис.УП.18. Схема метода одиарного селективного химического травления (одинарная фотолитография):

а- подложка; б- нанесение резистивной пленки; в - нанесение контактов через свободную маску; г - нанесение фоторезиста; д - экспонирование; е- проявление фоторезиста; ж- селективное травление; з - удаление фоторезиста и получение готового элемента

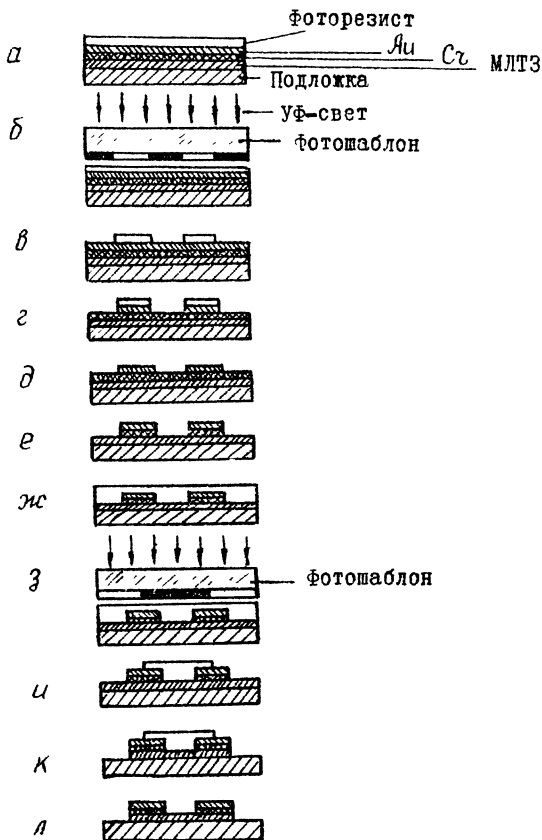


Рис.УП.19. Схема метода двойного селективного химического травления (двойная фотолитография):

а - заготовка со слоем фоторезиста (позитивного); б - экспонирование; в - проявления фоторезиста; г - селективное травление золота; д - снятие фоторезиста; е - селективное травление хрома; ж - второе нанесение фоторезиста; з - второе экспонирование; и - проявление фоторезиста; к - селективное травление; л - удаление фоторезиста и получение готового элемента

от номиналов, высоким выходом годных микросхем и большой производительностью. Это обусловлено тем, что, во-первых, на подложку наносят сплошные пленки материалов микросхем, что создает наиболее благоприятные условия для равномерного формирования пленок. Во-вторых, когда резистивный слой получен с некоторым отклонением от заданного значения удельного сопротивления, можно применять набор компенсирующих фотошаблонов для изготовления резисторов. Последнее совершенно исключено в случае применения свободных и контактных масок. В-третьих, исключение процесса изготовления масок, маскодержателей и процесса совмещения под колпаком вакуумной установки ускоряет и удешевляет изготовление микросхем. Это особенно заметно, когда вместо нескольких масок и соответствующего числа напылений при изготовлении, например, сложных проводников применяют одно напыление и один фотошаблон для фотолитографии.

Кроме контактной и проекционной фотолитографии через фотошаблон, можно использовать способ засветки фоторезиста электронным или световым лучом по заданной программе. Этот метод достаточно перспективен, поскольку позволит отказаться от фотошаблонов при изготовлении микросхем.

В настоящее время разрабатываются методы, не относящиеся к фотолитографическим, поскольку они не требуют применения фоторезистов. К ним относятся: получение элементов микросхем непосредственно на подложке с помощью конного пучка, перемещающегося по заданной программе; обработка электронным лучом по программе или лазером через негатив сплошной пленки для удаления покрытия или самой тонкой пленки; облучение ультрафиолетовым светом через негатив для создания элементов из диэлектрических и проводящих пленок полимеризацией мономеров или разложения металлоорганических соединений.

10. Активные элементы гибридных схем

В гибридных интегральных схемах в качестве активных элементов применяют полупроводниковые микроминиатюрные приборы: дискретные транзисторы и диоды, транзисторные и диодные матрицы.

Активные элементы для гибридных интегральных схем по способу герметизации делятся на бескорпусные и корпусные. Корпусные активные элементы заключены в миниатюрный корпус.

Бескорпусные полупроводниковые приборы наилучшим образом удовлетворяют основному требованию: имеют малые габариты и вес. В этих приборах кристаллы полупроводника защищаются от воздействия внешних факторов методом пассивации поверхности и герметизации при помощи специальных защитных покрытий (лаки, стекло, эмали, смолы, компаунды и др.).

Типы активных навесных элементов, которые могут быть использованы для гибридных пленочных микросхем и их характеристики, приведены в табл. УП.10.

Т а б л и ц а УП.10

Характеристики активных элементов гибридных интегральных схем

Наименование и тип активного элемента	Конструктивные данные	Интервал рабочих температур, °С	Влагоустойчивость
Транзисторы кремниевые, п-р-п, 2ТЭ19 (А, Б, В)	Бескорпусные. Максимальные габаритные размеры: 1, 1х1, 1х0,8 мм	От -60 до +80	Относительная влажность воздуха до 80% при температуре +20 ±10°С в течение 24 часов.
Диодные матрицы, КД901 (А, Б, В, Г)	Бескорпусные. Максимальный диаметр 21 мм, максимальная высота 4,5 мм	От -60 до +85	Относительная влажность воздуха 80% при температуре +25±10°С в течение 24 часов.
Транзистор, р-п-р, ГТ109В	Металлический корпус. Максимальный диаметр 3,7 мм, высота 2,5 мм	От -20 до +55	Относительная влажность воздуха 95-98% при температуре +40±5°С.
Транзистор, р-п-р, ГТЭ10 (Б, В)	Металлический корпус. Максимальный диаметр 3,7 мм, высота 2,5 мм	От -20 до +55	То же



к тому, чтобы паразитные индуктивности и емкости, несмотря на высокую плотность проводников в корпусе, были минимальными. Элементы в схеме должны быть надежно изолированы друг от друга, а тепловое сопротивление между схемой и окружающей средой должно иметь минимально возможную величину.

В большинстве случаев корпус интегральной схемы должен быть герметичным. Внутренняя среда в корпусе не должна сказываться на его рабочих характеристиках и надежности. Корпус должен защищать действующий прибор или схему от внешних воздействий, влияния света, либо другого внешнего излучения. Следует предотвращать возможность химического воздействия на корпус внешней среды, например, кислорода или влажности.

Для гибридных интегральных схем применяется в основном три вида корпусов: металлостеклянный квадратный, металлостеклянный круглый и корпус пенального вида.

Металлостеклянный квадратный корпус (рис.УП.20) состоит из металлического основания 1 с впаянными изолированными выводами 4, изолятора 3 и металлической крышки 2. Выводы основания корпуса герметизируются металлостеклянным спаем. После окончательного монтажа микросхемы герметизацию корпуса производят электроннолучевой сваркой основания с крышкой. Допустимая мощность рассеяния 750 мвт. Размеры корпуса приведены в табл.УП.II.

Т а б л и ц а УП.II

Размеры металлостеклянного квадратного корпуса

В	Р а з м е р ы, м м								Кол-во выводов	Вес, г
	$B_I$	A	$A_I$	H	$H_I$	$H_2$	t	$\alpha$		
24,6	16,2	20	16	9	4	2,7	2	0,45	18	6,5

Круглый металлостеклянный корпус показан на рис.УП.21. Корпус состоит из изолятора 1, металлического фланца 3, крышки 2 и выводов 4. Фланец имеет ключ, расположенный против вывода. Выводы в основании корпуса герметизируются металлостеклянным спаем. После окончательного монтажа микросхемы герметизацию корпуса осуществляют конденсаторной сваркой металлического фланца 3 с крышкой 2.

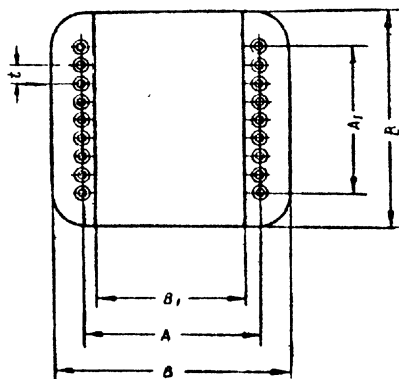
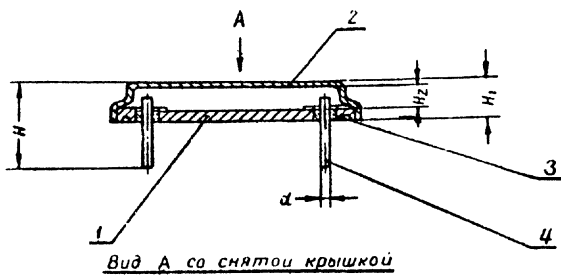


Рис.УП.20. Металлостеклянный квадратный корпус:

I - фланец; 2 - крышка; 3 - изолятор; 4 - выводы



Допустимая мощность рассеяния 60 мвт. Размеры корпусов приведены в табл. УП.12.

Т а б л и ц а УП.12

Размеры металлостеклянных круглых корпусов

Размеры, мм								КОЛ-ВО ВЫВО- ДОВ	Вес, г
Д	Д <sub>I</sub>	Д <sub>2</sub>	Н	Н <sub>I</sub>	Н <sub>2</sub>	в	d		
9,4	7,65	5	24,6	4,6	1,7	0,8	0,45	8	1,1
9,4	7,65	5	24,6	4,6	1,7	0,8	0,45	12	1,2

Круглый металлостеклянный корпус на восемь выводов может иметь в необходимых случаях вывод заземления. Этот вывод приваривается к фланцу и служит для заземления корпуса. Размеры корпуса остаются неизменными.

Корпус пенального вида (рис.УП.22) состоит из алюминиевого

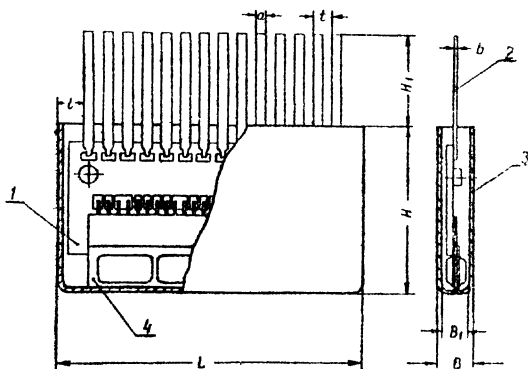


Рис.УП.22. Корпус пенального вида:

1 - плата с пленочной схемой; 2 - выходы; 3 - кожух; 4 - кассета

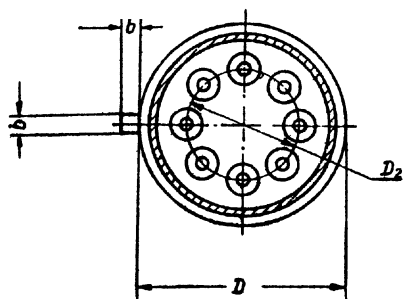
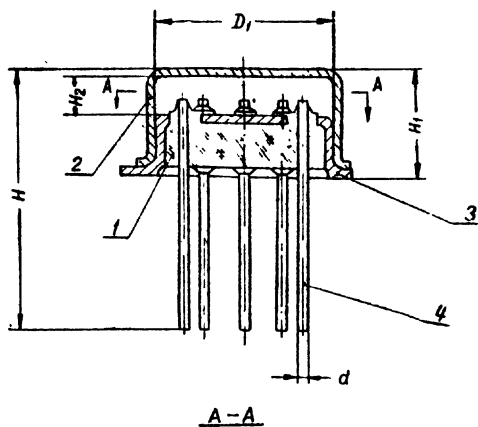


Рис. УП.21. Металлостекляный круглый корпус:

1 - изолятор; 2 - крышка; 3 - фланец; 4 - выводы

кожуха 3, в который вставляют плату с пленочной схемой I. К контактным площадкам приваривают контактную гребенку из меди (лента толщиной 0,1 мм, мягкая, серебряная), после обрезки которой образуются выводы 2. Транзисторы помещены в кассету 4, которую укрепляют на плате клеем при совмещении выводов транзисторов с соответствующими контактами. Размеры корпуса приведены в табл. УП.13. Герметизация корпуса достигается заливкой компаундом со стороны выводов.

Т а б л и ц а . 13

Размеры корпуса пенального вида

Размеры, мм									Кол-во выводов
L	ℓ	B	B <sub>1</sub>	δ	H	H <sub>1</sub>	α	t	
16	1,2	1,7	1,3	0,08	9	5	0,4	1	14

Кроме описанного выше корпуса пенального вида, применяются также пенальные корпуса, состоящие из пластмассового основания с впрессованными в него выводами, изготовленными из бронзы и алюминиевого кожуха. На пластмассовом основании размещают подложки различных размеров: 48х12х0,6 мм, 30х12х0,6 мм и 20х8х0,6 мм. В соответствии с этими размерами применяются и три типа аналогичных корпусов, отличающихся габаритными размерами, соответственно равными: 52х29,8х3,3; 34х29,8х3,3; 26х26,5х3,1 мм. Для размещения активных элементов в основании имеются 28,22 или 20 углублений соответственно размеру корпуса.

При выборе того или иного вида корпуса руководствуются требованиями, предъявляемыми к условиям работы гибридной микросхемы. Корпусную защиту рекомендуется применять в случаях длительной (более 10 суток) эксплуатации микросхем в условиях повышенной влажности. Бескорпусная защита пленочных элементов производится путем покрытия их защитным лаком.

Рассмотренные выше металлостеклянные корпуса обеспечивают длительную работу в условиях повышенной относительной влажности до 98% и в температурном диапазоне от -60 до +125°С.

## 12. Толсто пленочные гибридные схемы

Сущность конструирования радиоэлектронной аппаратуры на основе толсто пленочных микросхем состоит в том, что электрическая схема устройства разбивается на части, конструктивно выполняемые в виде гибридных интегральных схем, которые соединяются между собой в функционально законченные блоки.

### Конструирование. Проектирование топологии

Метод конструирования гибридных толсто пленочных микросхем заключается в том, что пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, контактные площадки, проводники) и защитные покрытия изготавливаются путем последовательного нанесения на подложку через трафарет с последующим втиганием различных по составу и свойствам паст.

Активные элементы (транзисторы, диоды и др.) с помощью пайки или сварки присоединяются к соответствующим контактным площадкам.

