

МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

# Электроника

И. Е. Ефимов

СОВРЕМЕННАЯ  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

6Ф0.32

Е 597

УДК 621.382+621.382.8.416

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*В. М. Пролейко* (отв. редактор), *Н. Я. Аренберг*, *К. А. Валиев*,  
*Б. Ф. Высоцкий*, *С. А. Гаряинов*, *И. М. Глазков*, *Д. Б. Зворыкин*,  
*А. Н. Кармазинский*, *А. Ю. Малинин*, *Ю. Р. Носов*, *А. В. Пивоваров*,  
*Ф. П. Пресс*, *В. И. Стафеев*, *Ф. Г. Старос*, *Г. Г. Татаровская*,  
*А. Ф. Трутко*.

**Ефимов И. Е.**

**Е 597** Современная микроэлектроника. М., «Сов. радио», 1973.

112 с. с ил. (Серия. Массовая библиотека инженера «Электроника»).

Брошюра знакомит инженеров разных специальностей с современным состоянием микроэлектроники, основными ее направлениями, технологическими процессами полупроводниковых и гибридных интегральных микросхем и перспективами развития. Дается общая характеристика микроэлектроники и главные факторы, определяющие ее развитие. Затем кратко рассматриваются основные виды микросхем: полупроводниковые интегральные и гибридные интегральные микросхемы.

Брошюра рассчитана на инженеров, работающих в электронной промышленности, радиопромышленности и смежных областях науки и техники, а также на студентов старших курсов вузов.

Е  $\frac{3312-022}{046(01)-73}$  47-73

6Ф0.32

ИВАН ЕФИМОВИЧ ЕФИМОВ

**Современная микроэлектроника**

Редактор *Н. Я. Аренберг*

Художественный редактор *З. Е. Вендрова*

Технический редактор *З. Н. Ратникова*

Корректор *З. Г. Галушкина*

Сдано в набор 10/Х 1972 г.

Подписано в печать 27/II 1973 г.

T-00471

Формат 84×108/32

Бумага машиномелованная

Объем 5,88 усл. печ. л., 6,079 уч.-изд. л.

Тираж 36 000

Зак. 1382

Цена 32 коп.

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, п/я 693

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Издательство «Советское радио» приступает к выпуску серии брошюр, объединенных общим названием «Электроника». Современный этап научно-технического прогресса характерен бурным ростом электроники. Сейчас, пожалуй, трудно назвать другую область науки и техники в любой развитой стране мира, которая бы имела столь высокие темпы развития, как электроника.

На современном этапе электроника ускоренными темпами развивается в обоих традиционных направлениях: приборном и аппаратурном. С одной стороны, идет развитие самой электронной техники: совершенствуются приборы, такие, как диоды, транзисторы, электровакуумные и другие электронные приборы, и создаются новые классы электронных приборов. С другой стороны, на базе новых электронных приборов разрабатываются и выпускаются новые виды электронной аппаратуры для разнообразных областей применения.

Однако наибольший интерес представляют некоторые особенности развития электроники. Во-первых, современный этап научно-технической революции характеризуется исключительно быстрым развитием сложной, основанной на новых принципах, радиоэлектронной аппаратуры. В связи с этим традиционные методы ее изготовления путем последовательной сборки из дискретных элементов стали уже неприемлемы, поскольку они не могут обеспечить требуемую надежность, экономичность, энергоемкость, время изготовления и габаритные размеры. Необходимо было найти принципиально новые пути создания малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры. Эти требования и послужили причиной рождения нового научно-технического направления электроники — микроэлектроники.

Во-вторых, промышленностью благодаря достижениям в области микроэлектроники и, в первую очередь, повышению степени интеграции, создаются в микроэлектронном исполнении целые блоки аппаратуры, а иногда и целые функциональные устройства.

Существенная особенность электроники заключается в том, что в создании электронных приборов и аппаратуры участвуют многие области науки и техники, такие, как математика, физика, химия, металлургия, оптика и ряд других.

Все это требует как от специалистов, работающих в электронной промышленности, так и от разработчиков электронной аппаратуры расширения специальных знаний, принципов конструирования и производства электронных приборов, физических процессов, происходящих в них, условий их оптимальной эксплуатации и методов создания микроэлектронной аппаратуры.

Серия брошюр «Электроника» познакомит инженеров электронной промышленности и смежных с ней отраслей с широким кругом проблем: с новейшими достижениями в области электроники и перспективами ее развития, принципами создания микроэлектронных приборов и аппаратуры и особенностями их производства, а также особенностями их эксплуатации.

Наряду с брошюрами, рассказывающими о довольно узких технологических вопросах, например, об основных методах планарной технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, в серию войдут брошюры, посвященные характеристикам и применению разных типов микроэлектронной аппаратуры. Среди них можно назвать брошюры: «Современная микроэлектроника», «Гибридные интегральные микросхемы», «Микросхемы на МДП-структурах», «Применение интегральных микросхем», брошюры о новых направлениях электроники, таких, как квантовая и криогенная электроника; оптоэлектроника и другие.

Основная задача, поставленная перед авторами серии брошюр, заключается в том, чтобы на доступном для широкого круга читателей уровне изложить суть проблем, в которых авторы являются ведущими специалистами. В брошюрах будут приведены сведения, необходимые для того, чтобы читатель мог составить более или менее полное представление о предмете, даже не сталкиваясь с ним ранее.

Мы надеемся, что выпуск серии брошюр «Электроника» позволит расширить знания специалистов, занятых в области электроники и смежных с нею областях, поможет им составить цельную картину современного состояния и тенденций развития электроники.

*Редколлегия*



Автор настоящего выпуска выражает глубокую благодарность В. М. Пролейко, А. А. Васенкову, Ф. Г. Старосу, К. В. Лебедеву за ценные советы и замечания, сделанные при подготовке рукописи к печати.



# Микроэлектроника и перспективы ее развития

---

## 1.0. Терминология

Микроэлектроника является новой отраслью электронной техники и поэтому вопросы терминологии приобретают особое значение. Приведем здесь определение основных терминов микроэлектроники, принятое\* в нашей стране.

*Микросхема* — микроэлектронное изделие, имеющее эквивалентную плотность монтажа не менее пяти элементов в  $1 \text{ см}^3$  объема, занимаемого схемой, и рассматриваемое как единое конструктивное целое.

*Интегральная микросхема* — микросхема, все или часть элементов которой нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое.

**Примечание.** Указанные элементы не имеют внешних выводов, корпуса и не могут рассматриваться как отдельные изделия.

*Полупроводниковая интегральная микросхема* — интегральная микросхема, элементы которой выполнены в объеме и (или) на поверхности полупроводникового материала.

*Пленочная интегральная микросхема* — интегральная микросхема, элементы которой выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрического материала.

*Тонкопленочная интегральная микросхема* — пленочная интегральная микросхема с толщиной пленок до  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

**Примечание.** Элементы тонкопленочной интегральной микросхемы наносятся преимущественно методами термовакuumного осаждения и катодного распыления.

*Толстопленочная интегральная микросхема* — пленочная интегральная микросхема с толщиной пленок свыше  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

---

\* ГОСТ 17021—71.

**Примечание.** Элементы толстопленочной интегральной микросхемы наносятся преимущественно методом шелкографии.

*Гибридная интегральная микросхема* — интегральная микросхема, часть элементов которой имеет самостоятельное конструктивное оформление.

*Микросборка* — микросхема, состоящая из различных элементов и (или) интегральных микросхем, которые имеют отдельное конструктивное оформление и могут быть испытаны до сборки и монтажа.

**Примечание.** Элемент микросборки имеет внешние выводы, может иметь корпус и рассматриваться как отдельное изделие.

*Подложка интегральной микросхемы* — основание, на поверхности или в объеме которого формируются элементы интегральных микросхем.

*Базовый кристалл* — подложка из полупроводникового материала с определенным набором сформированных в ней не соединенных между собой элементов, используемая для создания интегральных микросхем путем изготовления избирательных внутрисхемных соединений.

*Элемент интегральной микросхемы* — часть интегральной микросхемы, выполняющая функции какого-либо радиоэлемента.

**Примечание.** Под радиоэлементом понимают транзистор, резистор, диод и др.

*Серия интегральных микросхем* — совокупность интегральных микросхем, выполняющих различные функции, имеющих единую конструктивно-технологическую основу и предназначенных для совместного применения в радиоэлектронной аппаратуре.

*Корпус интегральной микросхемы* — часть интегральной микросхемы, предназначенная для ее защиты от внешних воздействий и монтажа в аппаратуре с помощью соответствующих выводов.

*Оригинал интегральной микросхемы* — чертеж конфигурации технологического слоя структуры интегральной микросхемы, предназначенный для получения фотошаблона.

*Фотошаблон интегральной микросхемы* — фотокопия оригинала интегральной микросхемы, выполненная на прозрачном материале в масштабе 1:1 по отношению к размерам интегральной микросхемы.

*Топологический чертеж интегральной микросхемы* —

чертеж размещения и формы элементов и соединений интегральной микросхемы.

*Эпитаксия* — процесс выращивания слоев с упорядоченной кристаллической структурой путем реализации ориентирующего действия подложки.

*Реотаксия* — процесс выращивания слоев с упорядоченной кристаллической структурой при исключении ориентирующего действия подложки вследствие наличия тонкого слоя жидкости.

*Маска* — трафарет, обеспечивающий избирательную защиту отдельных участков подложки при технологической обработке.

*Свободная маска* — маска в виде пластины с отверстиями предназначенная для многократного использования.

*Контактная маска* — маска в виде рельефного слоя, предназначенная для однократного использования.

Степень интеграции микросхем определяется количеством элементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.), входящих в состав микросхемы.

Интегральные микросхемы в зависимости от количества элементов в схеме принято\* называть:

а) до 10 элементов — «Интегральные микросхемы 1-й степени интеграции»;

б) от 10 до 100 элементов — «Интегральные микросхемы 2-й степени интеграции»;

в) от 100 до 1 000 элементов — «Интегральные микросхемы 3-й степени интеграции» и т. д.

При необходимости допускается применять сокращенные обозначения терминов: ИС1, ИС2, ИС3 и т. д.

## 1.1. Общая характеристика микроэлектроники

Микроэлектроника — это новое научно-техническое направление в электронике, на базе которого с помощью сложного комплекса физических, химических, схемотехнических, технологических и других методов и приемов решается проблема создания высоконадежных и эконо-

---

\* Отраслевой стандарт электронной промышленности ОСТ 116К0.070.000.

мичных микроминиатюрных электронных схем и устройств [1, 2].

Центральной задачей микроэлектроники является проблема создания миксимально надежных элементов, схем и устройств и разработка надежных и дешевых способов их соединений путем использования качественно новых принципов изготовления электронной аппаратуры. К числу этих принципов относится отказ от использования дискретных компонентов и формирование непосредственно в микрообъемах исходных материалов сложных интегральных микросхем.

Применение особо чистых исходных материалов и проведение технологического процесса в стерильных условиях, исключая возможность загрязнения, минимальное количество внутрисхемных соединений, малые размеры, компактность микроэлектронных узлов и блоков дают возможность резко повысить надежность микроэлектронной аппаратуры. Этим преодолеваются сложные противоречия между возросшими требованиями к надежности радиоэлектронной аппаратуры и невозможностью решить эту задачу при использовании дискретных компонентов [3].

Для современного этапа развития микроэлектроники характерна интеграция многих технологических приемов, которые ранее использовались как в массовом производстве полупроводниковых приборов (в особенности планарного типа), так и при изготовлении пленочных покрытий. Для современной интегральной электроники характерны два направления: полупроводниковое и пленочное [4].

Создание интегральных микросхем на одной монокристаллической полупроводниковой пластине путем локального воздействия на микроучастки полупроводникового кристалла и придание им свойств, соответствующих функциям микродеталей — полупроводниковых интегральных микросхем — является естественным развитием отработанных в течение последних десятилетий технологических принципов массового производства дискретных полупроводниковых приборов.

Создание микросхем на изоляционной подложке (обычно из стекла или стеклокерамического материала) путем послойного нанесения пленок различных материалов с одновременным формированием из них микродеталей и их соединений — пленочных интегральных микро-

схем — является дальнейшим развитием широко распространенных вакуумных методов нанесения тонких пленок, а также получения толстых пленок путем шелкографии.

В основе технологического метода производства полупроводниковых интегральных микросхем лежит планарный процесс, обеспечивающий одновременное групповое создание большого количества микросхем на пластине, что в свою очередь определяет высокую идентичность получаемых микросхем по параметрам и характеристикам. Применение планарного процесса и значительное сокращение числа соединений элементов в процессе получения интегральных микросхем обеспечивает их высокую надежность.

Существенным достоинством полупроводниковых интегральных микросхем является высокая плотность упаковки элементов схемы (до нескольких тысяч) и сравнительно невысокая стоимость прежде всего за счет сокращения объема сборочных операций, причем эти преимущества становятся более значительными по мере усложнения интегральных микросхем и возрастания в них количества элементов.

Размеры отдельных элементов полупроводниковых интегральных микросхем с использованием биполярных транзисторов уже в настоящее время составляют 2 мкм, а расстояние между ними 5 мкм и, по-видимому, в ближайшее время будут уменьшены по крайней мере в 2—3 раза. Быстродействие составляет порядка 1 нс для простого блока и 50 ÷ 100 нс для ячейки памяти 1000 бит.

Достигнутые успехи в технологии полупроводниковых интегральных микросхем позволяют изготавливать сложные функциональные схемы для цифровых вычислительных машин: диодные матрицы, ячейки памяти, регистры сдвига и т. д. Имеется реальный путь построения цифровой вычислительной машины на небольшом числе монокристаллических пластин.

Перспективным направлением в создании полупроводниковых интегральных микросхем является получение транзисторов со структурой металл — диэлектрик — полупроводник (МДП). МДП-структура может играть роль как активного (транзистор, диод), так и пассивного элемента (резистор, конденсатор). При этом элементы на основе МДП-структур занимают гораздо меньшую площадь, что позволяет получать значительно большие плот-



ности упаковки (степень интеграции) в одном и том же объеме [5].

Технология изготовления МДП-структур несколько проще технологии изготовления биполярных приборов, так как сокращается число технологических операций, что приводит к увеличению процента выхода годных микросхем и снижению их стоимости. Схемы на МДП-структурах потребляют значительно меньшую мощность, в них легко осуществляется управление и не требуется постоянного смещения для выполнения логических функций. Современная технология позволяет изготавливать полупроводниковые интегральные микросхемы на МДП-транзисторах, содержащих сотни элементов в одном кристалле. Особенно перспективны МДП-структуры для создания элементов вычислительной среды (однородной структуры) совершенно нового класса вычислительных устройств, состоящих из одинаковых элементов, настроенных на выполнение тех или иных функций [26]. Применение однородных структур повышает надежность, увеличивает степень интеграции и повышает быстродействие вычислительных устройств.

МДП-транзисторы обладают высоким входным сопротивлением и поэтому их часто называют полупроводниковым аналогом электронной лампы. Принципиальная разница между этими двумя приборами состоит в том, что управляющий электрод МДП-транзистора модулирует проводимость токопроводящего участка полупроводникового кристалла, расположенного между двумя электродами, тогда как управляющий электрод электронной лампы регулирует поток электронов, протекающих в вакууме между катодом и анодом. Вследствие высокого входного сопротивления МДП-транзистора и его малых размеров стало возможным создание на их основе интегральных микросхем высокой степени интеграции и маломощных усилителей звуковой частоты.

Следует отметить, что в интегральных микросхемах МДП-транзисторы в настоящее время имеют еще значительно меньшее быстродействие (до  $10 \text{ Мгц}$ ), чем биполярные транзисторы (до  $5 \text{ Ггц}$ ) [5]. Поэтому в тех случаях, когда требуется высокое быстродействие, предпочтение отдается микросхемам на биполярных транзисторах. Однако для многих современных радиоэлектронных систем не требуется микросхем, у которых быстродействие превосходит быстродействие, обеспечиваемое



МДП-транзисторами. Кроме того, ведутся широкие исследования по повышению быстродействия МДП-транзисторов в интегральных микросхемах.

Гибридные интегральные микросхемы изготавливаются главным образом на основе применения двух базовых технологических процессов:

- получения толстых пленок методом шелкографии;
- получения тонких пленок методом термического осаждения в вакууме или распыления ионной бомбардировкой в среде разреженного инертного газа.

Интегральные схемы, изготавливаемые методом вакуумного осаждения, получили название тонкопленочных интегральных микросхем, а методом шелкографии — толстопленочных интегральных микросхем.

К достоинствам микросхем на толстых пленках следует отнести сравнительно меньшую сложность, стоимость оборудования для их изготовления и малые затраты при эксплуатации оборудования, а также широкие возможности массового производства. Из схемотехнических достоинств следует указать на возможность изготовления резисторов больших номинальных значений. Недостатком схем на толстых пленках является трудность получения конденсаторов большой емкости (более  $0,02 \text{ мкф/см}^2$ ).

Для получения гибридных интегральных схем активные элементы размещаются непосредственно на плате с пассивными элементами, представляющей собой либо тонкопленочную интегральную микросхему, либо толстопленочную. В качестве активных элементов в гибридных интегральных микросхемах применяют как дискретные полупроводниковые миниатюрные элементы (диоды и транзисторы), так и диодные и транзисторные матрицы, бескорпусные интегральные микросхемы.

Активные элементы для гибридных интегральных микросхем применяются как бескорпусные, так и помещенные в миниатюрный металлический корпус. Бескорпусные активные элементы должны быть защищены пассивацией поверхности и герметизированы при помощи специальных защитных покрытий (лаки, эмали, смолы, компаунды т. д.).

Основными достоинствами гибридных интегральных микросхем являются возможность создания широкого класса микросхем для дискретной и линейной техники при сравнительно коротком цикле их разработки; возможность получения пассивных элементов широкой номенклатуры

с жесткими допусками; универсальность метода конструирования микросхем, позволяющая применять в качестве активных элементов бескорпусные транзисторы, бескорпусные интегральные микросхемы, МДП-приборы, диодные и транзисторные матрицы и т. д.; высокий процент выхода годных микросхем при сборке.

Еще сравнительно недавно полупроводниковые и тонкопленочные интегральные микросхемы рассматривались как конкурирующие направления в развитии интегральной электроники. В последние годы стало очевидным, что эти два направления в создании интегральных микросхем отнюдь не исключают, а скорее наоборот, взаимно дополняют и обогащают друг друга. Более того, до сегодняшнего дня не созданы (да и, видимо, в этом и нет необходимости) интегральные микросхемы, в процессе производства которых используется какой-либо один вид технологии. Даже при изготовлении монолитных кремниевых микросхем, где в основном применяется планарная технология, одновременно пользуются такими методами, как вакуумное осаждение пленок алюминия для получения внутрисхемных соединений, т. е. методами, на которых основана технология тонких пленок.

В связи с непрерывным совершенствованием технологий, применяемых при изготовлении как полупроводниковых, так и тонкопленочных интегральных микросхем, а также ввиду все большего усложнения этих микросхем, что выражается в увеличении числа и типов их элементов, следует ожидать, что в ближайшем будущем будет происходить процесс совмещения технологий полупроводниковых и тонкопленочных микросхем, и большинство сложных микросхем будут изготавливаться на основе оптимального совмещения этих технологий. При этом можно получить такие параметры и надежность микросхем, которых нельзя достигнуть при использовании каждого вида микросхем в отдельности.

Приведем пример: при изготовлении полупроводниковой интегральной микросхемы по планарной технологии все элементы (пассивные и активные) выполняются в одном технологическом процессе, поэтому параметры элементов оказываются взаимосвязанными. Определяющими являются активные элементы, так как обычно в качестве конденсатора используется переход база — коллектор транзистора, а в качестве резистора — диффузионная область, получающаяся при создании базы транзи-

стора. Нельзя оптимизировать параметры одного элемента, не изменив одновременно характеристики других элементов. При заданных характеристиках активных элементов изменять номиналы пассивных элементов можно лишь изменением их размеров.

При создании интегральных микросхем по технологии совмещенных микросхем активные элементы изготавливаются методами планарной технологии в пластине кремния, а пассивные элементы (резисторы и конденсаторы) — по технологии тонких пленок на окисленной поверхности той же самой кремниевой пластины. Однако процессы создания активной и пассивной частей микросхемы разнесены во времени. Поэтому характеристики и параметры пассивных элементов в значительной мере независимы от характеристик и параметров активных элементов и определяются выбором материала, толщиной пленок и их конфигурацией. Поскольку транзисторы интегральной микросхемы, изготовленной по технологии совмещенных микросхем, находятся внутри подложки, размеры такой микросхемы могут быть значительно уменьшены по сравнению с гибридными тонкопленочными микросхемами, в которых используются дискретные

Таблица 1.1

**Классификация полупроводниковых интегральных микросхем**

Кремниевые микросхемы	Микросхемы на биполярных транзисторах Микросхемы на униполярных транзисторах (МДП-транзисторах) Диодные матрицы Микросхемы на биполярных транзисторах и МДП-транзисторах Сложные микросхемы с высокой степенью интеграции — большие интегральные схемы (БИС)
Многокристалльные микросхемы	Отдельные кристаллы, содержащие активные и пассивные элементы, смонтированные по заданной схеме на пассивной подложке
Германиевые микросхемы и микросхемы на основе других материалов	Микросхемы на основе германия, арсенида галлия и других соединений типа $A^3B^5$ ; микросхемы на основе полупроводниковых стекол

навесные активные элементы, занимающие сравнительно много места на подложке.