Применение данного метода конструирования радиоэлектронной аппаратуры обеспечивает уменьшение ее объема, потребляемой мощности, повышение надежности, обуславливает возможность унификации оборудования.

Микросхемы, созданные на основе толсто пленочной технологии (методом сеткографии), предназначены для применения в блоках, включающих одни микросхемы, и в блоках, выполненных с применением печатного и объемного монтажа. При этом микросхемы должны быть по возможности функционально законченными узлами и допускать индивидуальный контроль параметров. Процесс разработки толсто пленочных микросхем осуществляется в следующей последовательности. Сначала проводится анализ принципиальной электрической схемы устройства, отработанной в объемном исполнении с учетом возможностей толсто пленочной технологии (получение пленочных элементов, необходимых номиналов с заданной точностью, пробивным напряжением, мощностью рассеивания и т.п.), с учетом параметров и конструкций навесных элементов, надежности и стоимости микросхемы, и определяется возможность полного или частичного заимствования деталей, узлов, микросхем из разработанных заранее.

В случае невозможности изготовить микросхему по заданной электрической схеме, принципиальную схему разбивают на

несколько функциональных узлов с учетом максимально возможной унификации микросхем. Затем рассчитывают геометрию пассивных элементов и занимаемую ими площадь, по которой выбирают типоразмер подложки, и проектируют топологию микросхемы. После этого выбирают корпус или разрабатывают новую его конструкцию. На основании созданных чертежей изготавливают экспериментальные образцы, на которых проводят проверку работоспособности микросхемы при полном цикле испытаний. По результатам испытаний отрабатывают техническую документацию на производство микросхемы.

Таким образом, разработка толстопленочных микросхем включает в себя две основные стадии: проектирование топологии и изготовление микросхемы.

Проектирование топологии заключается в составлении схемы взаимного расположения элементов микросхемы, их соединений и выводов, в определении формы пленочных элементов и их вычерчивании в увеличенном масштабе на подложке. При проектировании топологии микросхемы необходимо учитывать технические требования, предъявляемые к микросхемам и устройствам, содержащим их.

Исходными данными для проектирования топологии являются: принципиальная электрическая схема с перечнем элементов и их характеристикой (номинал, допуск, мощность рассеяния для резисторов, рабочее напряжение для конденсаторов, заданный рабочий диапазон температур и др.);

техническое задание;

технологические ограничения.

При проектировании микросхем с применением толстых пленок необходимо учитывать следующую последовательность нанесения слоев:

1-й слой - наносятся через трафарет проводники, контактные площадки, нижние пластины конденсаторов и вжигаются;

2-й слой - наносится через трафарет диэлектрик и вжигается;

3-й слой - наносятся через трафарет верхние пластины конденсаторов, проводники, контактные площадки и вжигаются;

4-й слой - наносится через трафарет резистивный слой и вжигается.

Данная последовательность нанесения слоев относится к одной стороне подложки. При изготовлении толстопленочных микросхем допускается нанесение слоев с двух сторон подложки, при этом последовательность нанесения их сохраняется. Естественно, что в зависимости от технологического процесса нанесения элементов на подложку последовательность слоев может меняться.

Технологические ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании топологии, проявляются в следующем:

1. Точность изготовления пленочных элементов на подложке и их расположение  $\pm 0,1$  мм от одной базы, в качестве которой обычно принимается край подложки.

2. Минимально допустимые расстояния между краями пленочного элемента и подложки равны  $0,1$  мм. Минимально допустимые расстояния между краями подложки и краями отверстий в плате равны  $0,5$ .

3. Размеры контактных площадок для контактирования выводов навесных элементов при помощи пайки  $0,4 \times 0,4$  мм. Минимально допустимые размеры контактных площадок, резисторов и конденсаторов, используемых для контроля номиналов, должны быть  $0,3 \times 0,3$  мм.

4. Максимально допустимая длина проводника навесного элемента, не требующая дополнительного крепления на подложке, должна быть не более  $3$  мм.

5. Минимально допустимое расстояние между пленочными элементами в одном слое должно быть  $0,3$  мм, в разных слоях - не менее  $0,5$  мм. В случае, когда диэлектрик применяется как защитный слой, допускается минимальное расстояние между диэлектриком и другими элементами (кроме контактных площадок)  $0,1$  мм.

6. Минимально допустимая ширина проводников  $0,25$  мм до лужения.

7. Для соединения элементов, принадлежащих разным слоям, должны быть предусмотрены запасы, обеспечивающие надежное совмещение участков соединения элементов.

8. У конденсаторов, имеющих две обкладки, нижняя обкладка должна выступать за край верхней не менее чем на  $0,2$  мм, диэлектрик должен выступать за края нижней обкладки не менее чем на  $0,2$  мм. Не рекомендуется размещать конденсаторы на той стороне подложки, которая при сборке микросхемы заливается компаундом.

9. Минимальная ширина резистора должна быть 1,1 мм.

10. Максимально допустимое количество резистивных слоев на одной стороне подложки 3.

11. Токпроводящие элементы под резистивным слоем не рекомендуется располагать в разных слоях.

12. Резисторы до подгонки необходимо получить с допуском 45% от номинала.

13. При проектировании конденсаторов необходимо предусматривать компенсаторы, учитывающие относительный сдвиг верхних и нижних обкладок конденсаторов.

14. Пленочные элементы должны отвечать требованиям технических условий на них.

15. При разработке топологического чертежа необходимо предусматривать возможность контроля номиналов резисторов и конденсаторов.

Определенных методов размещения элементов на подложке при разработке топологии не существует. Поэтому способ и последовательность работ по размещению и выбору формы элементов носит чисто индивидуальный характер, основанный на опыте и интуиции разработчиков. Главным при этом является решение, на каких сторонах подложки будут размещаться какие элементы, а также возможность размещения их на каждой из сторон. При размещении элементов необходимо стремиться к тому, чтобы их форма была по возможности наиболее простой, а площадь минимальной. Размещение элементов на подложке в процессе проектирования производится на миллиметровой бумаге, на которой в определенном масштабе изображен размер платы и выбран шаг координатной сетки. Монтажные площадки для внешних выводов располагаются по периферии подложки, что определяется типом применяемого корпуса.

Для определения геометрии (размеров и формы) пассивных элементов (резисторов, конденсаторов) пользуются выражениями для расчета пленочных элементов.

При расчете резисторов необходимо стремиться, чтобы разница в номиналах резисторов, расположенных на одной стороне подложки, не превышала трехкратного значения. При необходимости получения большей разницы следует использовать технологию нанесения двух паст на одной стороне платы. В процессе расчета резисторов учитывается и тот факт, что при различной ориентации длин резисторов на одной стороне под-

ложки площадь резисторов с вертикально расположенными длинами должна быть увеличена на 10% по сравнению с резисторами, у которых длина резисторов расположена горизонтально.

Что касается конденсаторов, то с целью обеспечения заданной их надежности форма обкладок всегда выбирается более простой, чтобы их периметр был по возможности минимальным.

### Элементы микросхем

Как уже отмечалось, при проектировании микросхем, в частности, при разработке топологии и расчете пленочных элементов, необходимо руководствоваться данными основных свойств материалов (паст), применяемых для создания толстопленочных элементов.

При изготовлении гибридных микросхем методом сеткографии на поверхность подложки, обработанной до 8-9 класса чистоты, наносятся пасты с последующим вжиганием для создания пассивных элементов и монтируются активные элементы.

В качестве материала подложек используется керамика марки 22ХС, имеющая электрофизические параметры, указанные в табл.УП.14.

Т а б л и ц а УП.14

Электрофизические свойства керамики 22ХС

№ : пп :	Характеристики	Величина
I :	2	3
1.	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	$\geq 3,65$
2.	Водопоглощение, %	Не более 0,02
3.	Предел прочности при статическом изгибе, кг/см <sup>2</sup>	Не менее 3200
4.	Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур, $\angle 10^{-7}$ :	$10^{-7}$
	20 + 200°C	60 ± 5
	200 + 900°C	75 ± 5



I :	2	3
5. Диэлектрическая проницаемость, при частоте $f = 10^{-6}$ гц и температуре: 20°C 300°C		Не более 10,8 Не более 11,0
6. Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ при частоте $f = 10^{-6}$ гц и температуре: 20°C 300°C		Не более $6 \cdot 10^{-4}$ Не более $30 \cdot 10^{-4}$
7. Электрическая прочность, кв/мм		Не менее 30
8. Удельное объемное электрическое сопротивление $\rho$ в интервале температур: 100°C 200°C 300°C 400°C		Не менее $10^{13}$ Не менее $10^{10}$ Не менее $10^9$ Не менее $10^8$

Для изготовления подложек применяются и другие керамические материалы, обеспечивающие качественное изготовление толстопленочных схем. К таким материалам относится высокоглиноземистая керамика марок М-7, Уф-61, Уф-46, берилловая керамика.

Резисторы, конденсаторы, токопроводящие элементы и контактные площадки изготавливаются в виде пленок из специальных паст. В состав паст резистивных пленок входят следующие материалы, которые определяют параметры резисторов: хлористый палладий, азотнокислое серебро, боросвинцовосиликатное стекло. Пленочные резисторы образуются в результате соответствующего сочетания резистивных пленок и токопроводящих элементов. Значения номиналов резисторов находятся в пределах от 5 ом до 300 ком.

Основные параметры пленочных резисторов приведены в табл.УП.15.

Т а б л и ц а УЛ.15

## Основные параметры толстопленочных резисторов

Обозначение резистивных композиций	$R_{уд} \text{ ом/}\Omega$	Токпроводимая композиция	Т К $\times 10^{-4} \frac{1}{\Omega}$ в интервале температур, $^{\circ}\text{C}$ +25+85, +25+(-60)	Коэффициент влаготстойкости $W=98\%$ $t = +40^{\circ}\text{C}$ 30 суток, %	Коэффициент термостойкости $\mu_{\text{т}}$ 5 цикл. -60 +85 $^{\circ}\text{C}$ , %	Коэффициент электростарения +85 $^{\circ}\text{C}$ , 150% Р # 10000 час., %	
ПР5	5		8 +8 -2 +6	+5	+ 2,5	+ 10	
ПР100	100		-2 +4	"	"	"	
ПР500	500		-2 +6	"	"	"	
ПР 1К	1000		-3 +5	"	"	"	
ПР3К	3000		+3 +2	"	"	"	
ПР 6К	6000		+2 -6	"	"	"	
ПР20К	20000		0 -10	"	"	"	
ПР50К	50000		0 -10	"	"	"	
ПР100К	100000		-12 -15	"	"	"	
		<i>Листа №1</i>					

Т а б л и ц а УЛ.16

## Основные характеристики частей для токопроводящих элементов

Обозначение проводниковой композиции	Прочность сцепления с платой, кг/см <sup>2</sup>	Толщина слоя, мк	Удельное сопротивление, ом/Д
Часть № I	Не менее 30	10 + 20	Не более 0,1

Т а б л и ц а УЛ17

## Основные параметры токопроводящих конденсаторов

Обозначение для электрической композиции	Материал обкладки	Пределы номиналов емкости, пФ	Допуск. отклон. действ. емкости от номинала, %	Суд., пФ/см <sup>2</sup>	Техн. условия +30 + 70°C	Параметры конденсаторов				
						Коэф. термост. 5 цик. -60+85°C, %	Коэф. влагост. 30 сут., %	Коэф. электро-старен. 20в; 185°C 500час, %	Код. d	
K I 000-30	Серебро Палладий	50+300	± 20	3500	±4	±4	±4	±5	0,035	Не менее 150
K I 000-30	Серебро Палладий	100+2500	± 20	10000	±10	±4,5	±5	±5	0,045	

Для изготовления токопроводящих элементов и контактных площадок используются пасты, в состав которых входят хлористый палладий, азотнокислое серебро, стекло типа 660а, окись висмута. Основные характеристики токопроводящих элементов и контактных площадок приведены в табл.УП.16. С целью повышения надежности паяных соединений и для уменьшения сопротивления коммутации контактные площадки и токопроводящие элементы дополнительно облуживаются припоем ПОС-61 с добавлением 2+3% серебра.

Для изготовления пленочных конденсаторов применяются пасты на основе следующих материалов:

для верхних и нижних обкладок конденсаторов проводниковая композиция, свойства которой приведены в табл.УП.17;

в качестве диэлектрика - композиция К 1000-30, состоящая из керамического материала и флюса.

Основные параметры толстопленочных конденсаторов приведены в табл. УП.17. Следует отметить, что указанная композиция для диэлектриков пленочных конденсаторов используется также для изоляции пересекающихся на подложке токопроводящих элементов.

В качестве дискретных элементов при конструировании гибридных интегральных схем на основе толстых пленок применяются бескорпусные диоды и диодные матрицы, бескорпусные транзисторы и транзисторные матрицы, корпусные транзисторы в миниатюрном исполнении, полупроводниковые интегральные схемы и др. Бескорпусные дискретные элементы при этом должны сохранять свои электрические параметры и механические свойства после их монтажа на подложке с пленочной схемой. Монтаж таких элементов на подложке осуществляется с помощью эпоксидных клеев для приборов с гибкими выводами и пайки для приборов с жесткими выводами. Среди активных элементов в толстопленочных микросхемах наиболее широкое применение нашли германиевые транзисторы 2Т319, диоды А-237, А-238, А-479 и диодные матрицы типа КД901 с различными модификациями.

#### Технология изготовления

Технология изготовления толстопленочных микросхем, включающая изготовление подложки, приготовление паст, их нанесение и

выжигание, монтаж активных элементов и герметизацию схемы целиком, может быть представлена в виде следующей последовательности технологических процессов (рис. УП.23).

Приготовление порошков исходных материалов осуществляется по специально разработанной для каждого материала технологии. Так, порошкообразное стекло получают путем очистки стекла, с последующими сушкой, помолом в планитарной мельнице, сушкой и просеиванием. Мелкодисперсный порошок молекулярного палладия получают сначала в виде осадка молекулярного палладия (как результат реакции восстановления палладия из его солей путем введения цинка), который впоследствии подвергается очистке, сушке и последовательному просеиванию через два сита с металлической сеткой № 09 и 02. Процесс приготовления мелкодисперсного порошка молекулярного серебра такой же, с той лишь разницей, что молекулярное серебро получают растворением азотнокислого, которое готовится по своей технологии.