Схемы, изготовленные по технологии совмещенных микросхем, обладают некоторыми достоинствами. Так, например, при этом оказывается возможным на малой площади получить резисторы с большой величиной сопротивления и малым температурным коэффициентом сопротивления, имеющие очень узкую ширину и большое поверхностное сопротивление. Контроль скорости осаждения пленок в процессе получения резисторов позволяет изготавливать их с очень высокой точностью.

В зависимости от технологических методов и используемых материалов можно произвести классификацию полупроводниковых (табл. 1.1), пленочных и гибридных интегральных микросхем (табл. 1.2).

Кроме интегральных микросхем, методами, используемыми в микроэлектронике, могут непосредственно соз-

Таблица 1.2

**Классификация пленочных и гибридных интегральных микросхем**

Микросхемы на основе тонких пленок, полученных вакуумным напылением, осаждением из газовой фазы и другими методами	Тонкопленочные микросхемы, содержащие только пассивные элементы (резистивные, проводящие, индуктивные) Тонкопленочные микросхемы, содержащие пассивные и активные пленочные элементы Тонкопленочные микросхемы на основе МДП-транзисторов, биполярных транзисторов и диодов Гибридные микросхемы с дискретными активными элементами, а также с использованием кристаллов полупроводниковых микросхем. Большие гибридные интегральные схемы Толстопленочные микросхемы, содержащие пассивные и активные пленочные элементы
Микросхемы на основе толстых пленок	Толстопленочные микросхемы, содержащие только пассивные элементы (резистивные, проводящие, индуктивные) Толстопленочные гибридные микросхемы с дискретными активными элементами, а также с использованием кристаллов полупроводниковых микросхем. Большие гибридные интегральные схемы

даваться функциональные узлы, блоки и приборы электронной аппаратуры. В этом случае монокристалл подвергается ряду технологических операций, в результате

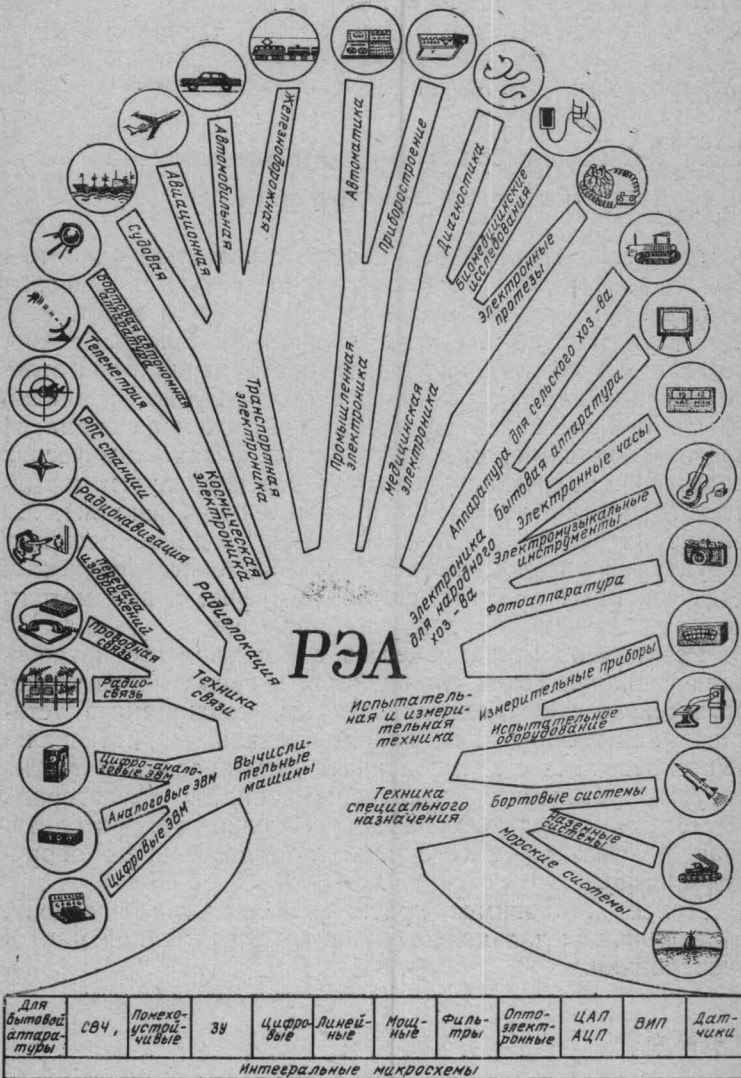


Рис. 1.1. Схема основных направлений развития микроэлектроники. (ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи, АЦП — аналого-цифровые преобразователи, ВИП — вторичные источники питания.)



чего формируются особые области, выполняющие функции электронных схем. В функциональном узле или приборе нельзя выделить один элемент из остальных, а конструкцию его нельзя разделить, не нарушая при этом выполняемой им функции электронной схемы.

Основные направления развития современной микроэлектроники показаны на рис. 1.1 [39].

## 1.2. Основные факторы, определяющие развитие микроэлектроники

Микроэлектроника как новая отрасль техники имеет ряд специфических особенностей не только в решении технических проблем создания интегральных микросхем, но и в разработке новых материалов, совершенной технологии, высокопроизводительного оборудования и подготовке высококвалифицированных кадров. Бурно развивающаяся технология интегральных микросхем основана на чрезвычайно широком круге сложных физико-химических процессов: получение пленочных структур путем термического и ионно-плазменного напыления в вакууме, наращивание слоев из газовой фазы, создание сложных структур в твердом теле с помощью окислительных и диффузионных отжигов, фотолитография, новые методы холодной сварки, и ряд других процессов.

Реализация этих процессов в производстве потребовала создания таких сложнейших и новых видов технологического оборудования, как высоковакуумные установки напыления, установки наращивания эпитаксиальных слоев, печи с прецизионным регулированием температуры, установки электронно-ионной и лазерной обработки, координатографы, установки для фотолитографии, сварки и целого ряда вспомогательного оборудования [6].

Далее остановимся кратко на основных факторах, определяющих дальнейшее развитие современной микроэлектроники.

### Материалы

Одним из важных факторов, определяющих развитие микроэлектроники, является освоение большого числа разнообразных материалов, необходимых для изготовле-



ния интегральных микросхем. Сюда относятся материалы, идущие на изготовление активных и пассивных элементов микросхем, а именно: полупроводниковые материалы, резистивные и проводящие металлы и сплавы, диэлектрические соединения и смеси, фоторезисты, диффузаны, растворители.

В связи с уменьшением размеров активных и пассивных элементов интегральных микросхем и стремлением разместить все большее их число на минимальной площади и в минимальном объеме, требования к материалу непрерывно повышаются. Необходимо производство сильно легированных монокристаллов кремния с низкой плотностью дислокаций, точно заданного диаметра и т. д., а также выпуск монокристаллов новых полупроводниковых соединений высокого качества. Понятие «чистое вещество» в традиционном химическом смысле уже недостаточно для полной характеристики материала. Помимо содержания примесей, необходимо учитывать еще и стехиометрию, чистоту поверхности, плотность кристаллографических дефектов.

Производство высококачественного полупроводникового материала — сложный процесс, представляющий собой сочетание химических, металлургических и механических процессов, таких, как дистилляция или ректификация, синтез, вакуумирование, легирование, выращивание монокристаллов, отжиг и т. д. Большинство этих процессов должно проводиться в условиях, исключающих загрязнение, и при высокой точности соблюдения всех технологических параметров. Для этого необходимы особо чистые и инертные при высоких температурах контейнеры, специальные реактивы, прецизионное контрольно-измерительное оборудование, современные инструментальные методы анализа. Это приводит к повышению стоимости и увеличению дефицитности конечных продуктов. Однако в большинстве случаев усложнение технологии производства полупроводниковых материалов оправдано, так как повышение их качества дает большую экономию при промышленном выпуске созданных на них приборов.

С развитием микроэлектроники создается, по существу, новый раздел металлургии, тесно связанный с электроникой. Поскольку размеры изделий микроэлектроники весьма невелики, количество металлов в них очень мало, а техника металлургии имеет дело с большими объемами

металлов, раздел этот все чаще называют микрометаллургией или прецизионной металлургией.

Весь комплекс вопросов, связанных с материалами для микроэлектроники, в последнее время стали объединять под названием «электронное материаловедение». Оно связывает электронику с химией и металлургией. Каждый новый материал сначала разрабатывается. После того как технология получения нового материала полностью освоена, создана и испытана полупромышленная аппаратура, материал прошел всесторонние испытания, исследованы основные электрофизические и физико-химические характеристики, созданы методы анализов и измерений, разработки новых материалов передаются промышленности.

## Технология

*Планарная технология* изготовления полупроводниковых интегральных микросхем является в настоящее время наиболее распространенной. Вместе с тем она имеет ряд принципиальных особенностей, которые в значительной мере ограничивают пределы микроминиатюризации полупроводниковых интегральных микросхем. В этой связи следует указать на основные особенности планарной технологии:

— длительность проведения диффузионных процессов с крайне ограниченной возможностью эффективного контроля и управления этими процессами (так, например, в диффузионных печах приходится в течение нескольких часов поддерживать температуру в диапазоне  $1\ 200 \div 1\ 300\ ^\circ\text{C}$  с точностью до долей  $^\circ\text{C}$ , что практически находится на пределе возможности существующих способов стабилизации температуры);

— большое количество разнотипных и по сути дела не связанных между собой химических, оптико-механических и физико-термических операций (травление, обезжиривание, промывка, сушка кремниевых пластин, проведение фотолитографических процессов локального травления, многократных термодиффузионных процессов, термического испарения в вакууме, термокомпрессии выводов и др.) и отсутствие промежуточного эффективного контроля между некоторыми операциями неизбежно снижает процент выхода годных полупроводниковых ин-

тегральных микросхем и в значительной мере затрудняет автоматизацию процесса их производства;

— необходимость многократного механического совмещения негативов при проведении фотолитографических процессов ограничивает ширину линий и зазоров расстоянием  $10 \div 15$  мкм, а явление дифракции света ограничивает разрешающую способность фотолитографических процессов расстоянием порядка 1 мкм.