Приготовление паст для создания пленочных пассивных элементов независимо от назначения заключается в приготовлении порошковой композиции (получение отвесков применяемых материалов и их смешивание) и собственно в приготовлении пасты, когда в композицию добавляются органические компоненты (лаолин, масло вазелиновое, циалогенсанод) и размешиваются. Процесс приготовления паст осуществляется на специальных установках, где происходит перемешивание.

Для изготовления подложки используется в основном керамика 22ХС, в основу которой входит окись алюминия с добавкой десятых долей процента марганца (для обеспечения роста кристаллов), окиси кремния (для задержки роста кристаллов) и окиси хрома (для увеличения прочности). Все исходные компоненты перемешиваются на валковой мельнице в течение 24 часов, затем промываются кислотой (растворение нагирания металла от валков) и в дистиллированной воде, после чего прокаливаются при температуре 600°C в течение 4 часов. Затем вводится парафин с воском (для связки) и осуществляется отливка на литейных машинах заготовки керамических плат. После отливки производят предварительный обжиг при температуре порядка 1300°C, в результате чего выжигается связка

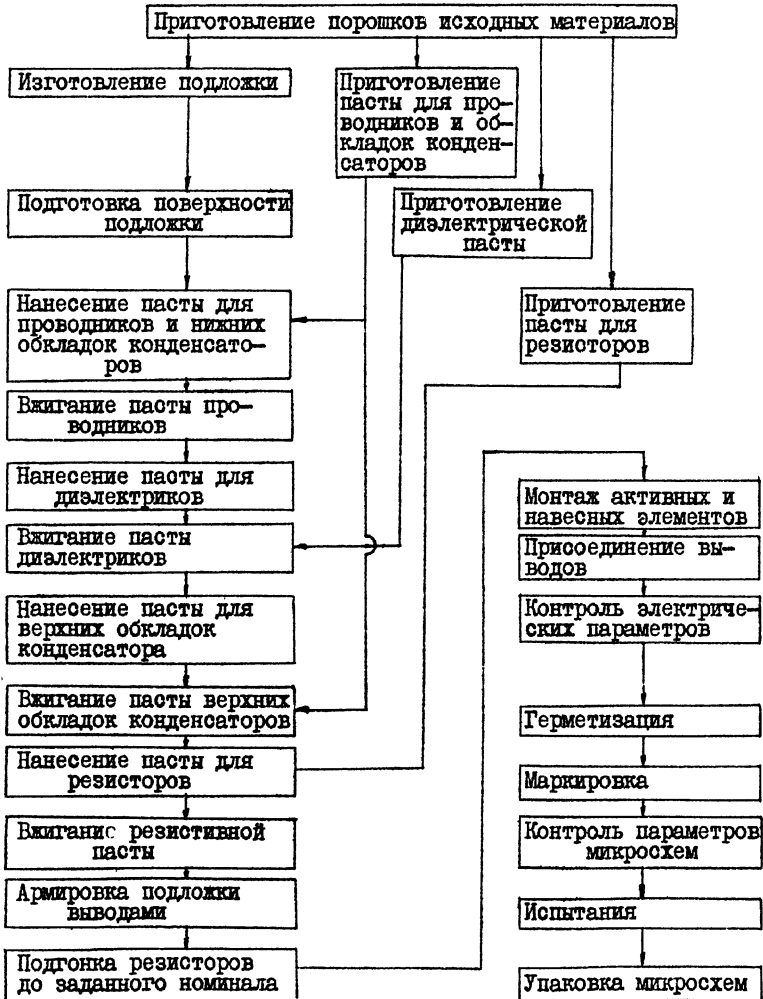


Рис.УП.23. Схема технологического процесса изготовления микросхем на основе толстых пленок

и получается частичное спекание. Окончательный обжиг осуществляется в водородных печах при температуре до  $1600^{\circ}\text{C}$ .

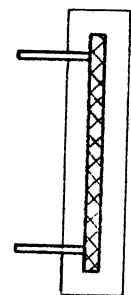
Подготовка поверхности подложки заключается в том, что они шлифуются до определенных размеров на шлифовальных станках, после чего промываются последовательно в теплой мыльной воде, проточной и дистиллированной. Промытые подложки погружаются в лодочки и подвергаются обжигу в конвейерной печи при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ .

Дальнейший процесс изготовления микросхемы определяется количеством и видом изготавливаемых элементов и последовательностью их нанесения. Нанесение паст на подложку осуществляется с помощью специально разработанного для этих целей автомата. Подложки загружают в бункер полуавтомата, устанавливаются трафареты соответствующего рисунка, совмещаются с подложкой, после чего сразу наносится на ракели слой пасты, наносится через трафарет на подложку.

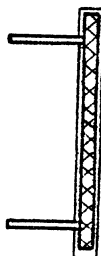
Для нанесения проводниковых паст трафареты изготавливаются на шелковой ткани № 70, № 73, № 76, для нанесения резистивных и диэлектрических паст - на металлической сетке № 004.

После каждого нанесения пасты производится ее вжигание. Для этого подложку с нанесенной пастой помещают в кассету и устанавливают в печь для вжигания. Процесс вжигания длится около 1,5 часа, температура вжигания зависит от состава паст. Так, для пасты проводников температура вжигания составляет порядка  $800^{\circ}\text{C}$ , для вжигания пасты диэлектрика -  $700^{\circ}\text{C}$ , для пасты резисторов -  $640^{\circ}\text{C}$ . Иногда процесс нанесения и вжигания диэлектрических паст повторяется несколько раз - два, три. После изготовления пленочных элементов подложка армируется проволокой и затем осуществляется подгонка резисторов до заданного номинала. Чаще всего для подгонки резисторов используется лазерная установка. Лучом лазера производится выжигание части резистора, что приводит к увеличению его номинала.

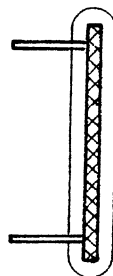
Монтаж активных элементов и присоединение выводов на данных схемах не отличается от аналогичной операции при изготовлении тонкопленочных гибридных микросхем.



а - заливка



б - лакирование



в - обволакивание

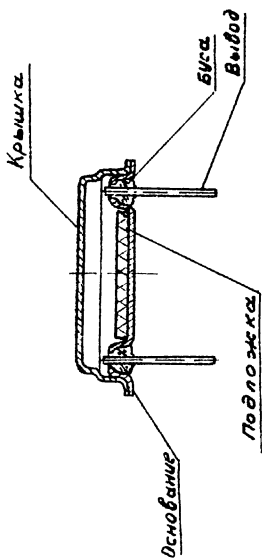


Рис. УП.24. Металлостеклянный корпус

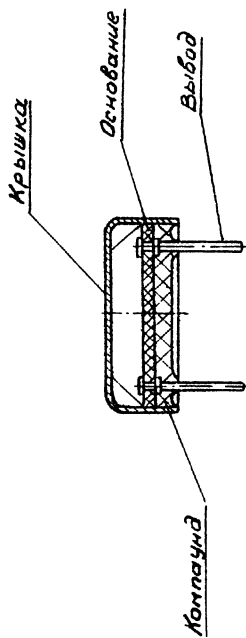


Рис. УП.25. Металлополимерный корпус

Рис. УП.26. Бескорпусная защита



Для герметизации изготовленной микросхемы используются корпусные и бескорпусные методы защиты. Корпусная защита выполняется в виде двух вариантов:

- герметизация в корпусе сваркой или пайкой (рис.УП.24);
- герметизация в металлополимерном корпусе (рис.УП.25).

Бескорпусная защита может быть выполнена заливкой компаундами, покрытием лакокрасочными материалами и обволакиванием (рис.УП.26).

Технологический процесс изготовления гибридных микросхем на основе толстых пленок заканчивается контролем работоспособности микросхемы и ее испытаниями. Следует отметить, что контроль осуществляется после каждой технологической операции. Так, при приготовлении порошков исходных материалов контролируется насыпной вес, содержание влаги, полнота отсымки от монов ОН. Пасты контролируются на вязкость, качество покрытия и величину сцепления; кроме того, токопроводящие - на способность к лужению, а резистивные - на соответствие заданному номиналу. Подложки с пассивными компонентами контролируются визуально по внешнему виду с помощью микроскопа. Этому контролю подвергаются все 100% схем. Качество изготовленных конденсаторов определяется по величине емкости и добротности всех конденсаторов для 100% плат, качество резисторов - по величине сопротивления.

Рассмотренный метод конструирования радиоэлектронной аппаратуры и технологии микросхем обеспечивает простоту изготовления пассивной части, не требует сложного, дорогостоящего оборудования, что в свою очередь обуславливает низкую стоимость производства. Толстопленочная технология позволяет применять крупносерийное, автоматизированное производство микросхем. Все это характеризует данную технологию как один из перспективных методов изготовления гибридных интегральных схем.

### 13. Тонкие магнитные пленки. Основные свойства,

#### применение и технология изготовления

Одним из направлений тонкопленочной микроэлектроники является создание магнитопленочных интегральных схем: запоминающих устройств, усилителей, переключательных устройств, параметронов. Особенно большой интерес представляет использование тонкопленочных металлических магнитных материалов в микроэлектронных запоминающих устройствах (ЗУ), где в качестве элементов памяти применяются тонкие магнитные пленки (ТМП). ТМП позволяют создавать надежные и быстродействующие ЗУ с малой мощностью управления, что отвечает основным требованиям микроэлектроники.

Запоминающие элементы на ТМП конструктивно состоят из двух частей: носителя информации (ТМП), который является непосредственно запоминающей средой, и элементов управления, с помощью которых записывается или считывается информация. Магнитопленочные носители информации представляют собой слой магнитного материала толщиной от нескольких сотен до нескольких тысяч ангстрем, нанесенный на немагнитное основание (подложку).

Основные свойства, характеризующие ТМП и благодаря которым магнитопленочные носители информации используются в матрицах ЗУ, проявляются в следующем:

- стабильность характеристики в случае, если на элемент не оказывается никакого внешнего влияния;
- малое время переключения при переходе элемента из одного стабильного состояния в другое;
- небольшая мощность управления при переключении элементов;
- простое соединение элементов в матрице для выполнения логической операции связи;
- высокая однородность свойств и характеристик, определяющих их работоспособность в матрицах большого объема.

Большинство этих требований выполняется благодаря только специфическим свойствам, проявляющимся в ТМП вследствие их двумерной геометрии (чрезвычайно малого отношения толщины к линейным размерам). Так, при намагничивании тонких пленок размагничивающий фактор в направлении нормали к плоскости пленки

значительно превышает размагничивающий фактор в плоскости пленки, что обеспечивает расположение вектора намагниченности в плоскости пленки. Двумерная геометрия пленок определяет также их магнитную структуру, так как при уменьшении толщины магнитного слоя до определенного критического значения пленка становится однодоменной (состоит из одного слоя доменов). Это позволяет производить перемагничивание тонкой пленки не только за счет смещения доменных границ, но и путем одновременного поворота векторов намагниченности доменов в направлении внешнего поля. Перемагничивание тонких пленок способом когерентного (однородного) вращения вектора намагниченности позволяет получать время переключения порядка единиц наносекунд. Причем быстрое перемагничивание тонких пленок не вызывает перегрева из-за благоприятного отношения площади поверхности к объему. Из-за малой толщины в тонких магнитных пленках практически отсутствуют вихревые токи вплоть до сверхвысоких частот.

Применение ТМЛ в качестве носителей информации основано на том, что эти элементы обладают двумя устойчивыми состояниями. Эти состояния пленки обеспечиваются благодаря одноосной магнитной анизотропии - предпочтительной ориентации вектора намагниченности, которая создается в процессе изготовления пленки или при ее последующей термической обработке с помощью внешнего магнитного поля. При этом в плоскости пленки создается так называемая ось легкого намагничивания (ОЛН), параллельно которой стремится установиться вектор намагниченности пленки. Ось, лежащая в плоскости пленки и перпендикулярная ОЛН, называется осью трудного намагничивания (ОТН). Намагничивание пленки до насыщения в различных направлениях требует разной затраты энергии. Минимальная энергия требуется для намагничивания в направлении легкой оси, а максимальная - для намагничивания в направлении ОТН.

Одноосная анизотропия характеризуется величиной энергии  $E_K$ , необходимой для отклонения вектора намагниченности в плоскости пленки на угол  $\theta$  от легкой оси

$$E_K = K \cdot \sin^2 \theta, \quad (\text{УП.5})$$

где  $K$  - константа анизотропии.

Внешнее поле  $H_K$ , необходимое для полного намагничивания пленки в направлении трудного намагничивания и удерживающее вектор намагниченности  $M$  в состоянии устойчивого равновесия, называют полем анизотропии.

$$H_K = \frac{2K}{M}. \quad (\text{УП.6})$$

Считается, что одноосная анизотропия в тонких пленках возникает не за счет внешнего поля, прикладываемого при изготовлении пленки, а обуславливается спонтанной намагниченностью отдельных доменов. Внешнее поле вызывает лишь образование и сохранение однодоменной структуры во время роста пленки (если это не происходит самопроизвольно) и обуславливает таким путем одинаковую ориентацию преимущественной оси намагничивания по всей пленке.

Одноосная анизотропия в ТМП может быть создана и другими способами:

- наклоном напылением пленки на подложку;
- термообработкой пленки в магнитном поле;
- направленной полировкой подложки.

Основными источниками наведенной анизотропии являются: направленное упорядочение пар ферромагнитных атомов, направленное упорядочение вакансий и примесей кристаллической решетки, напряжения магнитострикционного характера, замороженные в результате сцепления с подложкой, и эффект "самозатекания" при наклонном падении пара металлических атомов на подложку, как результат анизотропии формы неферромагнитных включений.

Ось легкого намагничивания в ТМП, создаваемая наведенной анизотропией, теоретически прямолинейна. Однако на практике наблюдается дисперсия легкой оси, т.е. изменения прямолинейности оси по всей пленке, что ухудшает переключательные свойства пленок и особенно сказывается на перемагничивании когерентным вращением.

Дисперсия легкой оси возникает из-за наличия в пленках других форм магнитной анизотропии: магнитострикционной, кристаллографической и анизотропии формы, среди которых основной причиной дисперсии является магнитострикционная анизотропия.

Магнитострикционная анизотропия возникает при неоднородной деформации (сжатии или растяжении) магнитного материала. Магнитострикционный эффект характеризуется изменением размеров ферромагнитного материала при намагничивании. Ферромагнитное тело характеризуется коэффициентом магнитострикции: положительным, когда размеры тела увеличиваются при намагничивании, и отрицательным при уменьшении размеров тела. В материалах с положительным коэффициентом магнитострикции одноосное механическое напряжение при растяжении тела создает легкую ось в направлении действия силы, а при сжатии - легкую ось, перпендикулярную направлению действия силы. Для материалов с отрицательным коэффициентом магнитострикции направление легкой оси перпендикулярно направлению действия силы при растяжении и параллельно - при сжатии. Магнитострикционная анизотропия возникает в ТМП в процессе их изготовления. Основной причиной возникновения магнитострикционной анизотропии, что приводит к дисперсии легкой оси, являются микронапряжения, возникающие при соединении частиц сплава пленки с подложкой и друг с другом. Кроме того, на величину магнитострикции влияет процентный состав исходного материала для получения пленки (пермаллой с 81%  $Ni$  и 19%  $Fe$  характеризуется нулевой магнитострикцией).

Магнитокристаллическая анизотропия обусловлена кристаллической структурой пленки. Различные величины энергии магнитного взаимодействия между спинами электронов в разных направлениях кристаллов приводят к тому, что в кристаллитах пленки создается кристаллографическая ось легкого намагничивания, направленная вдоль кристаллических осей.

Магнитная анизотропия формы обусловлена геометрией подложки и имеет место тогда, когда геометрия подложки является причиной неоднородности размагничивающего поля, создаваемого намагниченностью пленки. Размагничивающее поле всегда стремится скомпенсировать действие приложенного внешнего поля.

Двумерная геометрия магнитопленочных элементов обеспечивает ярко выраженную магнитную анизотропию формы; в плоскости пленки размагничивающий фактор очень мал (порядка  $10^{-4}$ ), а в

направлении нормали к плоскости пленки составляет  $4\pi$ . При конструировании тонкопленочных элементов очень важно обеспечить минимальную анизотропию размагничивающего фактора и его однородность в плоскости пленки. Именно неоднородность размагничивающего фактора в плоскости пленки сказывается на ее переключательных свойствах.

При изготовлении элементов на ТМП важной задачей является сведение к минимуму всех форм проявления магнитной анизотропии (особенно магнитострикционной и магнитокристаллической), что обеспечит получение пленок с минимальной и угловой дисперсией оси легкого намагничивания и амплитудной дисперсией  $\Delta H_K$ . (Угловая дисперсия ОЛН характеризуется наличием в пленке областей, направления намагниченности которых отличаются от среднего направления; амплитудная дисперсия  $\Delta H_K$  характеризуется наличием в пленке областей с различными величинами  $H_K$ ).

Получение однородных ТМП по структуре и составу решает эту задачу.

### Магнитные характеристики пленок

Наиболее важная особенность тонких магнитных пленок, которая сейчас вызывает наибольший интерес, связана, по-видимому, с высокой скоростью перемагничивания. В зависимости от свойств пленки и приложенных полей могут наблюдаться три вида перемагничивания: однородным вращением (процесс, протекающий в течение наносекунд); движением стенок доменов (медленный процесс, сравнимый по скорости с перемагничиванием ферритов) и неоднородным вращением.

Теория магнитоэластического поведения материалов с одноосной анизотропией и с изменением состояния намагниченности при перемагничивании заключается в следующем. В тонких пленках вследствие влияния размагничивающих эффектов намагничивание ограничивается плоскостью пленки. Устойчивые состояния намагниченности соответствуют минимальному значению свободной энергии. В упрощенной модели, не учитывающей анизотропию кристалла или анизотропию формы, свободная энергия характеризуется двумя величинами: энергией одноосной анизотропии, определяемой как  $K \sin^2 \theta$ ,

и взаимодействием между вектором намагниченности и приложенным полем (-Н.М.). Следовательно,

$$E = \kappa \sin^2 \theta - H_L M \cos \theta - H_T M \sin \theta, \quad (\text{УП.7})$$

где  $\theta$  - угол между вектором намагниченности  $\vec{M}$  и осью легкого намагничивания;  $H_L$  и  $H_T$  - составляющие вектора напряженности намагничивания.

Для нахождения минимума свободной энергии необходимо приравнять нулю производную:

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = H_K \sin \theta \cos \theta + H_L \sin \theta - H_T \cos \theta = 0, \quad (\text{УП.8})$$

где 
$$H_K = \frac{2\kappa}{M} \quad (\text{УП.9})$$

Если приложено только поперечное поле ( $H_L = 0$ ), то петлю гистерезиса в направлении трудного намагничивания можно вычислить из соотношений

$$\sin \theta = \frac{H_T}{H_K} \quad (\text{УП.10})$$

и

$$M_T = M \frac{H_T}{H_K}, \quad \frac{H_T}{H_K} \leq 1 \quad (\text{УП.11})$$

Отсюда видно, что в направлении трудного намагничивания петля гистерезиса представляет собой прямую линию для исходного состояния  $\left[ \frac{H_T}{H_K} \right] \leq 1$ . Здесь через  $H_K$  (величина  $H_T$ ,

при которой наблюдается насыщение) обозначена анизотропия поля. При  $H_T > H_K$  вектор  $M_T$  достигает насыщения.

Для определения петли гистерезиса в направлении продольного намагничивания (вдоль легкой оси) полагается, что

$$H_T = 0 \\ \sin \theta (H_K \cos \theta + H_L) = 0.$$

Для нахождения минимума исследуется вторая производная:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} = 2K(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + H_L M \cos \theta; \quad (\text{УП.12})$$

при  $\theta = 0$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} = 2K + H_L M \quad \text{и} \quad H_L > -\frac{2K}{M}, \quad (\text{УП.13})$$

а при  $\theta = \pi$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} = 2K - H_L M \quad \text{и} \quad H_L < \frac{2K}{M}. \quad (\text{УП.14})$$

Следовательно, продольная составляющая вектора намагниченности всегда равна  $+M$  или  $-M$ . Резкий скачок от  $-M$  до  $+M$  происходит при значениях  $H_L = \pm H_K$ . Эти петли гистерезиса показаны на рис.УП.27 (в магнитомягких материалах  $\beta = H + 4\pi M \approx 4\pi M$ ). При определенных значениях  $H_K$  и  $H_T$  вторая производная проходит через нуль и, следовательно, значение энергии изменяется от минимальной величины до максимальной. В геометрическое место точек соответствующих значений вектора напряженности поля включается и критическая кривая. Ее получают, если первую и вторую производные приравнять нулю и решить полученные уравнения:

$$\frac{H_L}{H_T} = \cos^3 \theta, \quad \frac{H_T}{H_K} = \sin^3 \theta. \quad (\text{УП.15})$$

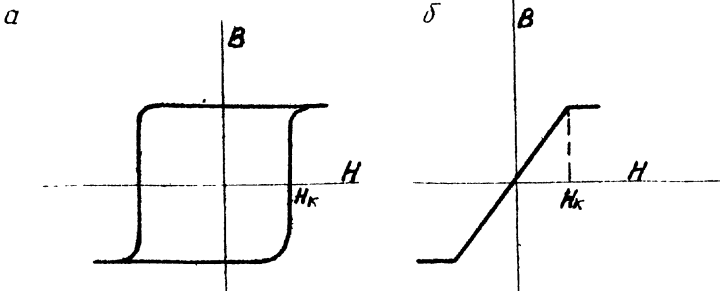


Рис.УП.27. Идеальные петли гистерезиса в направлении легкого и трудного намагничивания:

а - продольное направление; б - поперечное направление



или

$$H_L^{2/3} + H_T^{2/3} = H_K^{2/3} \quad (\text{УП.16})$$

Эта кривая приводится на рис.УП.28. Если вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  изменяется внутри критической кривой, то существуют два устойчивых состояния намагниченности  $\vec{M}$ . Если он выходит за пределы критической кривой, то одно из этих состояний становится неустойчивым, что вызывает переключение из этого состояния в устойчивое.

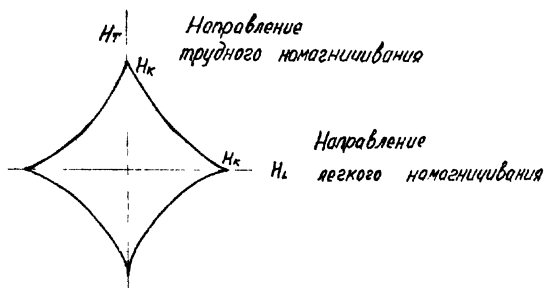


Рис.УП.28. Критическая кривая

$$H_L^{2/3} + H_T^{2/3} = H_K^{2/3}$$

(линия, определяющая направление намагниченности, является касательной к этой кривой)

Направление намагниченности для данного значения напряженности поля  $\vec{H}$  получают, вычерчивая касательную, направленную от конца вектора  $\vec{H}$  к критической кривой.

Статическая модель, описанная выше, определяет важный рабочий параметр пленки  $H_K$ , а также условия переключения из одного устойчивого состояния в другое, которое происходит, если напряженность магнитного поля превысит величину, определяемую внутренней областью критической кривой. Сравнение экспериментально полученной петли гистерезиса в направлении трудного намагничивания с теоретической кривой (рис.УП.28) дает критерий оценки свойств пленки.

Однородное вращение одного домена можно описать следующими уравнениями:

$$\frac{d\rho}{dt} = T, \quad (\text{УП.17})$$

$$M = \gamma\rho, \quad (\text{УП.18})$$

$$T = M \times H, \quad (\text{УП.19})$$

которые сводятся к уравнению

$$M = \frac{dM}{dt} = \gamma T, \quad (\text{УП.20})$$

где  $\rho$  - угловой момент;  
 $T$  - крутящий момент, воздействующий на намагниченность;  
 $H$  - крутящий момент, создающий поле;  
 $\gamma$  - гиромангнитный коэффициент.

В величину  $\dot{H}$  входят величины, соответствующие значениям полей, воздействующих на намагниченность, в том числе приложенному полю  $H_a$ , полю анизотропии  $H_{an}$ , размагничивающему полю  $H_D$  и демпфирующему полю  $H_f$ , пропорциональному скорости перемагничивания. Выражения для демпфирующего и размагничивающего полей представляются так:

$$H_f = - \frac{\lambda \dot{M}}{\gamma M} \quad (\text{УП.21})$$

и

$$H_D = - 4 \pi M \sin \psi \rho_z, \quad (\text{УП.22})$$

где  $\psi$  - угол между направлением намагниченности и плоскостью  $xy$ ;

$e_z$  - единичный вектор, нормальный к плоскости пленки.  
 Если ввести в формулу величину полей, определяющих вращающий момент, то получим

$$M = \sqrt{M} \times (H_a + H_{an} + H_D - \frac{\lambda M}{\sqrt{M}}) =$$

$$= \frac{\sqrt{T_1}}{1 + \lambda^2} - \frac{\sqrt{\lambda}}{(1 + \lambda^2) M} (M \times T_1), \quad (\text{УП.23})$$

где

$$\vec{T}_1 = M \times (H_a + H_{an} + H_D) = -z \times \nabla E. \quad (\text{УП.24})$$

Этим моментом определяется вращение.

В сферической системе координат и при  $\psi = \pi/2 - \theta$  уравнения для составляющих  $\psi$  и  $\phi$  (значением  $\lambda^2$  в знаменателе пренебрегают) принимают вид

$$\psi = - \frac{\sqrt{\lambda}}{M} \frac{\partial E}{\partial \psi} - \frac{\sqrt{\lambda}}{M \cos \psi} \frac{\partial E}{\partial \phi}, \quad (\text{УП.25})$$

$$\phi = \frac{\sqrt{\lambda}}{M \cos \psi} \frac{\partial E}{\partial \psi} - \frac{\sqrt{\lambda}}{M \cos^2 \psi} \frac{\partial E}{\partial \phi}. \quad (\text{УП.26})$$

Перемещение  $\psi$  вследствие размагничивающих полей мало, а составляющая анизотропии по оси  $Z$  пренебрежимо мала, по сравнению с размагничивающим полем. Следовательно,  $\cos \psi \approx 1$ ,  $\sin \psi \approx 0$  и  $dE/d\psi \approx 4\pi M^2 \psi$ . Таким образом, приведенные выше уравнения принимают вид

$$\psi = - 4\pi \cdot M \sqrt{\lambda} \psi - \frac{\sqrt{\lambda}}{M} \frac{\partial E}{\partial \phi} \quad (\text{УП.27})$$

и

$$\phi = 4\pi M \sqrt{\lambda} \psi - \frac{\sqrt{\lambda}}{M} \frac{\partial E}{\partial \phi} \quad (\text{УП.28})$$

Величина  $\lambda$  изменяется в пределах от 0,02 до 0,07,  $\nu = 1,76 \cdot 10^7$  (э.сек) $^{-1}$ . Для выяснения физического смысла движения вектора намагниченности будем считать вращающий момент  $dE/d\phi$  постоянной величиной, равной  $I$ . Тогда решение уравнения для  $\psi$  примет вид:

$$\psi = 2,2^{-3} (1 - e^{-t/10^{-9}}), \quad (\text{УП.29})$$

что соответствует слабому подъему вектора намагниченности над плоскостью пленки с постоянной времени, равной  $I$  нсек.

Вектор намагниченности, таким образом, прецессирует относительно размагничивающего поля и изменяет свое направление на  $180^\circ$  за несколько наносекунд. Численные решения вышеуказанных уравнений показывают, что наиболее интересным представляется исследование монокристаллического характера пленки с однородными свойствами и влияния размагничивающего поля.

Поведение пленки в процессе переключения усложняется также наличием движения стенок домена. Для получения необходимого соответствия с идеальной ротационной моделью необходимо использовать поля с амплитудой, значительно превосходящей значения, получаемые при исследовании простой модели, и меньшим временем нарастания. Реальная пленка характеризуется неоднородностью магнитных свойств, обусловленной локальными изменениями состава, анизотропией кристалла, анизотропией механических напряжений, дефектами структуры и конечными размерами пленки. Таким образом, в реальной пленке должна наблюдаться как дисперсия напряженности поля  $H_K$ , так и дисперсия направления легкого намагничивания. Так как на краях пленки действуют большие размагничивающие поля, то вблизи этих краев появляются домены с противоположной намагниченностью. Если магнитное поле меньше критического и переключения не происходит, то стенки этих доменов могут пересекать поверхность пленки.