Существует несколько различных технологических способов изготовления интегральных микросхем:

а) планарная технология с использованием металлургического полупроводникового материала с изоляцией элементов разделительными *p-n* переходами;

б) планарная технология с использованием металлургического полупроводникового материала с изоляцией элементов слоем двуоксида кремния;

в) планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов разделительными *p-n* переходами;

г) планарно-эпитаксиальная технология с изоляцией элементов слоем двуоксида кремния;

д) технология совмещенных схем, когда в полупроводниковом материале по планарной технологии создаются активные элементы, а на поверхности методами тонкопленочной технологии — пассивные элементы;

е) элионная технология.

Каждое из этих технологических направлений имеет свои преимущества для определенных классов полупроводниковых интегральных микросхем.

Технология изготовления полупроводниковых микросхем за короткое время достигла сравнительно высокого уровня благодаря заимствованию основных принципов, разработанных в планарной технологии транзисторов.

Основное отличие технологии изготовления полупроводниковых микросхем от технологии изготовления транзисторов заключается в дополнительных операциях по созданию электрической изоляции элементов друг от друга. Для этого широко применяется метод изоляции путем создания вокруг изолируемого элемента области с противоположным типом проводимости. При подаче на образующийся *p-n* переход напряжения смещения в обратном направлении элемент, находящийся внутри данной области, окажется электрически изолированным от остальных элементов схемы, так как сопротивление такого перехода очень велико. Следует отметить, что при

использовании обратно смещенного *p-n* перехода для изоляции элементов возникают паразитные емкости, ограничивающие быстродействие цифровых микросхем.

Изоляция элементов полупроводниковой микросхемы с помощью диэлектрического слоя двуокиси кремния дает возможность уменьшить паразитные емкости между коллектором и подложкой и практически полностью устранить активные паразитные связи между элементами микросхемы. Элементы микросхемы размещаются как бы в «карманах» из двуокиси кремния.

Наибольшее распространение при изготовлении полупроводниковых микросхем получила планарно-эпитаксиальная технология.

При технологии совмещенных полупроводниковых микросхем активные элементы изготавливаются в теле кремниевого кристалла путем эпитаксиального наращивания, фотолитографии и диффузии. Пассивные элементы в виде тонких пленок наносятся непосредственно на поверхность монокристаллической структуры. Этим способом

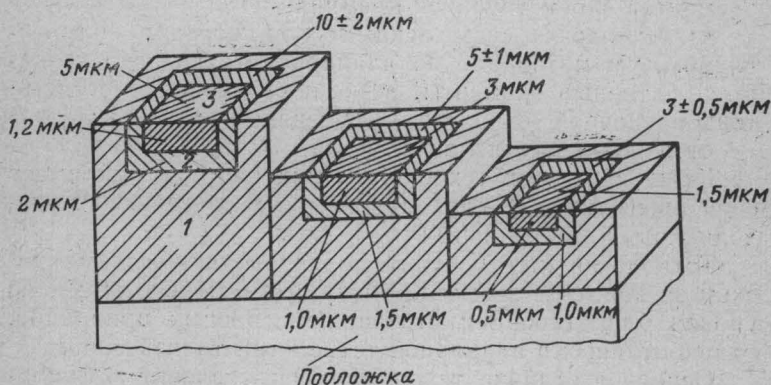


Рис. 1.2. Этапы совершенствования технологии полупроводниковых интегральных микросхем.

1 — эпитаксиальный коллектор; 2 — диффузионная база; 3 — диффузионный эмиттер.

можно получать сопротивления и емкости с уменьшенными паразитными связями и меньшими допусками.

При разработке новых технологических процессов стремятся значительно уменьшить линейные размеры элементов полупроводниковых микросхем, что позволяет увеличить степень интеграции микросхем и улучшить их частотные характеристики. На рис. 1.2 показаны техно-

логические этапы совершенствования структур полупроводниковых интегральных микросхем.

Успехи, достигнутые в технологии полупроводниковых микросхем (изопланарный процесс, локальная эпитаксия, коллекторная разделительная диффузия), позволяют изготавливать сложные функциональные схемы для всех классов электронной аппаратуры: сложные диодные матрицы, ячейки памяти, регистры сдвига и т. д. Имеется реальный путь построения ЦВМ на небольшом числе монокристаллических пластин.

Значительное улучшение характеристик полупроводниковых микросхем и особенно повышение устойчивости к различным внешним воздействиям может дать применение изоляционных, например, сапфировых подложек. Это сравнительно просто решает проблему взаимной изоляции элементов кремниевых микросхем.

*Гибридные интегральные микросхемы* изготавливаются главным образом на основе применения двух базовых технологических процессов:

- получения толстых пленок методом шелкографии (или, точнее, методом сеткографии);
- вакуумного осаждения тонких пленок.

При изготовлении толстопленочных интегральных микросхем используются проводящие, резистивные и диэлектрические пасты, которые через специальные сетчатые трафареты наносятся на керамические подложки, после чего вжигаются при определенной температуре.

При создании тонкопленочных микросхем применяется осаждение пленок путем термического испарения в вакууме или же ионно-плазменного распыления в среде разряженного инертного газа (чаще всего аргона).

Для изготовления резисторов используются пленки хрома, никрома, тантала, а также различного рода сплавов и металлокерамических смесей. При изготовлении конденсаторов применяются моноокись кремния, моноокись германия, окислы тантала, а также пленки органического происхождения. Для получения проводников и контактных площадок применяются медь, алюминий, золото, никель и другие материалы.

Создание пленочных активных элементов открывает широкие возможности для совершенствования интегральных схем. Однако при решении этой проблемы встретились большие трудности в изготовлении качественных



монокристаллических полупроводниковых пленок. Получаемые напылением в вакууме монокристаллические полупроводниковые пленки на изолирующей подложке, несмотря на принимаемые меры, все же содержат нежелательные примеси, приводящие к нестабильности и малому сроку службы пленочных активных элементов. Некоторые успехи по пленочным активным элементам достигнуты в направлении создания униполярных приборов, основанных на эффекте пространственного заряда, а также на полевом и туннельном эффектах.

Большие перспективы при изготовлении интегральных микросхем имеет применение электронных и ионных пучков. Электронные и ионные пучки являются потоками заряженных частиц, которые с помощью электрических и магнитных полей можно фокусировать и отклонять в любую точку обрабатываемой поверхности. Таким образом, при использовании этих пучков возникает реальная возможность электрического управления всей совокупностью технологического процесса, который может полностью выполняться без разгерметизации рабочего объема в условиях высокого вакуума, что повышает воспроизводимость параметров и надежность интегральных микросхем. С помощью электронных и ионных пучков можно:

— производить легирование полупроводников различными примесями. При этом, изменяя плотность тока ионного пучка и величину ускоряющего напряжения, можно в широких пределах регулировать концентрацию примесей и глубину легирования;

— получать сплавные переходы, напылять резистивные и изоляционные пленки и удалять их по определенному рисунку с помощью сканирующего электронного луча для получения требуемой конфигурации;

— производить обработку поверхности с целью разложения конденсата или полимеризации органических пленок в местах, облученных электронами;

— производить засветку фоторезиста электронным пучком без применения механических масок. Поскольку минимальный диаметр электронного пучка (например, в растровом микроскопе) доведен до долей микрона, то при этом возникает возможность повысить разрешающую способность фотолитографического процесса;

— производить сварку и сплавление выводов с электродами.



## Оборудование

Для производства интегральных микросхем обычно применяют три основные группы комплектов оборудования, которые предназначены для планарно-эпитаксиальной, тонкопленочной и толстопленочной технологии. Каждый комплект оборудования содержит как основное оборудование, предназначенное только для данной технологии, так и вспомогательное; однако перечень оборудования каждого комплекта может существенно изменяться по количеству модификаций основных видов и составу вспомогательного оборудования.

Основные тенденции в создании *оборудования для получения эпитаксиальных и диффузионных структур* интегральных микросхем следующие:

— групповой метод одновременного наращивания слоев на нескольких пластинах для повышения производительности труда;

— развитие двух-трехпозиционных установок с последовательно работающими реакционными камерами вместо шлюзовых загрузочных устройств, обеспечивающих непрерывность работы установки в оборудовании промышленного типа;

— переход от горизонтальных к вертикальным реакционным камерам с вращающимся тепловоспринимающим блоком в виде многогранной усеченной пирамиды, которая обеспечивает возможность одновременного и равномерного нагрева большого количества пластин;

— использование индукционного нагрева в качестве основного вида нагрева подложек и тепловоспринимающего блока как достаточно безынерционного, обеспечивающего вынесение нагревателя **из реакционной камеры** и необходимые условия ее охлаждения;

— увеличение стремления к использованию генераторов **пониженной частоты** (машинных и на тиристорах) по мере увеличения производительности установок и размеров нагреваемого блока;

— развитие специализированных установок, выполняющих отдельные операции с высокой автоматизацией и программированием технологического процесса вместо их универсальности.

Важным эффективным направлением повышения производительности установок и экономически целесообраз-

ного их использования является увеличение числа реакционных камер, работающих от одного ВЧ генератора и одной газовой системы с последовательным режимом проведения вспомогательных операций и процесса наращивания слоя. Программирование и автоматизация основных операций позволяют производить вспомогательные операции на одной из реакционных камер, в то время, как во второй идет наращивание эпитаксиального слоя.

При разработке новых видов оборудования и улучшении качества используемых эпитаксиальных установок внимание должно быть направлено:

— на дальнейшее более глубокое изучение кинетики, газодинамики процесса и определение дополнительных требований к конструкции реакционной камеры (форма, размеры, место ввода, расход реакционной смеси и т. д.);

— на определение оптимальных условий и кинетики нагрева в распределении температур на подложках в зависимости от частоты ВЧ нагрева, материала, размеров и формы пирамид;

— на разработку высокостабильных и надежных полупроводниковых термостатов для обеспечения стабилизации температуры в испарителях в широком интервале температур;

— на проведение широкой унификации и типизации элементов и узлов газовых систем, блоков регулирования и программирования оборудования эпитаксиальных и диффузионных процессов для широкого серийного их производства и снижения стоимости.

Диффузионные процессы в настоящее время являются основными в технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. С их помощью наилучшим образом удается управлять концентрацией и распределением примесей в локальных участках поверхности полупроводников и обеспечивать получение пассивных и активных элементов. Основное преимущество этого метода заключается в возможности групповой обработки большого количества маскированных окисной пленкой пластин, что при наличии хороших диффузионных печей обеспечивает наиболее экономичную и целесообразную организацию производства. Основные и определяющие параметры качества и производительности таких печей — высокая точность поддержания температуры

и длина рабочей зоны диффузии с равномерным распределением температурного поля.

Постоянно возрастают требования к увеличению точности поддержания и равномерности температуры в рабочей зоне диффузии. В настоящее время большинство зарубежных фирм рекламируют печи с точностью поддержания температуры  $\pm 0,5 \div 1^\circ\text{C}$ . Из сообщений отдельных фирм известно, что точность поддержания температуры в печах доведена до  $\pm 0,25 \div 0,1^\circ\text{C}$ .

По мере повышения требований к точности поддержания температуры постоянно совершенствуется система ее регулирования. Применяемые системы на базе автоматического потенциометра с реостатным датчиком и системы с фотоэлектрическим усилителем уступают место бесконтактным компактным системам регулирования, выполненным на полупроводниковых элементах, со сложным функциональным законом регулирования.

По мере уточнения границ применимости технологических режимов и повышения жаропрочности сплавов типа «кантал» сейчас уже отказываются от дорогостоящих неудобных в эксплуатации силитовых и крусилитовых нагревателей и переходят к выпуску печей с легкозаменяемыми проволочными нагревателями с максимальной температурой  $1\ 300^\circ\text{C}$ .

Основная тенденция в создании *оборудования для химико-технологических операций и фотолитографии* характеризуется широким поиском новых технологических методов обработки полупроводниковых пластин и интенсификаций существующих процессов. Представляется весьма интересным создание оборудования на основе применения направленных вибраций с транспортировкой деталей в процессе их обработки в противотоке жидкости.

В производстве интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, получаемых приемами планарной технологии, особое место занимают процессы фотолитографии, включая такие операции, как химическая обработка пластин, нанесение и сушка фоторезиста, совмещение рисунка фотошаблона и экспонирование, проявление фоторезиста, травление окислов и металлов, удаление фоторезиста и контроль.

Процессы и приемы фотолитографии находятся в стадии непрерывного совершенствования; это связано и с разнообразием оборудования, применяемого для одних

и тех же процессов. Например, нанесение фоторезиста производится методом центрифугирования и распыления; проявление фоторезиста производится в неподвижном растворе, методом пульверизации, в рабочих жидкостях с направленными вибрациями и т. п. Поэтому основным в создании фотолитографического оборудования является стремление к значительному повышению надежности этого оборудования, уменьшению размеров всех без исключения установок, входящих в состав агрегата фотолитографии. Использование ряда новых и более совершенных процессов фотолитографии позволяет говорить о возможности автоматизации таких процессов, как химическая обработка, нанесение и сушка резиста, проявление фоторезиста, травление окисла. Для успешной работы в этой области важное значение приобретает разработка объективных методов контроля основных процессов и типовой технологии фотолитографии.

Сборочные и контрольные операции в настоящее время являются наиболее трудоемкими. В большинстве случаев сборка и монтаж интегральных микросхем производится под микроскопом на специальных установках. Некоторые операции выполняются групповым методом (например, приплавление кристалла), а другие, как герметизация и ряд контрольных операций, механизированы.

Стремление механизировать сборочные операции привело к таким технологическим приемам, как сборка на ленте. В этом случае тонкая металлическая лента является транспортирующим элементом в процессе сборки и монтажа, а после разрезки эта же лента составляет часть изделия. Неудобство обращения с длинной лентой, наматываемой на барабаны, привело к тому, что сборку в ряде случаев стали производить на кусках ленты длиной от 150 до 1 000 мм, а также с использованием полимидных пленок.

Другое аналогичное решение, применяемое для сборки только транзисторов, заключается в том, что сборка производится на выводах, предварительно закрепленных на эластичной ленте. При сборке как на ленте, так и на выводах применяется герметизация полимерными материалами, что в общем очень удобно для сборки, но несколько ограничивает области применения таких изделий. Следует ожидать, что эти же приемы сборки позволят осуществить герметизацию и в стеклянном или металлостеклянном корпусе.

Монтаж элементов микросхем осуществляется, как правило, сваркой, причем наряду с термокомпрессионной сваркой все шире внедряются способы сварки импульсным нагревом и с помощью ультразвука, поскольку термокомпрессионная сварка не обеспечивает достаточной надежности при большом числе сварок на одном кристалле и менее производительна. Весьма высокие требования к надежности сварки при заметных колебаниях условий от сварки к сварке не позволяют ограничиться только стабилизацией режимов собственно сварочной установки.

Групповые методы сварки — сразу по несколько выводов с помощью специального инструмента, а также автоматизация процесса наведения инструмента, пока еще не нашли удовлетворительного решения.

Общее число контрольных операций в процессе изготовления изделий микроэлектроники чрезвычайно велико: входной контроль материалов, заготовок, входящих изделий, контроль в процессе изготовления и окончательный контроль и испытание изделий. Стремление уменьшить трудоемкость контрольных операций заставляет разработчиков оборудования изыскивать более эффективные методы контроля и создавать специальную аппаратуру. Так, в последнее время усиленно ведутся работы по применению инфракрасной техники для контроля толщины слоев, концентрации носителей, а также для исследования изделий с целью определения их надежности.

Проверка электрических параметров как в процессе изготовления, так и готовых изделий в большинстве случаев производится на стендах, собранных из универсальных или специальных приборов. Имеются специальные измерительные стенды, позволяющие производить контроль изделий автоматически по многим параметрам, а также испытание микросхем по нескольким десяткам тестов, заранее программируемым с помощью перфокарты или специального запоминающего устройства. В ряде случаев для упрощения стендов контроль производится методом сравнения параметров изделий с эталонными.

### **Подготовка инженерных кадров**

Для микроэлектроники, которая развивается как комплекс теоретического, исследовательского, конструкторского и производственного аспектов, решающее значение



имеет подготовка инженерных кадров. Характерной чертой микроэлектроники является тесная взаимосвязь материалов, приборов, схем и факторов, определяющих разработку системы в целом. Такого рода интеграция ранее почти не связанных (или связанных очень слабо) областей одновременно требует интеграции инженерных знаний.

Если в период интенсивного развития электронных ламп (который начался примерно 40 лет назад) специалисты в области материалов, приборов, схем и систем могли работать практически независимо друг от друга и объем их знаний в связи с этим мог быть специфически ограничен, то при переходе к транзисторам специалистам потребовалось расширить и дополнить свои знания в смежных областях.

Процесс интеграции знаний особенно характерен для специалистов в области микроэлектроники, поскольку в принципе нельзя создавать интегральные микросхемы и системы на их основе, не имея, например, знаний в области свойств материалов и физики процессов, происходящих в различных приборах, используемых в микроэлектронных устройствах.

Опыт Советского Союза, а также других высокоразвитых стран показывает, что темпы развития высшего образования для ряда ведущих отраслей науки и техники должны опережать темпы развития самих этих отраслей, и уже сегодня высшая школа должна готовить специалистов с учетом потребностей завтрашнего дня.

Для обеспечения высокого качества подготовки специалистов учебный институт должен иметь тесную и повседневную связь с промышленностью. Только при этом условии преподаватели института будут постоянно в курсе последних достижений в области производства микроэлектронных изделий и тех технологических и других барьеров, которые мешают развитию микроэлектроники. В учебном институте можно проводить ряд важных исследований по актуальным проблемам поискового характера. Если решение проблемы найдено, то для ее реализации нужно вновь вернуться в промышленность, которая, по сравнению с учебным институтом, располагает более крупной технологической и производственной базой. Таким образом возникнут и прочно установятся своеобразные «обратные связи» между учебным институтом и промышленными предприятиями. Это даст воз-



Можность вооружить специалистов таким подходом к решению стоящих перед ними задач, такими логикой и знаниями, которые позволят им не только успешно работать в области микроэлектроники сегодняшнего дня, но и быстро ориентироваться в случае каких-либо резких перемен в этой бурно развивающейся отрасли науки, техники и промышленного производства.

### 1.3. Большие интегральные схемы

Увеличение функциональной сложности и «плотности упаковки» элементов привело к появлению больших интегральных схем (БИС) \*, в которых вместо отдельных элементов (усилительного каскада, триггера, логической ячейки и т. п.) уже имеются интегральные узлы и даже целые подсистемы (регистр, счетчик, усилитель, преобразователь аналог-цифра, блок памяти и т. п., вплоть до арифметического устройства ЭВМ).

Переход к БИС означает не только дальнейшее усложнение функций, выполняемых интегральными микросхемами, не только повышение надежности (благодаря еще меньшему числу внешних ненадежных соединений) и снижение удельной стоимости элементов, но и одновременное дальнейшее укрупнение «функционального масштаба» в системотехнике. Ожидается, что развитие технологии БИС в 70-х годах приведет к значительному снижению стоимости электронной аппаратуры, повышению ее надежности и уменьшению размеров.

Специалисты предсказывают появление в 70-х годах новой категории схем со сверхвысоким («колоссальным») уровнем интеграции. Уже в настоящее время в лабораторных условиях удалось достичь уровня интеграции около 10 000 элементов на кристалле и обсуждается идея создания на одной кремниевой пластине схемы, которая смогла бы выполнять функции целой ЭВМ [2]. Более высокая степень интеграции БИС приведет к уменьшению временных задержек во внутрисхемных соединениях современных вычислительных машин и таким образом увеличит быстродействие.

---

\* К большим интегральным схемам относят микросхемы, содержащие больше 100 элементов, или микросхемы 3-й степени интеграции и выше, а также микросхемы, изготовленные по высокоточной технологии (например, с многослойной разводкой).

Основными направлениями развития БИС являются:

— полупроводниковые интегральные микросхемы, содержащие свыше 100 элементов, у которых выход годных элементов или элементарных схем на кристалле близок к 100%. Повышение качества технологии уже позволило сократить средний размер элемента в полупроводниковой микросхеме с 0,07 до 0,036 мм<sup>2</sup> и увеличить среднюю площадь кристалла схемы с 1,68 до 4,5 мм<sup>2</sup>. Это дает возможность изготавливать микросхемы с числом элементов 150÷200 (счетчики, регистры, дешифраторы, преобразователи и др.);

— полупроводниковые интегральные микросхемы, изготавливаемые на неразрезаемой пластине кремния. Возможность работы интегральных микросхем, изготовленных на пластинах, которые имеют выход годных микросхем меньше 100%, обеспечивается применением избирательных внутрисхемных соединений и избыточности по элементам;

— полупроводниковые интегральные микросхемы на основе структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-структура). Эти микросхемы из-за малых размеров элементов обеспечивают в настоящее время степень интеграции в несколько тысяч элементов на кристалле. Однако они пока уступают по быстродействию и стабильности параметров микросхемам на биполярных транзисторах;

— гибридные интегральные микросхемы, собираемые на диэлектрических подложках из кристаллов полупроводниковых микросхем с использованием пленочного монтажа. Это направление позволяет получить большие гибридные интегральные микросхемы (ГБИС) с высокой степенью интеграции. Такие микросхемы требуют менее сложной системы проектирования, проще в изготовлении и являются достаточно гибкими с точки зрения специализации их функций и изменений в ходе разработки, а также исправления брака в процессе производства.