Суммарный эффект проявляется в том, что в зависимости от величины времени нарастания, ориентации и амплитуды управляющего поля могут наблюдаться три вида перемагничивания. Они характеризуются как формой сигнала, так и временем переключения. Эти три вида, как упоминалось выше, представляют собой движение

стенки доменов, неоднородное вращение и однородное вращение. Предполагают, что переключение за счет движения стенок доменов происходит в случае, если управляющие поля не достигают критических значений. Для него характерны скорости переключения, сравнимые со скоростями для обычных ферритов. Скорости переключения за счет неоднородного вращения лежат между наносекундными скоростями, обусловленными однородным вращением, и микросекундными скоростями, обусловленными движением стенок доменов. Этот процесс правильнее было бы связать с механизмом дсменообразования, а не с движением стенок доменов. Предположим, что перемагничивание происходит лабиринтным<sup>х)</sup> распространением, вызванным как дисперсией поля  $H_K$ , так и дисперсией ориентации в направлении оси легкого намагничивания. Сначала поворачивающиеся области с малым значением  $H_K$  магнитостатически взаимодействуют с областями с высоким значением  $H_K$  и таким образом увеличивают порог вращения. Затем происходит образование лабиринтов и их распространение. Если амплитуда управляющего поля достигает величины, которая превышает величину, необходимую для сообщения верхнего предельного вращения в пленке, то неоднородное вращение переходит в однородное.

На рис. УП.29 указаны соотношения между различными видами переключения и величиной и направлением управляющих полей.

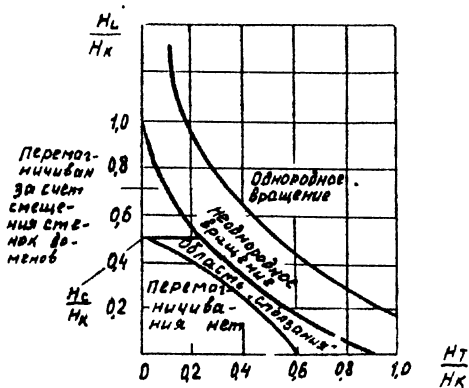


Рис. УП.29. Виды перемагничивания

х) Лабиринты – области противоположной намагниченности, пронизывающие пленку.

В результате незначительного количества материала пленки, подвергающегося перемагничиванию как элемент памяти и определяющего в основном размерами шин управления, а также короткого времени перемагничивания, энергия перемагничивания пленки является очень малой. Так, для перемагничивания пленки толщиной 500 Å, имеющей форму круга диаметром 1 мм, требуется энергия примерно  $10^{-11}$  вт.

Именно наличие одноосной анизотропии и возможность быстрого перемагничивания в сравнительно небольших полях являются определяющими факторами при использовании ТМП как элементов памяти, хотя в некоторых применениях носители информации имеют изотропные свойства.

Следует отметить, что геометрия ТМП позволяет готовить компактные узлы с высокой плотностью элементов за один технологический цикл, что удовлетворяет требованиям микроминиатюризации и обеспечивает значительное снижение стоимости ЗУ в целом.

Данные особенности свидетельствуют о преимуществе магнитопленочных носителей информации по сравнению с другими магнитными элементами при построении быстродействующих микроэлектронных ЗУ.

Кроме этого, запоминающие элементы на ТМП обладают тремя свойствами, которые существенно расширяют возможности их использования:

1) Магнитные переключющие поля необязательно должны быть приложены только в одном направлении;

2) Благодаря плоской геометрии естественно применять технику печатного монтажа для получения системы шин (проводников) управления;

3) Отдельный запоминающий элемент может состоять из двух или более слоев магнитного материала, что дает возможность получения специфических или заданных запоминающих свойств (например, построение элементов с неразрушающим считыванием).

Все это обеспечивает разработку магнитопленочных ЗУ с различными схемами построения и организацией их работы.

Магнитопленочные носители информации, как элементы ЗУ, характеризуются совокупностью физических, магнитных и электри-

ческих (импульсных) параметров. Магнитные параметры являются характеристикой самого носителя информации, т.е. характеризуют поведение магнитной пленки при приложении различного рода возбуждающего поля. Одним из основных магнитных параметров является пороговое поле, которое определяет величину внешнего магнитного поля, необходимого для переключения пленки.

В зависимости от механизма переключения пленки различают два пороговых поля: коэрцитивную силу  $H_c$ , характеризующую процесс смещения границ доменов и являющуюся пороговой характеристикой в направлении ОЛН, и поле анизотропии  $H_k$  - пороговая характеристика в направлении ОТН, характеризующая процесс вращательного переключения. К основным магнитным параметрам ТМП относятся также амплитудная  $\Delta H_k$  и угловая  $\alpha$  дисперсия анизотропии, скос оси легкого намагничивания  $\beta$ , намагниченность насыщения, магнитострикция, а также толщина магнитной пленки  $\delta$ . Эти параметры в значительной степени влияют на работоспособность пленочных запоминающих элементов, особенно при работе пленки в режиме со считыванием без разрушения информации.

Таким образом, по магнитным параметрам, во-первых, судят о порогах перемагничивания пленки, что позволяет в первом приближении определить амплитуды управляющих токов, и, во-вторых, определяют пригодность данной партии пленок.

Электрические (импульсные) параметры магнитопленочных носителей характеризуют их работоспособность в ЗУ и определяют требования к электронике управления. В свою очередь импульсные параметры зависят как от свойств магнитных пленок, так и от формы носителя информации и конструкции матрицы, в которой они используются.

К импульсным параметрам относятся: номинальный адресный ток; предельно допустимые значения разрядного тока и его номинальное значение; величина выходного сигнала. Импульсными характеристиками является также устойчивость магнитной пленки к сползанию и разрушению информации.

К данной совокупности параметров в каждом конкретном случае предъявляются определенные требования, которые обуславливают применение магнитопленочных носителей в конкретной разработке ЗУ. Так, при использовании магнитопленочных элементов, в которых

переключение потока магнитной индукции происходит обычно под действием ортогональных полей, параллельных осям анизотропии, поле анизотропии определяет величину тока адреса, а  $H_c$  - величину разрядного тока. Исходя из требований к микроэлектронным ЗУ, величина  $H_K$  должна быть по возможности минимальной, в то время как значение  $H_c$  должно быть максимальным, что определяет устойчивость хранимой информации при воздействии разрядных токов в полувывбранных элементах.

Использование плоских ферромагнитных пленок в качестве носителей информации является одним из наиболее старых способов получения интегральных матриц для ЗУ. В настоящее время такие пленки применяются прежде всего в ЗУ высокого быстродействия и малой емкости, т.е. в управляющих или сверхоперативных ЗУ, хотя имеются разработки оперативных ЗУ емкостью в 16 тыс. 52 разрядных слова циклом 500 нсек.

В ЗУ на плоских пленках в качестве носителя информации, как правило, используются дискретные прямоугольные пятна, нанесенные на стеклянную или алюминиевую подложку. Это объясняется тем, что по сравнению с использовавшимися на ранней стадии развития круглыми пятнами прямоугольные допускают более компактное расположение и более просты в изготовлении. Применение сплошного магнитного покрытия недопустимо из-за большого взаимодействия между участками. Отношение сторон прямоугольников пятен составляет от 0,75 до 1, хотя находят применение и более удлинненные пятна. В таких ЗУ используются пленки с хорошо выраженной анизотропией с направлением ОЛН вдоль длинной стороны пятен.

В ЗУ обычного типа адресные (числовые) линии проходят параллельно ОЛН; направление магнитного потока, сцепленного с этими линиями, совпадает с направлением трудного намагничивания (ОТН). Разрядные линии проходят параллельно трудной оси, а их магнитное поле направлено по легкой оси (рис.УП.30). Поле числовых линий поворачивает векторы намагниченности во всех запоминающих элементах слова в направлении ОТН, при снятии этого поля они стремятся быстро вернуться в исходное положение. Относительно небольшое разрядное поле поворачивает эти векторы в состояния, соответствующие записи кода "1" или "0".



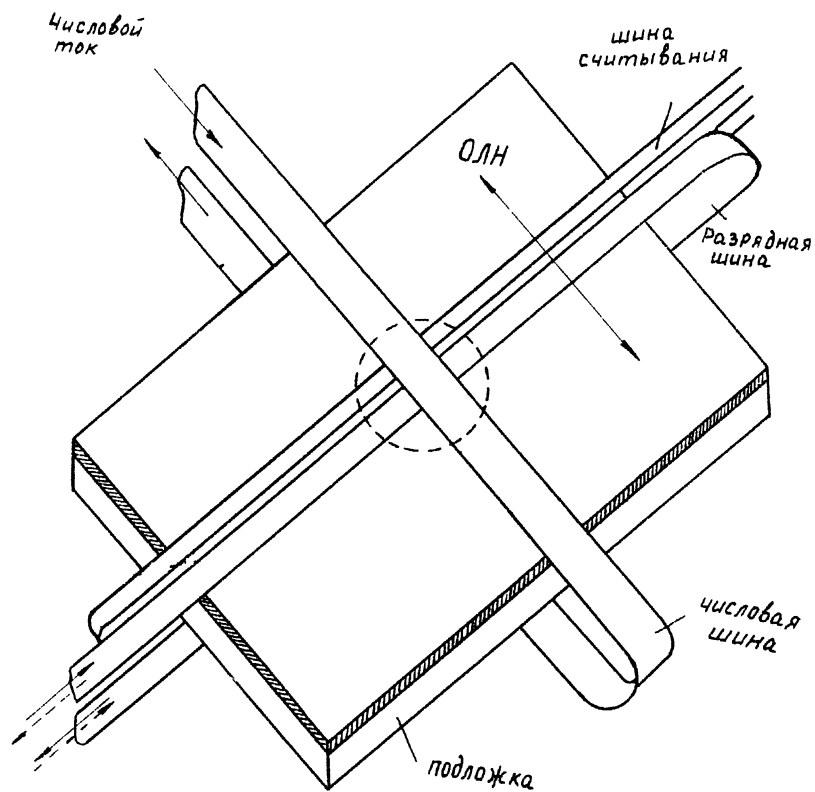


Рис. УП.30. Запоминающий элемент на плоской ТМЦ

Так как поток плоского магнитопленочного элемента не замкнут, выходной сигнал при считывании получается малым (вектор потока только поворачивается, а не переключается), что является недостатком плоских ТМП. Другим недостатком незамкнутого потока является тенденция к сползанию, или размагничиванию, на краях пятна. Из-за этого большое число импульсов токов разрушения может разрушить информацию, записанную в отдельном элементе. Для ограничения последствий размагничивания (сползания) уменьшают толщину пленки, но это приводит к уменьшению выходного сигнала. Следовательно, при определении толщины пленки требуется найти компромиссное решение, позволяющее получить достаточный выходной сигнал и минимальное сползание.

При изготовлении ЗУ на тонкопленочных элементах возникает ряд проблем, связанных с такими явлениями, как разброс направлений ОЛН от пятна к пятну в пределах матрицы, необходимость выделения выходного сигнала на фоне помех от импульсов тока выборки большой амплитуды, магнитострикция и выход годных матриц. Все это в значительной степени тормозит построение больших блоков оперативной памяти с малым временем обращения. Несмотря на эти трудности, носители информации на плоских ферромагнитных пленках успешно находят применение в быстродействующих ЗУ сравнительно небольшой емкости и постепенно вытесняют носители на ферритовых сердечниках, ранее применявшихся для этих целей. Основной тенденцией разработок тонкопленочных ЗУ является получение запоминающих элементов с конфигурациями магнитопроводов, обеспечивающих прохождение магнитного потока почти полностью в магнитном материале. Замыкание пути для магнитного потока пленочных пятен дает возможность:

- повысить устойчивость элементов к разрушающему воздействию внешних магнитных полей;

- снизить токи управления;

- получить элементы со считыванием без разрушения информации.

Уже в настоящее время разработаны оперативные магнитопленочные ЗУ, содержащие до  $0.1 + 1$  млн. бит, с циклом обращения 500 нсек при токах выборки 300-500 ма. Кроме того, такие ЗУ характеризуются большой компактностью (до 400 бит/см<sup>2</sup>), малой

мощностью рассеяния (менее 1 мвт/бит) и сравнительно небольшой стоимостью, что вполне удовлетворяет требования оперативной памяти современных ЭЦМ.

Одним из эффективных способов преодоления недостатка тонкопленочных ЗУ, связанного с незамкнутым магнитопроводом носителей информации, является использование цилиндрических магнитных пленок (ЦМП). В этом случае магнитная пленка наносится на цилиндрическую (проволочную) подложку диаметром  $0,125 \pm 0,3$  мм. Обычно в качестве подложки используется проволока из меднобериллиевой бронзы, хотя в некоторых разработках применяется фосфористая бронза и медный микропровод в стеклянной изоляции; ранее применявшиеся стеклянные трубки в последние годы не используются.

Запоминающий элемент на цилиндрическом магнитопленочном носителе информации образуется в месте пересечения проволоки с магнитным покрытием и элемента управления какого-либо вида. В качестве элемента управления наибольшее распространение получили соленоидальные обмотки и полосковые линии. Однако соленоид с одним или несколькими круговыми витками применяется редко. Широко распространение получила модификация соленоида, так называемая "восьмерка", образующаяся при переплетении проволок с магнитным покрытием и провода, образующего элемент управления, что реализуется гораздо технологичнее.

Положение ОЛН, наведенной в пленке в процессе ее изготовления, определяет тип запоминающего элемента и режим его работы. В ЗУ нашли применение ЦМП с аксиальной и круговой анизотропией (рис. УП.31). При аксиальном расположении ОЛН, когда легкая ось расположена параллельно оси подложки, информация записывается в направлении намагниченности вдоль данной оси, а сама подложка служит адресной шиной.

Обмотка управления, идущая под прямым углом к цилиндрической пленке, служит разрядной шиной и проводником считывания. При данном режиме работы магнитная цепь в состоянии остаточной намагниченности не замкнута. В этом случае режим работы ЦФМП сходен с режимом плоских пленок.

В случае, когда легкая ось пленки направлена по окружности,

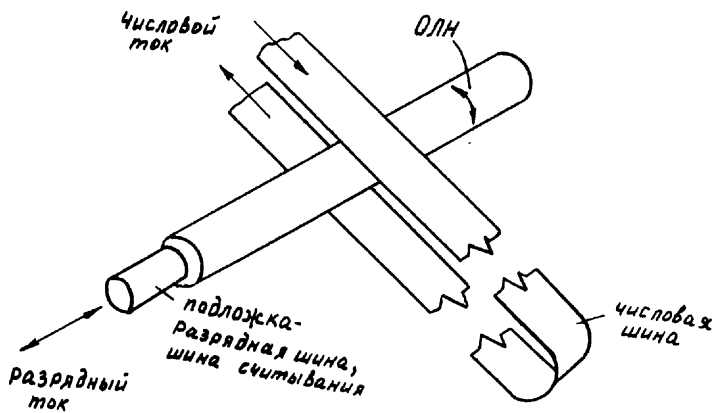
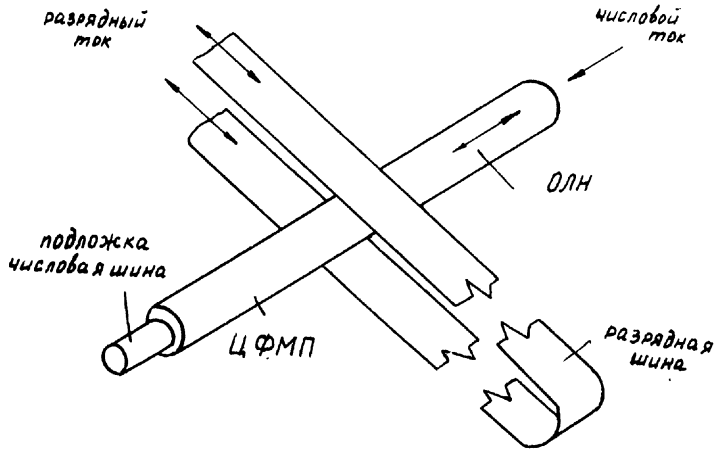


Рис. УП.31. Запоминающие элементы на ЦФМП

информация записывается в направлении намагниченности по окружности ЦФМП. При данном режиме работы магнитная цепь замкнута, в результате чего размагничивающее поле отсутствует. Числовой (адресной) шиной при этом является обмотка управления, а разрядной шиной и проводником считывания служит подложка. При работе с такой пленкой используется считывание аксиальным полем и запись с помощью кругового поля. Для считывания информации импульс тока подается в обмотку управления, возникающее при этом осевое поле устанавливает намагниченность по трудной оси; при этом в разрядной шине наводится сигнал. Полярность сигнала зависит от первоначального направления намагниченности пленки. Для записи информации используется небольшое круговое поле, которое действует одновременно с аксиальным полем и после его снятия создается импульсом разрядного тока.

Существенная разница между этими двумя режимами заключается в том, что в ЦМП с круговой ОЛН магнитная цепь в состоянии остаточной намагниченности замкнута и открыта при считывании, а в аксиальных пленках наблюдаются обратные явления. Именно поэтому ЗУ на пленках с круговой ОЛН работают на малых разрядных токах (десятки миллиампер) и отличаются высокой плотностью расположения информации. ЗУ на пленках с аксиальной анизотропией работают приблизительно на одинаковых токах ( $0,2 + 0,4a$ ), плотность элементов у этих ЗУ почти в два раза меньше, чем у ранее названных. Вследствие этого, в последние годы элементы типа "род" (с аксиальной анизотропией) не нашли широкого распространения, в то время как большинство фирм, занимающихся разработкой и изготовлением ЗУ на ЦФМП, используют пленки с круговой ОЛН.

Цилиндрические магнитопленочные носители информации с круговой анизотропией (и построенные на них запоминающие элементы) обладают рядом существенных достоинств, что выгодно отличает их от других носителей информации, в том числе от плоских ферромагнитных пленок и ЦМП с аксиальной анизотропией:

1. ЦМП с круговой анизотропией обладают замкнутым магнитопроводом, что обуславливает выбор толщины пленки без учета размагничивающего фактора. Это позволяет получать пленки толщиной

до 1 мк и тем самым значительно повысить выходной сигнал считывания (на порядок по сравнению с плоскими пленками).

2. Цилиндрическая подложка используется как одна из шин управления; в случае пленок с круговой ОЛН подложка является разрядной шиной. Это, во-первых, приводит к значительному уменьшению разрядного тока и увеличению выходного сигнала из-за непосредственной близости пленки к проволоке и, во-вторых, упрощает решение задачи фиксации обмоток управления относительно элементов при изготовлении накопителей.

3. Изготовление и контроль ЦМП представляет собой непрерывный, а поэтому и недорогой технологический процесс.

4. Магнитные потоки переключаются по замкнутому контуру, что снижает чувствительность к крип-эффекту.

5. Использование многослойных обмоток управления позволяет значительно снизить величину адресного тока; для этих целей применяются формирователи в микросхемном исполнении.

6. Процесс изготовления обмоток управления поддается автоматизации, что удешевляет производство ЗУ в целом.

7. Имеется возможность получения элементов как со считыванием с разрушением информации, так и без разрушения. Определяющим при этом является толщина магнитной пленки.

Кроме того, ЦМП, как и плоские, характеризуются высоким быстродействием, малой мощностью управления и высокой плотностью размещения информации (до 8 бит на каждый сантиметр длины или 230 бит /см<sup>2</sup>).

Благодаря этим преимуществам ЗУ на ЦМП могут вытеснить во многих случаях из применения ЗУ на плоских пленках, особенно при построении быстродействующих ЗУ объемом в сотни миллионов бит. Этот вывод можно оспаривать только для такой области использования пленок, как сверхоперативные ЗУ максимального быстродействия и небольшого объема, для которых характеристики плоских пленок относительно лучше. Безусловно, ЦМП как носители информации являются основным претендентом на место, которое в настоящее время занимают ферритовые сердечники.

Наряду с применением в ЗУ, ТМП используются для построения логических и линейных схем.

### Магнитное усиление и логические схемы

Выше указывалось, что если напряженность поля превосходит  $H_k$  и направление его совпадает с направлением оси трудного намагничивания, то изменение магнитного потока происходит в момент, когда вектор намагниченности поворачивается на  $90^\circ$ . Если это поле выключается, то первоначальная однодоменная структура пленки разбивается на множество мелких доменов, одна половина которых намагничена в одном направлении, а другая - в противоположном, совпадающем с осью легкого намагничивания. Небольшое поле, приложенное вдоль оси намагничивания (фактически лишь несколько превышающее перекося), препятствует такому дроблению и устанавливает вектор намагниченности строго в определенном направлении, зависящем от направления поля. Достаточным для этого является поле напряженностью 0,3 э. Этот процесс можно осуществлять путем воздействия на элемент поля, полученного от другого тонкопленочного элемента во время его перемагничивания, происходящего в течение нескольких наносекунд. Для этого два пленочных элемента соединяются полосовой шиной, причем одна пленка действует как управляющий, а другая - как управляемый элемент (рис.УП.32). Шина связи проходит параллельно направлению оси трудного намагничивания и считывает изменение потока вдоль оси легкого намагничивания. В зависимости от состояния управляющей пленки в шине связи индуцируется положительное или отрицательное напряжение, а направление намагниченности в управляемой пленке определяется состоянием управляющей пленки. Так как пленки являются двунаправленными, то для передачи информации в заданном направлении необходимо использовать трехфазную систему импульсов.

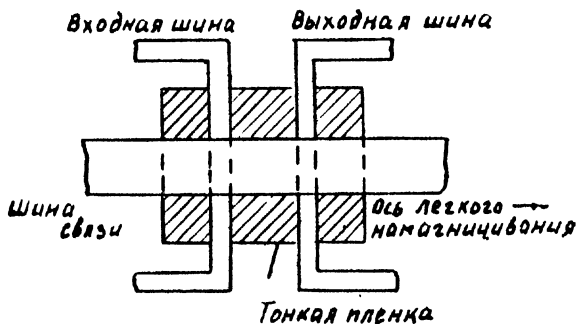
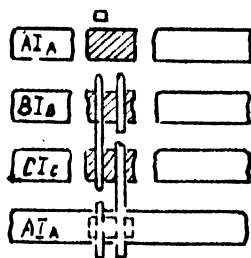


Рис. УП.32. Тонкопленочный логический элемент

а



б

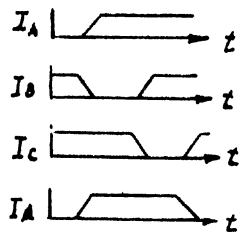


Рис. УП.33. Схема соединения сдвигающего регистра, выполненного на тонких пленках:

а - схема регистра на ТМП; б - временная диаграмма работы регистра



Для обеспечения передачи информации поле, созданное шиной связи в направлении оси легкого намагничивания, должно быть достаточно сильным, чтобы повернуть вектор намагниченности. На рис. УП.33 показана схема соединений, которую можно применять для получения сдвигающего регистра, и временная диаграмма. Ток  $I_B$  производит поворот вектора намагниченности в пленке В в направлении трудного намагничивания. При включении тока  $I_A$  выходной ток  $I_t$  в шине связи имеет положительное или отрицательное направление в зависимости от состояния пленки А. Но при включении тока  $I_A$  происходит выключение тока  $I_B$ , и направление намагниченности пленки В изменяется, причем поворот вектора может происходить как по часовой стрелке, так и против нее. Пленка С остается намагниченной в трудном направлении. Если снова включается ток  $I_B$ , то ток  $I_C$  выключается и информация передается в  $I_C$ , при этом пленка А остается намагниченной в трудном направлении.

Для того чтобы получить необходимые для работы управляющие токи, напряжения переключения должны быть большими. В свою очередь, большие токи требуют использования импульсов с малым временем нарастания, что обеспечивает быстрый процесс переключения. Импеданс шин связи необходимо выбирать сравнительно малым. Это позволяет получать большие величины токов, достаточные для того, чтобы осуществить поворот. В принципе логические функции можно создавать на основе мажоритарной логики, присоединяя к данному элементу несколько входов. Однако при этом виде работы становится довольно трудным переключение всей пленки, так как управляющая обмотка ограничена частью поверхности пленки. Определенные трудности представляет также достижение малого размера двоичного элемента, поскольку уменьшение размера вызывает уменьшение выходного напряжения.

Был разработан сдвигающий регистр, использующий эффект смещения стенок в тонких пленках. Работа его основана на явлении, заключающемся в том, что область противоположной намагниченности в тонкой пленке создает размагничивающее поле в участках, приде-

гающих к пленке. Так как за счет этого размагничивающего поля происходит усиление внешнего поля, то для перемагничивания оказывается достаточным сравнительно слабое поле. Обычно напряженность этого поля меньше напряженности, необходимой для перемагничивания одного домена. Если соответствующая обмотка индуцирует магнитное поле, которое увеличивает противоположную намагниченность на одном краю области и препятствует такому увеличению на другом краю, то в результате происходит перемещение области противоположной намагниченности вдоль пленки к одному из краев, с которого она может быть считана с помощью съемной петли сигнала.

Значительный интерес представляет применение тонких пленок в параметронах, принцип запоминания информации в которых основан на фиксации фазы сигнала. Для этого в качестве нелинейной индуктивности, связанной с резонансным контуром, можно использовать магнитный элемент, который возбуждается генератором подкачки частотой  $\omega$  и генерирует колебания частотой  $\omega/2$ . Фаза этих колебаний может принимать одно из двух возможных значений.

В качестве такого нелинейного элемента до последнего времени применялись ферритовые сердечники, однако недавно фирма ТДК (Япония) заменила их тонкопленочными элементами, один из которых приводится на рис. УП.34.

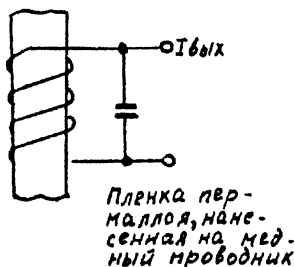


Рис. УП.34. Параметрон фирмы ТДК (Япония)

С помощью таких элементов можно значительно увеличить скорость переключения и уменьшить рассеиваемую мощность. Элемент и связанная с ним схема выполнены из магнитной пленки, на которую воз-

действуют постоянное поле смещения и поле подкачки частотой  $\omega$ , направленное вдоль оси легкого намагничивания. Сигнальная обмотка расположена вдоль оси легкого намагничивания пленки и соединена с конденсатором. Если в данной фазе начинается генерирование высших гармоник, то этот процесс будет непрерывно продолжаться до тех пор, пока не изменится постоянное поле смещения или не выключится поле подкачки. При отсутствии внешнего воздействия фаза высших гармоник будет случайной, однако если такое воздействие есть, то их фазой можно управлять. Это воздействие нетрудно осуществить с помощью поля сигнала, поступающего от другой тонкой пленки, и таким образом можно легко передать информацию. В этом случае логические операции выполняются по мажоритарному принципу. Изменяя направление витков управляющей обмотки, можно легко получать необходимую фазу колебаний для любого элемента.

Такие приборы удовлетворительно работали при частоте подкачки, равной 20 Мгц. Очень важное преимущество параметрона, особенно в тонкопленочном исполнении, заключается в его автономности, что позволяет (по крайней мере, теоретически) выполнять все функции логики и усиления с помощью одного и того же элемента. Основной недостаток параметрона определяется зависимостью скорости передачи информации двоичным элементом от частоты подкачки, величины которых могут отличаться в отношении 10 : 100. Так, например, для работы параметрона на частоте 1 Мгц необходима частота подкачки, равная 50 Мгц.

Следует отметить, что основное применение магнитных пленок связано с запоминающими устройствами цифровых вычислительных машин. Наиболее подходящим для практического применения является ортогональный режим работы, который при высоких быстродействиях обеспечивает максимальные допуски на характеристики пленок.

Успешное применение ТМП в конкретном изделии зависит от технологического процесса их изготовления.

Необходимость разработки технологии, обеспечивающей изготовление тонкопленочных магнитных элементов с однородными и воспро-

изводимыми свойствами, заставляет искать наиболее эффективный метод изготовления ТМП при непрерывном контроле их основных параметров.

Вследствие малой толщины и жестких требований, предъявляемых к элементам на ТМП, разработка такой технологии является довольно сложной задачей, требует высокой технологической культуры, жесткой стабилизации технологических параметров, специального технологического оборудования.

#### Методы получения магнитных пленок

Основными методами получения магнитных пленок являются следующие:

- термическое испарение в вакууме;
- электролитическое осаждение;
- катодное распыление;
- химическое осаждение;
- пиролиз.

Наибольшее применение получили первых три метода.

Термическое испарение в вакууме. Метод основан на испарении пермаллового сплава в вакууме с последующей конденсацией его на поверхность подогретой металлической или стеклянной подложки.