Повышение функциональной сложности интегральных микросхем при увеличении степени интеграции ведет к специализации функций, выполняемых схемой, и к сужению области ее применения. Необходимо или значительно расширять номенклатуру выпускаемых микросхем, или изготавливать микросхемы, специализация функций которых может быть проведена быстро и экономически выгодными методами.

При проектировании БИС стремятся выполнить три основных условия:

— организация дешевого и быстрого машинного проектирования вплоть до расчета топологии микросхем и трассировки внутрисхемных соединений;

— автоматическое изготовление масок и фотошаблонов или непосредственная обработка пластин световым или электронным лучом без применения фотошаблонов;

— максимальная стандартизация технологии базовой пластины с целью сокращения расходов, цикла проектирования и производства.

Выполнение этих условий возможно при введении программ машинного проектирования в производственный процесс изготовления БИС.

#### 1.4. Интегральные микросхемы СВЧ диапазона

Сравнительно недавно в микроэлектронике появилось новое направление — интегральные микросхемы СВЧ диапазона. Несмотря на свою относительную новизну, это направление резко выделяется среди других исключительно быстрыми темпами своего развития, а также широтой и разнообразием тех проблем, которые могут быть с помощью него решены. И хотя СВЧ интегральные микросхемы называют «техникой середины 70-х годов», вполне вероятно, что широкое внедрение принципов микроэлектроники в разработку СВЧ аппаратуры произойдет значительно раньше, что позволит строить системы космической связи и телеуправления, а также бортовые и наземные радиолокационные системы на основе интегральных схем СВЧ диапазона [2].

Следует отметить, что переход к интегральной электронике для СВЧ схем является вполне естественным и закономерным, поскольку СВЧ схемы в принципе всегда строились на элементах с распределенными параметрами. Техника СВЧ интегральных микросхем вышла уже из стадии предварительного поиска и поскольку большая часть оборудования и материалов, используемых для изготовления низкочастотных интегральных микросхем, пригодна также для производства СВЧ схем, то в ближайшие годы следует ожидать перевода СВЧ техники на новую, высшую ступень ее развития.

Сравнительная сложность прибора СВЧ не позволяет сразу перейти к высоким уровням интеграции на основе

пленочных или полупроводниковых интегральных микросхем. Хотя в этом направлении сейчас ведется интенсивная работа, практический выход пока находят преимущественно гибридные СВЧ интегральные микросхемы ограниченного функционального назначения с небольшим числом активных элементов. СВЧ интегральные микросхемы как самостоятельные изделия не могут найти столь универсального применения, как, например, цифровые интегральные микросхемы для вычислительной техники, поскольку требуется согласование по СВЧ трактам как с внешними цепями, так и между собой. Но именно на основании этого требования по сути дела все СВЧ устройство превращается в своеобразную большую интегральную схему, элементы которой должны строиться с учетом функциональных характеристик системы.

Значительный выигрыш в стоимости СВЧ устройств связан с возможностью объединения производства элементов и микросхем на базе единой технологии и простотой построения комплексных СВЧ устройств, которое сводится к использованию сравнительно небольшого числа стандартных модулей.

В настоящее время широкое распространение получила технология гибридных СВЧ интегральных микросхем, в которой разделены процессы получения активных элементов и производства самих интегральных микросхем. Эта технология в большей степени связана с традиционной технологией дискретных компонентов и дает возможность сравнительно быстро получать микросхемы с требуемыми характеристиками. Изготовлены в виде гибридных интегральных микросхем СВЧ усилители на транзисторах, генераторы на транзисторно-варакторных цепочках, лавинно-пролетных диодах и диодах Ганна, переключатели и фазовращатели и т. д. Разрабатываются также полупроводниковые монолитные варианты перечисленных устройств. По-видимому, в ближайшие годы будут созданы малогабаритные СВЧ станции, целиком построенные из микросхемных модулей [2].

В микроэлектронике целесообразность и возможность создания мощных источников СВЧ колебаний зависит не столько от мощности отдельных модулей, сколько от их к. п. д., который для этого должен быть не менее 30÷40%. Проблема повышения к. п. д. энергетических активных элементов останется одной из центральных в твердотельной СВЧ электронике в ближайшие несколько лет.

Уже сейчас к. п. д. генераторов на лавинно-пролетных диодах может достигнуть 80% и более, а расчетные к. п. д. генераторов на транзисторах и диодах Ганна также достигают нескольких десятков процентов (20÷40%).

Прогресс в области активных полупроводниковых СВЧ элементов, предназначенных для приема и переработки информации, видимо, связан с созданием элементов, обладающих специфическими функциональными свойствами, поскольку оптимальные частоты их работы лежат вблизи верхней границы диапазона СВЧ. Как правило, это должны быть линейные (триггерные) элементы, потребляющие малую мощность (примерно  $10^{-9}$  вт) при максимальной информативной способности (число бит на 1 вт). Этим требованиям пока не удовлетворяет ни один из существующих СВЧ приборов. По-видимому, необходимы принципиально новые решения, которые следует искать в двух основных направлениях:

— максимального уменьшения размеров элементов до единиц микрон путем полного перехода к системам с сосредоточенными постоянными и использования для их изготовления техники электронных и ионных лучков;

— изыскания и использования новых физических явлений, позволяющих реализовать требуемые функции прямо в объеме или на поверхности твердого тела без формирования микросхемы, состоящей из дискретных пассивных и активных элементов. Это направление, по-видимому, будет основным не только при создании элементов вычислительной техники, но и при реализации монолитных интегральных СВЧ микросхем будущего [7].

По мере развития микроминиатюризации к середине 70-х годов в значительной мере сотрется грань между вакуумными и полупроводниковыми приборами. Близкими станут не только размеры, но и подход к конструированию и технологические методы. Поэтому не исключено, что на основе оптимального синтеза полупроводниковых, диэлектрических и миниатюрных вакуумных элементов будут созданы СВЧ схемы, основанные на использовании всех возможных вариантов взаимодействия между электрическими зарядами и электромагнитными полями [8].



## 1.5. Применение интегральных микросхем в ЭВМ

Крупнейшим потребителем интегральных микросхем являются электронные вычислительные машины (ЭВМ). К началу 70-х годов закончилась эволюция машин трех поколений (на электронных лампах, на транзисторах, на интегральных микросхемах) и уже начато создание ЭВМ четвертого поколения — на больших интегральных схемах.

Полагают, что к 1975 г. почти все имеющиеся ЭВМ на лампах и первые модели ЭВМ на транзисторах будут демонтированы. По мнению американских специалистов, парк ЭВМ в США в 1975 г. достигнет 100—160 тыс. шт. В западноевропейских странах также ожидается сохранение высоких темпов роста парка ЭВМ (особенно малых), который, по данным [7], в 1972 г. составит более 50 тыс. шт. (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Парк ЭВМ стран Западной Европы на начало 1972 г.

ЭВМ	ФРГ	Англия	Франция	Италия	Страны Бенилюкса
Мини	5100	6000	4000	2380	1420
Малые	6200	4000	6320	3000	1900
Средние	2800	3100	2320	1300	800
Большие	300	500	239	12	80
Всего	14400	13600	12879	6800	4200

Парк ЭВМ во Франции в 1975 г. достигнет 20 тыс. шт., а в Японии — 40 тыс. шт.

По мнению многих зарубежных специалистов [7], третье поколение ЭВМ будет существовать еще довольно долго, поскольку фирмы-изготовители не проявляют стремления перейти к производству машин четвертого поколения. Вместе с тем ожидается значительное расширение областей применения ЭВМ. Помимо промышленности, космических исследований, систем обучения, вычислительная техника все увереннее будет вторгаться в интеллектуальные области деятельности человека: юриспруденцию, образование, искусство и др. Предусматривается выпуск вычислительных систем, работаю-

щих в режиме разделения времени и позволяющих осуществлять непосредственное общение «человек — машина». Развитие вычислительной техники будет сопровождаться существенным изменением структуры выпускаемой продукции. Самым характерным является повышение роли окончных устройств, производство которых с 1965 по 1975 гг. должно увеличиться более чем в 50 раз. Ожидается, что каждые пять лет будет достигаться пятикратное улучшение параметров ЭВМ и значительное снижение их стоимости; работоспособность наиболее мощных ЭВМ возрастет в 3—5 раз; будут освоены вычислительные элементы субнаносекундного диапазона; ожидаются большие успехи в области автоматизации программирования.

## 1.6. Применение интегральных микросхем в аппаратуре связи и бытовой аппаратуре

Несмотря на то, что крупнейшим потребителем интегральных микросхем являются ЭВМ, однако, по мнению многих специалистов, аппаратура связи должна в ближайшие годы стать новой широкой областью их применения. В первую очередь ожидается значительная потребность в интегральных микросхемах для телефонной аппаратуры, электронных автоматических телефонных станций (АТС), усилительных устройств дальней телефонной связи и др.

Большим потенциальным потребителем интегральных микросхем считается производство контрольно-измерительной аппаратуры, а также устройств регулирования и автоматизации для промышленных предприятий.

Что касается бытовой аппаратуры, то внедрение в нее интегральных микросхем происходит довольно медленно по двум причинам. Во-первых, к новым элементам обращаются лишь в том случае, если они не удорожают аппаратуру и, во-вторых, линейные интегральные микросхемы, которые необходимы для этой аппаратуры, значительно труднее технически реализовать, чем цифровые. Тем не менее, согласно прогнозам уже в ближайшие годы ожидается широкое применение интегральных микросхем в бытовой аппаратуре.

Предполагается по зарубежным данным [2], что в 1973 г. будет осуществлена полная транзисторизация

черно-белых телевизоров, к 1975 г. все каскады с малым уровнем сигнала (за исключением ПТК) должны собираться на интегральных микросхемах, а к 1980 г. от 80 до 90% всех схем в черно-белом телевизоре будут интегральными. Полная транзисторизация цветных телевизоров ожидается к 1974 г., а к концу семидесятых годов от 80 до 90% всех схем в них будет интегральными. Полный перевод видеомагнитофонов, переносных и автомобильных радиоприемников на интегральные микросхемы будет осуществлен до 1980 г. Радиоприемники, радиогаммофоны (в том числе со стереофоническим звучанием), имеющие выходную мощность до 10 вт, а также магнитофоны будут полностью собираться на интегральных микросхемах. Широкое применение интегральные микросхемы получают в стиральных машинах, нагревательных устройствах и других приборах. В будущем возможно применение интегральных микросхем в небольших ЭВМ для управления приборами в домашнем хозяйстве.

## 1.7. Новые направления микроэлектроники

Рассматривая перспективы развития микроэлектроники на ближайшее десятилетие, полагаем, что, по-видимому, основные усилия будут сосредоточены прежде всего на развитии интегральной электроники как в ее традиционном аспекте (внесение усовершенствований в уже сложившиеся принципы создания интегральных микросхем), так и в нетрадиционном (с попыткой создания интегральных микросхем на основе новых физических явлений).

Для традиционного направления характерно увеличение степени интеграции, снижение потребляемой мощности, увеличение быстродействия, создание интегральных микросхем СВЧ диапазона, освоение выпуска полностью тонкопленочных микросхем (в том числе с пленочными активными элементами), широкое использование ЭВМ в процессе проектирования и производства интегральных микросхем и т. д.

Применение электронных и ионных пучков в производстве интегральных микросхем имеет большие перспективы. Уже в настоящее время на основе «элионной» технологии может производиться осаждение проводящих, резистивных, полупроводниковых и диэлектрических пле-

нок, очистка подложек, экспозиция фоторезистивных слоев, полимеризация органических соединений, химическое разложение, ионное травление, изготовление *p-n* переходов, туннельных диодов, некоторых видов транзисторов, гравировка, микросварка, соединение элементов микросхем и их герметизация, т. е. почти все операции, необходимые для изготовления интегральных микросхем.

На основе анализа достоинств эллионной технологии рассматривается возможность построения линии непрерывного действия с замкнутым технологическим циклом, в которой очистка подложек, легирование и оксидирование полупроводника, нанесение тонких пленок и последующее придание им требуемой конфигурации для получения резисторов, конденсаторов, контактных площадок, межсхемных и внутрисхемных соединений будет производиться с помощью электронных и ионных пушек, обеспечивающих получение как сильно расходящихся, так и остросфокусированных пучков электронов и ионов [7].

Для нетрадиционного направления развития интегральной электроники характерен широкий круг физических исследований в области электронных, оптоэлектронных и оптических явлений с попыткой реализации полученных результатов в виде интегральных микросхем, работа которых будет основана на использовании новых физических принципов. Для этой цели могут быть использованы полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением, электронные явления при фазовых переходах, явления сверхпроводимости, эффекты сильного поля, инжекция носителей тока в аморфных (в частности, стеклообразных) пленках, оптроны, полупроводниковые лазеры, волоконные лазеры, волоконная оптика и др.

Ожидается, что в результате развития интегральной электроники и улучшения технологии интегральных микросхем уже в ближайшие годы большая часть радиоэлектронной аппаратуры будет выпускаться в интегральном исполнении, число элементов на одной пластине возрастет на 2—3 порядка и значительно увеличится надежность аппаратуры.

В области связи широкое развитие получит абонентский видеотелефон; будет организована передача высококачественного телевидения по кабельным линиям, а также стереоскопическое телевидение; для передачи

сообщений будут использованы ЭВМ; основным средством дальней связи станут системы на спутниках, работающие на частотах свыше 10 Гц емкостью в сотни миллионов телефонных каналов, причем для них будет разработана аппаратура в интегральном исполнении; широкое применение для связи на небольшие расстояния найдут лазерные линии на базе полупроводниковых лазеров.

Будут разработаны лазеры на любые волны в диапазоне от инфракрасных до ультрафиолетовых. Широкое применение найдет голография, особенно для запоминания больших массивов информации от ЭВМ.

В связи с непрерывным, геометрически прогрессирующим процессом резкого усложнения функций, выполняемых электронной аппаратурой, интегральная электроника с каждым годом все больше сталкивается с так называемой «тиранией количеств» микроэлементов, которые уже сегодня в комплексной аппаратуре исчисляются десятками и сотнями миллионов.

Возникновение «тирании количеств» носит не случайный, а принципиальный характер, поскольку с применением интегральной электроники пытаются решить проблему создания сложных и сверхсложных устройств, используя традиционные, классические методы схемной радиотехники и дискретные компоненты. Ограниченность функциональных возможностей этих компонентов является причиной резкого возрастания их количества по мере усложнения функций, выполняемых радиоэлектронной аппаратурой.

Для преодоления «тирании количеств» на повестку дня ставится вопрос о создании ЭВМ, способных к адаптации, к обучению, к распознаванию образов и звукосочетаний, что требует конкретной перестройки как систем логики, так и систем памяти. Возникает насущная потребность в создании функциональных сред, которые обеспечили бы адекватное отображение требуемой функции с помощью возникающих в веществе физических явлений. Большие возможности для построения функциональных сред открываются при использовании электрической неустойчивости в полупроводниках, а также электронных явлений, возникающих в фазовых переходах в твердых телах.

Можно ожидать, что в результате процессов образования движения и распада волн объемного заряда в сре-



дах с объемной отрицательной дифференциальной проводимостью (ООДП) и взаимодействия электромагнитных волн с такими средами будут созданы новые полупроводниковые электронные приборы для решения радиотехнических задач, счетно-решающих устройств, автоматики и телемеханики и т. п. В первую очередь должны появиться мощные и малогабаритные генераторы сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. Поскольку в приборах такого типа рассеиваемая мощность выделяется во всем объеме кристалла, удельная мощность этих приборов может быть значительно выше, чем у транзисторов. По теоретическим оценкам ее можно довести до нескольких сотен киловатт на  $1 \text{ см}^2$  площади кристалла (при надлежащем охлаждении). Полагают, что на основе использования ООДП будут созданы высококачественные усилители, преобразователи частот, быстродействующие переключатели и т. д. [8].

Одним из возможных путей реализации функциональных сред является также использование оптоэлектронных явлений, которые, по сравнению с чисто электронными явлениями, имеют ряд несомненных достоинств. Возможность изменения многих параметров световых лучей (амплитуды, направления, фазы, частоты, поляризации) в сочетании с пространственной модуляцией обеспечивает их большую функциональную нагрузку при полной гальванической развязке электрических цепей. Отсутствие гальванической связи между каналами позволяет осуществлять многочисленное ветвление и пересечение световых пучков и реализовать устройства, выполняющие исключительно сложные функции с высокой степенью надежности и малым потреблением мощности.

Анализ развития микроэлектроники показывает, что хотя значение традиционных полупроводниковых интегральных микросхем в ближайшие годы останется основным, но уже в настоящее время ясно видны их предельные ограничивающие возможности.

К основным ограничивающим факторам следует отнести емкостный энергетический барьер, барьер по пропускной способности, барьер, обусловленный электрическими дефектами материала, барьер конструктивной сложности микросхем.

Дальнейший прогресс в микроэлектронике следует ожидать в направлении функциональной электроники.

**Функциональная микроэлектроника** — перспективное научно-техническое направление электроники по созданию приборов и устройств для обработки, передачи и хранения информации на основе сред с динамическими неоднородностями, создаваемыми путем использования новых физических явлений в конденсированных средах.

Расширение круга физических явлений, на которых основывается функциональная микроэлектроника, дает возможность преодолеть или обойти перечисленные выше факторы предельных возможностей полупроводниковых интегральных микросхем.

Так *емкостный энергетический барьер* транзистора может быть преодолен несколькими путями, в которых используются электрически нейтральные носители информации, а именно:

— путем применения оптических каналов обработки информации;

— путем использования движущихся магнитных доменов в качестве носителей информации, а также ряда других явлений, не связанных с зарядом барьерных емкостей.

*Барьер пропускной способности* может быть преодолен, во-первых, применением оптических методов обработки информации, что дает возможность применять многоканальную обработку информации (с числом каналов от  $1 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^8$ ); во-вторых, применением новых физических механизмов усиления и генерации, таких как индуцированное усиление света, ускорение движущихся доменов и т. п.

*Барьер, обусловленный электрическими дефектами материала* в функциональной микроэлектронике, также преодолим. Так, например, устройства на основе движущихся магнитных доменов, практически нечувствительны к электрическим неоднородностям. Поэтому такие устройства являются радиационно стойкими и к тому же не требуют постоянного расхода мощности на хранение информации и ее обработку. Таким образом, функциональная микроэлектроника открывает принципиально новые возможности увеличения надежности и помехозащищенности устройств обработки информации.

И, наконец, функциональная микроэлектроника представляет собой, по существу, единственный и эффективный путь преодоления *барьера конструктивной сложности*, где ее возможности проявляются особенно ярко.

В функциональной микроэлектронике (рис. 1.3) [39] начинают использовать:

1. Оптические явления (когерентная и некогерентная оптика, нелинейная оптика, электрооптика, магнетооптика). Свойства, отличающие их от электрического тока, связанные со свойствами светового потока, следующие:

— зарядовая нейтральность, однонаправленность, отсутствие гальванических связей и электрических контактов;

— двумерность светового потока, а следовательно, возможность осуществлять многоканальную обработку информации;

— высокая несущая частота и, следовательно, большая полоса пропускания каналов обработки информации.

Эти особенности стали основой бурно развивающегося направления функциональной микроэлектроники — *оптоэлектроники*.

2. Физические явления, связанные с взаимодействием потока электронов с акустическими волнами в твердом теле, такие, как генерация и усиление акустических волн потоком электронов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, обусловили появление нового направления функциональной микроэлектроники — *акустоэлектроники*. Особенность этих явлений заключается в малой скорости распространения акустических волн ( $1 \cdot 10^5$  см/сек) в отличие от электромагнитных ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек), что позволяет реализовать миниатюрные линии задержки, фильтры с заданными частотными свойствами, а также усилители СВЧ.

Преимущество этого направления состоит в том, что реализация заданной функции обеспечивается лишь выбором конфигурации устройства.

3. Новые магнитные материалы (*слабые ферромагнетики* и магнитные полупроводники), появление которых привело к созданию нового направления — *магнитоэлектроники*. Отличительной особенностью слабых ферромагнетиков является малая по сравнению с классическими магнитными материалами намагниченность насыщения. Это позволяет управлять движением *магнитных неоднородностей «пузырей»* — в двух и трех измерениях слабыми магнитными полями и осуществлять тем самым функции хранения, перемещения и обработки больших объемов информации.