Метод вакуумного напыления в основном применяется для получения плоских магнитных пленок толщиной от нескольких сот до нескольких тысяч ангстрем.

Однако при вакуумном напылении магнитных пленок встречается ряд технологических трудностей, которые в значительной степени сказываются на магнитных параметрах получаемых пленок и их воспроизводимости.

Основными факторами, влияющими на технологический процесс и, следовательно, на свойства ТМП, являются:

- состав и чистота исходного материала;
- конструкция и материал испарителя;
- однородность ориентирующего магнитного поля;
- скорость напыления;
- поверхность и температура подложки;
- расстояние от испарителя к подложке;
- угол осаждения частиц пара.

В процессе испарения исходного сплава (в данном случае пермаллоя) происходит его обогащение менее летучим компонентом (никелем), а осаждаемые пленки содержат большее количество компонента с более высокой упругостью пара (железа). Вследствие этого при вакуумном напылении наблюдается отличие состава пленок от состава исходного материала. Так, при составе исходного материала в начале испарения 16,6%  $Fe$  и 83,4%  $Ni$  и в конце испарения 16,4%  $Fe$  и 83,6%  $Ni$  полученные пленки имели средний состав 18,5%  $Fe$  и 81,5%  $Ni$ .

Степень изменения концентрации компонентов связана со скоростью испарения, что в значительной степени определяется конструкцией испарителя.

Для испарения железоникелевых сплавов наиболее часто используются испарители в виде нитей накала или тигля, причем для получения необходимой температуры испарения применяются омический нагрев, индукционный нагрев токами высокой частоты и нагрев электронной бомбардировкой.

Поскольку испарение с нитевидных испарителей осуществляется за счет пропускания через них электрического тока, то вследствие электропроводности и достаточной механической прочности выбор материала для нитей накала ограничен. Исследования показали, что для испарения пермалловых сплавов наилучшим материалом при изготовлении нитевидного нагрева является нерекристаллизованная вольфрамовая проволока. Однако применение нитевидных нагревателей нежелательно из-за малого количества испаряемого материала, помещаемого в испарителе, а также из-за возможности загрязнения

подложки и пленки материалом нагревателя или продуктами реакции остаточных газов с этим материалом.

Эти недостатки в определенной степени устраняются при испарении из тиглей, для изготовления которых возможно использование высокотемпературной керамики с малой упругостью пара при высоких температурах. Однако материал тигля в значительной степени влияет на скорость испарения, а следовательно, и на свойства получаемых магнитных пленок.

С целью получения магнитных пленок с нулевой магнитострикцией и минимальными значениями поля анизотропии в зависимости от материала тигля требуется различный состав испаряемого пермаллоя: для тигля из окиси алюминия - 83% *Ni* и 17% *Fe* ; из окиси кремния - 81,5% *Ni* и 18,5% *Fe* ; из окиси циркония - 82,5% *Ni* и 17,5% *Fe*.

Влияние материала тигля на магнитные параметры пленок является существенным недостатком при испарении из тиглей. Кроме того, при использовании тиглей трудно регулировать режим испарения ввиду значительной тепловой инерционности керамических материалов.

Наилучшим способом нагрева пермаллового сплава является электронная бомбардировка. Преимуществом этого метода является минимальное загрязнение пленки, поскольку испарение сплава производится из лунки в массивном стержне из пермаллового сплава. Электронная бомбардировка позволяет точно регулировать время нахождения испаряемого материала в расплавленном состоянии и скорость испарения. При электронной бомбардировке производится дополнительная очистка поверхности подложки ионами испаряемого материала за счет удаления загрязнений при бомбардировке, что более эффективно по сравнению с очисткой ионами газа. При этом улучшается сцепление поверхности подложки и пленки.

Во избежание загрязнения осажденных пленок, чистота исходного материала должна быть по возможности максимальной, а наличие остаточных газов в камере должно быть сведено к минимуму.

При напылении остаточные газы захватываются атомами никеля

и железа и вместе конденсируются на подложку, что приводит к окислению пленки и увеличению количества примесей в напыленном слое. Это приводит также к увеличению пористости пленки и шероховатости ее поверхности. Степень загрязнения зависит от давления, состава остаточных газов и скорости испарения.

Глубина вакуума  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  мм рт.ст. считается достаточной для получения магнитных пленок с удовлетворительными параметрами (при скорости конденсации больше чем  $50 \text{ \AA}/\text{сек}$ ). При этом отношение числа атомов газа, бомбардирующих подложку, к числу атомов металла будет малым, а следовательно, будет малым и количество поглощенного пленкой газа.

Однако даже незначительное наличие остаточных газов сказывается на свойствах магнитных пленок.

Так, присутствие 0,001% кислорода в магнитных пленках может быть причиной появления одноосной анизотропии.

Так как скорость реакции газа с пленкой в процессе напыления зависит от парциального давления газа в системе, то пленки, осаждаемые в более высоком вакууме, будут содержать меньшее количество газа при сохранении всех остальных параметров. Поэтому для получения пленок высокой чистоты в вакуумных системах для напыления их стремятся создавать еще более высокий вакуум ( $10^{-6}$  +  $10^{-8}$  мм рт.ст.). Пленки, напыленные в вакууме  $10^{-9}$  +  $10^{-10}$  мм рт.ст. содержат меньшее количество примесей, их магнитные свойства приближаются к параметрам массивного ферромагнетика. Повышение вакуума улучшает также однородность пленок. Скорость напыления оказывает прямое влияние на структуру и свойства пленок. Скорость напыления для предотвращения неконтролируемого перегрева подложки от теплового излучения испарителя и уменьшения поглощения газа осаждаемой пленкой должна быть высокой. Лучшие результаты получаются при скоростях напыления, близких к  $100 \text{ \AA}/\text{сек}$ , поскольку пленки при этом получаются более однородными, улучшается их структура, а также стабильность во времени. С увеличением скорости напыления уменьшается амплитудная дисперсия поля анизотропии. Однако увеличение скорости напыления более  $100 \text{ \AA}/\text{сек}$  нежелательно, так как при этой скорости напыления в пленке возникают напряжения, следствием которых являются увеличение дисперсии легкой оси и старение.

Магнитные свойства пленок в значительной степени зависят от материала и качества поверхности подложки. Лучшие результаты получены при осаждении в вакууме на подложке из покровных стекол, алюминия и меди с различным подслоем (монооксид и оксид кремния, кремний-органический лак и др.).

Температура подложки также значительно влияет на структуру пленки, величину и дисперсию индуцированной анизотропии. С увеличением температуры подложки увеличивается подвижность конденсирующихся атомов на поверхности, что приводит к увеличению размеров кристаллов и уменьшению числа дефектов решетки.

При увеличении температуры подложки величина поля анизотропии постепенно уменьшается, а амплитудная дисперсия поля анизотропии минимальная при температуре подложки 300–350°C. Данный диапазон температур считается оптимальным при изготовлении ТМП вакуумным напылением.

Дальнейшее увеличение температуры подложки приводит к резкому увеличению коэрцитивной силы, дисперсии поля анизотропии и к увеличению внутренних напряжений.

Расстояние от испарителя до подложки определяется размерами подложки для сведения к минимуму угла падения пара на площадь. В зависимости от конструкции испарителей и размеров подложки это расстояние обычно равно 250–350 мм.

Для создания вакуума  $10^{-5}$  мм рт.ст. и выше применяются в основном диффузионные и ионно-сорбционные насосы. Но такие насосы обладают селективностью по отношению к различным газам. Применение молекулярных насосов и криогенных методов откачки с использованием металлических уплотнений позволяет значительно понизить остаточное давление при изготовлении магнитных пленок.

Для получения магнитных пленок с заданными параметрами необходимо иметь возможность контролировать и изменять технологические параметры с большой точностью.

Для улучшения воспроизводимости магнитных свойств пленок и повышения производительности желательно производить осаждение на большое количество подложек в одном технологическом цикле.

Поскольку при использовании стандартного вакуума оборудования трудно удовлетворить рассмотренной совокупности технологических требований, то для напыления ТМП приходится проектировать



специальные вакуумные установки. Примером конкретной конструкции такой установки, позволяющей решить проблему получения однородных магнитных пленок с воспроизводимыми параметрами, может служить вакуумная установка, разработанная в ИК АН УССР. На этой установке за один вакуумный цикл можно изготовить магнитные пленки на 50 подложках размером  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  при автоматическом поддержании заданного режима испарения и контроле за толщиной получаемых пленок.

Основные свойства ТМП для микроэлектронных запоминающих устройств, полученных вакуумным напылением, в зависимости от условий получения приведены в табл.УП.18.

Электролитическое осаждение заключается в том, что магнитный сплав типа "пермаллой" образуется в результате совместного разряда ионов никеля и железа, находящихся в электролите, на токопроводящей подложке.

Обычно электролит представляет собой водный раствор простых солей этих металлов с различными органическими и неорганическими добавками. Поскольку ТМП должны обладать анизотропными свойствами, то условия осаждения железоникелевого сплава отличаются от обычных условий электролиза наличием ориентирующего магнитного поля.

Так как потенциалы выделения металлов никеля и железа достаточно близки, то, регулируя относительную и абсолютную концентрацию солей этих металлов в электролите, а также режим электролиза, можно изменять состав сплава в широких пределах. Полученный сплав представляет собой твердый раствор. В случае осаждения пермаллового сплава кристаллическая решетка представляет собой решетку никеля с замещенными атомами железа. Параметры решетки увеличены в связи с внедрением в нее водорода, который адсорбируется в процессе электролиза. Это приводит к тому, что физико-химические свойства электроосажденных магнитных пленок отличаются от свойств массивного ферромагнетика.

В отличие от других методов электролитический метод изготовления тонких магнитных пленок не требует сложной и дорогой аппаратуры, является более производительным и позволяет получать

Т а б л и ц а УЛ.18

Основные свойства тонких магнитных пленок, полученных вакуумным напылением, в зависимости от условий получения

испаряемый материал	Технологические параметры				Свойства магнитных пленок			
	испаритель	глубина вакуума мм рт.ст.	скорость напыления А/сек.	подложка	температура подложки, °С	размер, толщина, мм	Нк, э	магнитные параметры Нс, э дисперсия
Пермаллой 80%	Тигель из BeO	$10^{-5}$ - $7 \cdot 10^{-6}$	50	Стекло	340	40x40 (пленка 2x1 см)	1200	5,5 3,5 8°
	Тигель	$10^{-5}$	-	Стекло	350	50x50	1000	2,5 2,5 7°
	-	-	-	Стекло	-	Пленка 0,7x1,3	850	4 2,5 6°

пленки с необходимыми магнитными характеристиками. Установлено, что магнитоупругая константа связи, которая приводит к дисперсии поля анизотропии, имеет в данном случае меньшие значения по сравнению с напыленными пленками такого же состава.

Методом электролиза в зависимости от геометрии подложки получают плоские и цилиндрические пленки.

В настоящее время наиболее широкое применение нашел сульфатный электролит на основе сернокислых солей никеля и железа, хотя применяют также сульфаминовые, сульфатхлоридные, пирофосфатные и другие электролиты.

Кроме основных компонентов, в электролит вводят различные органические и неорганические добавки, как борная кислота, сахарин, сернокислый магний, лаурилсульфат натрия, сегнетова соль, лимонная кислота и другие, которые способствуют образованию сплава с необходимыми физико-механическими и магнитными свойствами.

Влияние каждого компонента на кинетику электродных процессов носит довольно сложный характер и качество получаемых пленок во многом зависит от правильного соотношения их в электролите.

Для получения пленок с нулевой магнитострикцией (81%  $Ni$  и 19%  $Fe$ ) содержание солей никеля и железа, а также добавок должно быть выдержано с особой степенью точности ( $\pm 2\%$ ), поскольку незначительное изменение процентного состава электролита ведет к получению осадков с различной степенью магнитострикции.

Основными технологическими параметрами, влияющими на свойства ТМП, которые также необходимо выдерживать с большой точностью, являются плотность тока, температура, pH электролита и время осаждения.

От величины плотности тока зависят состав, структура сплава, внутренние напряжения пленок и, как следствие этого, коэрцитивная сила и прямоугольность петли гистерезиса. Диапазон плотностей тока, применяемых различными исследователями, достаточно широк и зависит в каждом конкретном случае от состава электролита и условий электролиза. Как правило, интенсивное перемешивание и подогрев применяются при больших плотностях тока, порядка несколь-

ких десятков миллиампер на квадратный сантиметр. В случае осаждения пленок в равновесных стационарных условиях плотности тока невелики и составляют обычно 5-10 ма/см<sup>2</sup>.

Перемешивание электролита влияет на состав осажденного сплава благодаря уменьшению толщины и изменению соотношения ионов в прикатодном слое, который обычно отличается от объемного, что позволяет снизить градиент состава сплава по толщине. Влияние перемешивания более сильно проявляется в электролитах с низким содержанием солей основных компонентов.

Поскольку, как было отмечено выше, допустимые режимы изготовления магнитных пленок с заданными свойствами очень узки, то многими исследователями делались попытки расширить допуски на технологические параметры за счет введения в сплав различных добавок, например, кобальта, меди, фосфора, мышьяка и др.

Присутствие кобальта в электролите значительно расширяет область допусков, а тройной сплав  $Ni - Fe - Co$  характеризуется приблизительно нулевой магнитострикцией и повышенными значениями коэрцитивной силы и поля анизотропии.

Пермаллоевые пленки, содержащие 1-2% фосфора, имеют ряд особенностей. Увеличение коэрцитивной силы с уменьшением толщины пленок  $Ni - Fe - P$  происходит в значительно меньшей степени, чем в пленках  $Ni - Fe$ , что объясняется более равномерным химическим составом по толщине (особенно в пределах до 500 Å). Переключение пленок  $Ni - Fe - P$  происходит значительно быстрее при одинаковых напряженностях переключающих полей по сравнению с пленками  $Ni - Fe$ .

Введение мышьяка в осадок дает почти тот же эффект, что и при введении фосфора.

Введение меди в электролит также позволяет расширить допуски на технологические параметры. Сплав  $Ni - Fe - Cu$  (7,5% Си) характеризуется нулевой магнитострикцией и пониженным значением коэрцитивной силы.

Основной проблемой при получении магнитных пленок является обеспечение однородности сплава по толщине и поверхности подложки. Неоднородность особенно проявляется при малой толщине сплава,

так как в начале процесса электролиза в значительной степени преобладает осаждение железа.

Уменьшение градиента состава может быть получено либо при отсутствии перемешивания и очень малых плотностях тока или при интенсивном перемешивании и большой плотности тока. Попытки применить импульсное питание электролизера не дали положительных результатов, тогда как в условиях потенциостатического режима удалось устранить градиент лишь при толщине пленки более  $1000 \text{ \AA}$ .

Большой интерес представляет получение магнитных пленок из электролита с добавкой тиомочевины и таким же соотношением содержания железа и никеля, что и в сплаве  $Ni - Fe$ . Это можно объяснить тем, что тиомочевина дает сдвиг потенциалов восстановления никеля и железа в равной степени и при определенном количестве тиомочевины потенциалы этих элементов становятся одинаковыми. В качестве примера можно привести электролит следующего состава, г/л:

никель серноокислый	- 464
железо серноокислов	- 99
кислота борная	- 25
тиомочевина	- 0,2

Осаждение пленок производилось из прямоугольной ванны, термостатированной  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  при плотности тока равной  $3-5 \text{ ма/см}^2$  (в зависимости от температуры).

Типичные магнитные свойства пленок толщиной  $300 \text{ \AA}$ , полученных из этого электролита:

поле анизотропии	- 2,7 э
коэрцитивная сила	- 2,7 э
дисперсия	- $1^0$
магнитострикция	- нулевая.

В данном случае в качестве подложек применялись стекла, покрытые хромом ( $3000 \text{ \AA}$ ) и золотом ( $3000 \text{ \AA}$ ), а также механически полированная медь, на которую наносился медный подслои в микрон и слой золота толщиной  $1000 \text{ \AA}$ . В отличие от плоских пленок цилин-

дрические магнитные пленки с круговой анизотропией характеризуются отсутствием размагничивающего поля вследствие замкнутости магнитопровода. Это позволяет значительно увеличить толщину пленки до десятков тысяч ангстрем. При такой толщине пленки менее сказывается градиент состава сплава. Отличительной особенностью технологии получения цилиндрических магнитных пленок является возможность разработки непрерывного технологического процесса. Разработана поточная линия, в которой процесс подготовки подложки, осаждение магнитного сплава и контроль параметров осуществляется в едином цикле.

Непрерывный контроль магнитных параметров при электроосаждении позволяет осуществить автоматическое управление технологическим процессом.

При изготовлении плоских магнитных пленок применяются подложки из меди, алюминия, ситалла или покровных стекол с напыленным подслоем хрома, никеля, золота и др. Электроосаждение цилиндрических пленок производится на проволочную подложку из меди или бериллиевой бронзы диаметром  $0,125 \pm 0,2$  мм. Подложки должны обладать высокой однородностью химического состава и кристаллической структуры, а также иметь высокий класс чистоты поверхности.

Основные параметры ТМП (для микроэлектронных запоминающих устройств), полученных электролитическим способом, приведены в табл. УП.19.

**Катодное распыление.** В последние годы проводятся исследования по применению катодного распыления для получения магнитных пленок. Катодное распыление является одним из методов вакуумной технологии получения пленок.

Особенностями метода катодного распыления являются испарение напыляемого вещества с помощью ионной бомбардировки, более низкий вакуум в процессе напыления пленок ( $10^{-1} + 10^{-3}$  мм рт.ст), наличие инертного газа (например, аргона) и электрического поля в зоне напыления, а также отсутствие необходимости в высокой температуре подложки.

Т а б л и ц а УП.19

Основные свойства ТМП, полученных электроосаждением, в зависимости от условий получения

электролит	Условия получения			плотность тока, мв/см <sup>2</sup>	подложка	Состав сплава, %	толщина пленки, мк	Магнитные свойства пленок	
	pH	температура, °С	время, мин					Нк, э	Нс, э
Сульфатный	2,2	20	6	Плюсовая стекло хром + золото	Ni -83, Fe -13, As -2, P -2,	1000-1200	1,6-1,8	1,9-2,5	-
-"-	2,2	20	6	-"-	Ni =4,5 Fe	1100	3,9	2,8	-
-"-	4,0	20+	400	Медь диаметр 0,125	Ni -81, Fe 19	12000	6,6	1,7	2,50
-"-	4,0	290	290	Диаметр 0,125	Ni -60, Fe -	10000			1,50

Данный метод характеризуется высокой воспроизводимостью химического состава магнитных пленок вследствие небольшого различия коэффициентов распыления компонентов напыляемых сплавов, что позволяет получить более высокую однородность свойств на большей площади подложки.

При катодном распылении отсутствует влияние угла падения на подложку частиц распыляемого сплава вследствие их соударения с молекулами инертного газа.

В магнитных пленках, полученных катодным распылением, полностью отсутствует инертный газ, а общее содержание газов одинаково по количеству с содержанием газов в пленках, полученных испарением в вакууме  $10^{-7}$  мм рт.ст.

Благодаря практической безынерционности и легкой управляемости процесса катодного распыления, по сравнению с процессом термического вакуумного испарения, открываются широкие возможности для автоматического управления с целью получения магнитных пленок с заданными параметрами как плоской, так и цилиндрической геометрии.

Основные режимы напыления и параметры магнитных пленок, полученных методом катодного распыления, приведены в табл.УП.20.

Среди различных технологических методов наибольшее развитие получило вакуумное напыление. Магнитные пленки, получаемые этим методом, имеют двух- или трехкомпонентный состав и обладают требуемыми магнитными параметрами. На плоских магнитных пленках, полученных вакуумными методами, построен ряд больших наносекундных макетов запоминающих устройств, а также налажен промышленный выпуск тонкопленочных запоминающих устройств.

Значительный прогресс достигнут в получении цилиндрических магнитных пленок методом электроосаждения. Разрабатываются запоминающие устройства емкостью 100 млн. двоичных единиц с циклом обращения 1-2 мсек. Высокопроизводительная технологическая линия позволяет получить цилиндрические магнитные пленки, требуемые для этого запоминающего устройства, в течение года. Иногда используются изотропные цилиндрические пленки толщиной  $4000-7000 \text{ \AA}$  с составом  $97\% \text{ Fe}$  и  $3\% \text{ Ni}$ . На таких пленках построено запоминающее устройство вычислительной машины емкостью 260000 бит с цик-



## Т а б л и ц а УП.20

Основные свойства ТМП, полученных катодным распылением,  
в зависимости от условий получения

Технологические параметры	Свойства пленок
Катод $Ni - 8I, 3\%$ $Fe - 18, 7\%$ Напряжение на катоде - $3,5$ кв Плотность тока на катоде $1$ ма/см <sup>2</sup> Температура катода $30^{\circ}C$ Размер подложки $50 \times 50$ мм <sup>2</sup> Рабочее давление аргона $5,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. Скорость осаждения $7-9$ А/сек.	А. Плоские ферромагнитные пленки Толщина пленок $700 \text{ \AA}$ Коэрцитивная сила $1,92$ э Дисперсия $\pm 1,00$
Напряжение на катоде - $1,4-1,6$ кв Плотность тока на катоде $1$ ма/см <sup>2</sup> Температура подложки $250-300^{\circ}C$ Подложка-микропровод диаметром $160$ мк Скорость осаждения $5$ А/сек Рабочее давление газа - $(2-6)10^{-3}$ мм рт.ст. Ориентирующее магнитное поле - $15-20$	Б. Цилиндрические ферромагнитные пленки Толщина пленок $3500 \text{ \AA}$ Поле анизотропии $10 + 13$ Коэрцитивная сила $3 + 6$

лом 0,8 мсек. Другие технологические методы для получения магнитных пленок находятся в стадии разработки. Наряду с рассмотренным методом катодного распыления большими потенциальными возможностями для изготовления ТМП обладают пиролитические методы и метод химического восстановления.

Несмотря на значительные технологические трудности, проблема получения тонких магнитных пленок с заданными параметрами постепенно находит свое решение. Вакуумные методы позволили получить более перспективные плоские магнитные пленки. Однако существенным недостатком этих методов является критичность технологического процесса и сложность технологического оборудования.

Электролитические методы позволили успешно решить задачу получения цилиндрических магнитных пленок в непрерывном высокопроизводительном и контролируемом технологическом процессе.

---

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Миниатюризация и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. Дж.Далмера и Прэнвила. Пер. с англ. под ред. Барканова Н.А. и Лихачева М.С. М., "Мир", 1965.
2. БАРКАНОВ Н.А., БЫСТРОВ О.В. и др. Конструирование микромодульной аппаратуры. М., "Сов.радио", 1968.
3. МАРТЮШОВ К.И., ЗАЙЦЕВ Ю.В. Резисторы. М., "Энергия", 1966.
4. БЕЛЕВЦЕВ А.П. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. М., "Энергия", 1965.
5. ЦЫМБАЛЮК В.С., КРДКОВ Ю.Г. и др. Миниатюризация приемно-усилительной аппаратуры. М., "Связь", 1968.
6. МАЙОРОВ С.А. Проектирование и производство модулей и микромодулей. М., "Машиностроение", 1968.
7. ФРОЛОВ А.Д. Узлы радиоаппаратуры. М., "Энергия", 1964.
8. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Пер. с англ. под ред. Туродовского А.А. "Судпромгаз", 1962.
9. Микроэлектроника. Под ред. Э.Кенджана. Пер. с англ. под ред. Богородицкого Н.П. М., "Сов.радио", 1966.
10. ВАРЛАМОВ Р.Г. Компоновка радио- и электронной аппаратуры. М., "Сов.радио", 1966.
11. Дж.М.ДЬЖКС. Печатные схемы. Пер. с англ. под ред. Овчинникова Ю., Райнеберга М.С. Изд-во иностранной литературы, 1963.
12. Вопросы пленочной электроники. Под ред. Д.В.Зернова. М., "Сов.радио", 1966.
13. Пленочная микроэлектроника. Пер. с англ. под ред. М.И.Елинсона. М., "Мир", 1968.
14. Физика тонких пленок. Под общей ред. Г.Хааса. Том. I, II, III, IV. М., "Мир", 1967.
15. ИВАНОВ-ЕСИПОВИЧ Н.К. Инженерные основы пленочной микроэлектроники. М., "Энергия", 1968.
16. Введение в микроэлектронику. Пер. с англ. под ред. И.П.Степаненко. М., "Сов.радио", 1968.
17. ДАНИЛИН Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. М., "Энергия", 1967.
18. ТУН Р.Е. Пленочная технология гибридных схем (рус.перевод), стр. 36-43. М., "Электроника", 1970.
19. БРАТТОН М. Тонкие ферромагнитные пленки. Пер. с англ. под ред. Брындли Е.О. и Калинина Н.Н. М., "Судостроение", 1967.
20. Микроэлектроника. - Сб.статей под ред. Ф.В.Лукина, вып. I-3. М., "Сов.радио", 1967-1969.



## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
Глава I. Основные направления микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры.	
1. Общие положения . . . . .	9
2. Функционально-узловой метод . . . . .	12
Глава II. Терминология микроминиатюризации и микроэлектроники.	
1. Развитие и становление терминологии микроминиатюризации . . . . .	16
2. Рекомендуемая терминология . . . . .	21
3. Сравнение микроэлектронных конструкций . . . . .	25
4. Классификация и система обозначений интегральных схем . . . . .	28
Глава III. Миниатюризация дискретных элементов обычной формы.	
1. Резисторы . . . . .	33
2. Конденсаторы . . . . .	44
3. Магнитные сердечники для катушек индуктивности и трансформаторов . . . . .	48
4. Миниатюрные и бескорпусные транзисторы и диоды . . . . .	53
5. Миниатюрные пьезокерамические фильтры . . . . .	59
6. Микропереключатели . . . . .	62
7. Миниатюрные реле и другие компоненты . . . . .	62
Глава IV. Уплотненный монтаж дискретных элементов обычной формы.	
1. Плоские модули . . . . .	63
2. Колончатые и сварные модули . . . . .	65
Глава V. Уплотненный монтаж дискретных элементов специальной формы (микромодули).	
1. Конструктивно-технологические особенности микромодулей как системы дискретных элементов . . . . .	69
2. Типы микромодулей . . . . .	71
3. Общие требования к конструкции микромодуля . . . . .	72
4. Микроэлементы . . . . .	78
5. Микроплаты . . . . .	83
6. Резисторы . . . . .	85
7. Конденсаторы . . . . .	87
8. Катушки индуктивности . . . . .	89
9. Трансформаторы . . . . .	94

10. Кварцевые резонаторы . . . . .	I00
11. Диоды . . . . .	I01
12. Транзисторы . . . . .	I04
13. Элементы в микромодульном исполнении . . . . .	I08
14. Технология изготовления микромодулей . . . . .	II7
15. Проектирование микромодулей . . . . .	I22
Глава VI. Физические основы пленочной электроники.	
1. Основные механизмы переноса носителей заряда в тонких пленках . . . . .	I34
2. Токи надбарьерной эмиссии в тонкопленочных элементах . . . . .	I36
3. Токи термоэлектронной эмиссии в тонкопленочных элементах . . . . .	I45
4. Токи в тонкопленочных элементах, обусловленные туннельной эмиссией . . . . .	I49
5. Токи в тонкопленочных элементах, ограниченные пространственным зарядом . . . . .	I52
6. Токи в диэлектрических пленках с малой подвижностью электронов . . . . .	I56
7. Проводимость по примесям (прыжковая проводимость) . . . . .	I57
8. Прохождение горячих электронов сквозь тонкие металлические пленки . . . . .	I59
9. Пленочные активные элементы (ПАЭ) . . . . .	I60
Глава VII. Основы технологии пленочных интегральных схем.	
1. Общие сведения о пленочных интегральных схемах. . . . .	I81
2. Основные технологические этапы изготовления гибридных пленочных микросхем . . . . .	I83
3. Подложки для пленочных микросхем . . . . .	I86
4. Пленочные резисторы . . . . .	I93
5. Пленочные конденсаторы . . . . .	200
6. Индуктивности в пленочных микросхемах . . . . .	210
7. Пленочные проводники и контактные площадки . . . . .	213
8. Межслойная изоляция . . . . .	215
9. Методы получения конфигураций пассивных элементов тонкопленочных микросхем . . . . .	216
10. Активные элементы гибридных схем . . . . .	231
11. Корпуса для гибридных микросхем . . . . .	232
12. Толстопленочные гибридные схемы. . . . .	238
13. Тонкие адгезионные пленки. Основные свойства, применения и технология изготовления . . . . .	252
Литература . . . . .	293