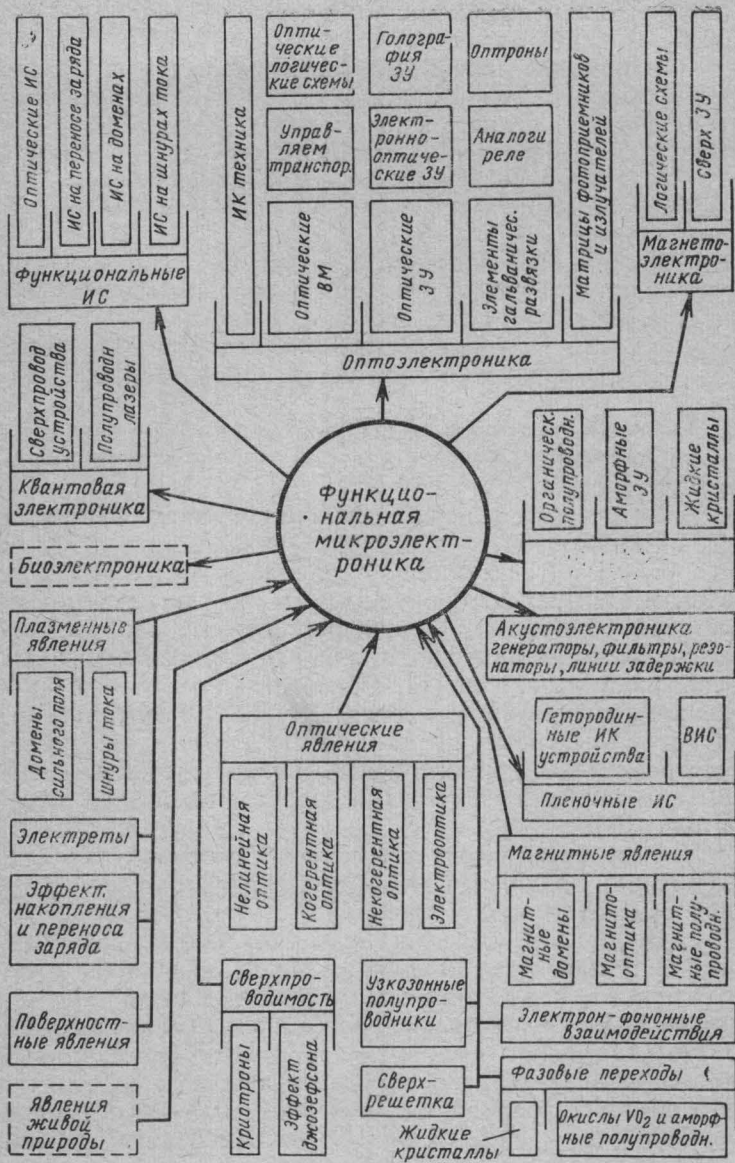


Рис. 1.3. Ориентировочная схема развития функциональной микроэлектроники.

Характерные размеры «пузырей», составляющие примерно 1 мкм, позволяют достичь высокой плотности записи информации ( $1 \cdot 10^8$  бит/см<sup>2</sup>). Большое преимущество таких систем состоит в том, что хранение информации осуществляется без питания, а перемещение «пузырей» — с малым рассеянием мощности. Ряд новых материалов — магнитных полупроводников, обладающих особенностями магнетиков и полупроводников, позволяют создавать приборы с большой функциональной гибкостью.

4. Покоящиеся и движущиеся электрические неоднородности (домены и шнуры) в однородных полупроводниках, исследование которых стимулировало создание функциональных интегральных микросхем. Поскольку здесь речь идет об однородном материале, то реализация заданной функции может быть достигнута выбором соответствующей конфигурации устройства. Высокие скорости движения неоднородностей электрического поля ( $1 \cdot 10^7$  см/сек) дают возможность достигнуть высокого быстродействия (меньше  $1 \cdot 10^{-9}$  сек), а также генерации и усиления в СВЧ диапазоне.

Другим типом управляемых электрических неоднородностей в однородном материале являются заряды в потенциальных ямах в приэлектродной области. И здесь выполнение заданных функций достигается топологией контактов. Чрезвычайно перспективным является совмещение принципа переноса заряда в потенциальных ямах с захватом и хранением заряда в приповерхностном слое (электретный эффект), что позволяет совместить долговременное хранение больших объемов информации и ее обработку.

Интересные перспективы открывают полупроводники со сверхрешетками, используемые явления в которых искусственно создаются периодическим распределением состава. В таких системах следует ожидать осцилляций вольт-амперных характеристик и связанных с этим усиления и генерации электромагнитных волн с перестраиваемой электрическим полем частотой.

Явления, связанные с изменением структуры конденсированных тел на молекулярном уровне, привели к возникновению нового направления — *функциональной микроэлектроники*. К этому направлению относятся фазовые переходы в твердых телах и жидких кристаллах, сопровождающиеся резкими изменениями электрических, оптических и магнитных свойств. Связанная



С этим высокая чувствительность к внешним воздействиям позволяет легко осуществлять целый ряд операций по управлению и преобразованию потоков информации в различных функциональных системах.

Интересными материалами с еще не вполне раскрытыми перспективами использования их в микроэлектронике являются органические полупроводники.

Явления холодной эмиссии позволили создать *вакуумные электронные приборы* в микроэлектронном исполнении с применением пленок. Обладая всеми достоинствами вакуумных приборов (высокие входные сопротивления, малые шумы), они характеризуются чрезвычайно высокой радиационной стойкостью, очень малыми размерами, высокими рабочими частотами.

Явления живой природы, в частности на молекулярном уровне, позволяют использовать принципы хранения и обработки информации в живых системах для создания сверхсложных систем обработки информации, приближающихся по своим функциональным возможностям к человеческому мозгу (искусственный интеллект), а также решить проблему эффективной связи «человек—машина». Эти явления открывают новое направление — *биоэлектронику*. Развитие этого направления может привести к научно-техническому перевороту в электронике, последствия которого в настоящее время даже трудно предвидеть.

## Полупроводниковые интегральные микросхемы

---

Полупроводниковая интегральная микросхема состоит из пассивных и активных элементов, изготовленных в одном монокристалле полупроводника. На основе использования достижений физики твердого тела с помощью сложного комплекса физических, химических, схемотехнических, технологических и других методов и приемов удается направленно изменять в микрообъемах свойства полупроводникового материала и решать проблему создания высоконадежных микроминиатюрных электронных схем.

В настоящее время для изготовления полупроводниковых микросхем используются в основном монокристаллический кремний, германий, арсенид и фосфид галлия. Размеры одной полупроводниковой микросхемы в среднем равны  $1 \text{ мм}^2$ , а число активных и пассивных элементов в ней достигает десятков и сотен штук. Размеры элементов в микросхеме равны единицам и десяткам микрон, а соединение элементов внутри нее осуществляется частично непосредственно в объеме кристалла, а частично на защитном его слое либо напылением, либо внешними проводниками. Осуществляя коммутацию элементов на базовом кристалле, можно легко получать различные виды схем без изменения технологического процесса.

Для изготовления полупроводниковых микросхем используются в основном пластинки кремния диаметром 30—50 мм, на которых размещается 300—500 микросхем. Изготовление этих микросхем ведется одновременно, так называемым групповым методом. Благодаря этому осуществляется автоматизированное массовое производство микросхем. Даже при сравнительно небольшом проценте выхода годных микросхем порядка  $10 \div 20\%$  стоимость их достаточно низкая. Для обеспечения высокого процента выхода годных микросхем необходима очень высокая технологическая культура, сложное первоклассное оборудование и особо чистые материалы.

Основным преимуществом полупроводниковых интегральных микросхем является сравнительно простая тех-

нология изготовления большого числа высококачественных активных элементов и хорошая их защита. Это учитывается при разработке схмотехники полупроводниковых интегральных микросхем. Защита может осуществляться простым окислением поверхности кремния или же напылением на его поверхность другой защитной пленки.

Полупроводниковые интегральные микросхемы имеют и некоторые недостатки. В твердом теле значительно труднее получать сопротивления резисторов заданной величины, так как оно зависит не только от толщины легированного слоя полупроводника, но и от распределения удельного сопротивления по толщине. Доводка сопротивления до номинального значения после изготовления резистора также представляет значительные трудности, и эта задача до сих пор полностью не решена. Кроме того, полупроводниковые резисторы обладают заметной температурной зависимостью, что осложняет разработку микросхем. В полупроводниковых интегральных микросхемах весьма трудно, хотя и возможно в определенных пределах, создавать конденсаторы и индуктивные элементы. К недостаткам этих микросхем следует отнести также наличие большого числа паразитных связей между элементами. Это надо учитывать при разработке микросхем и отработке технологических процессов их изготовления.

Однако несмотря на отмеченные недостатки, полупроводниковые интегральные микросхемы являются в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений микроэлектроники, позволяющим решать основные современные задачи микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры. При хорошо отработанной технологии, автоматизации производства и испытаний можно получать полупроводниковые интегральные микросхемы значительно надежнее и дешевле, чем соответствующие схемы из навесных компонентов.

## 2.1. Основные технологические процессы

Изготовление полупроводниковых интегральных микросхем — весьма сложный технологический процесс, включающий более ста операций. К основным операциям этого процесса относится: изготовление фотошаблонов,

подготовка пластин кремния и эпитаксия, фотолитография, диффузия, внутрисхемные соединения элементов, резка пластины и присоединение выводов, монтаж кристалла в корпусе и испытания микросхемы.

**Изготовление фотошаблонов.** Для производства полупроводниковой интегральной микросхемы каждого типа изготавливается комплект совмещающихся между собой фотошаблонов.

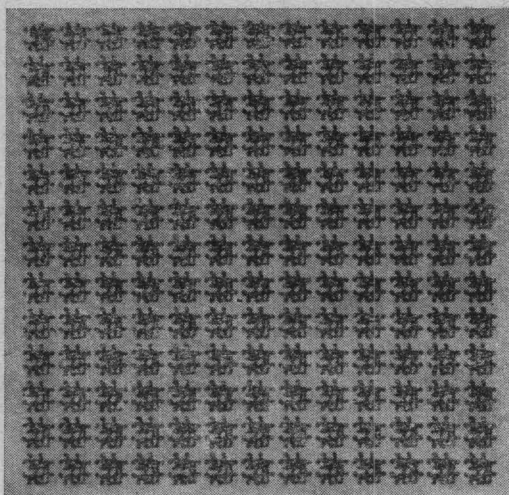


Рис. 2.1. Фотошаблон для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем.

Фотошаблон представляет собой стеклянную фотопластинку, на которой с весьма высоким разрешением выполнен рисунок, подлежащий переносу на полупроводниковую пластину и обеспечивающий заданную топологическую конфигурацию отдельных элементов микросхемы (рис. 2.1). Для изготовления одной микросхемы, в зависимости от ее сложности, необходим комплект фотошаблонов, состоящий из 3—10 шт., а иногда и более. Для изготовления фотошаблона вычерчивается или вырезается оригинал с большим увеличением элементов схемы, внутрисхемных соединений и базовых отметок (для совмещения). Затем оригиналы фотографируют с уменьшением размеров и размножают в пределах од-

ного и того же негатива так, чтобы на площади порядка  $25 \times 25$  мм разместить несколько сот идентичных рисунков. Полученный таким образом фотошаблон является эталонным и должен быть высокого качества, так как используется затем для производства копий методом контактной печати.



Рис. 2.2. Общий вид координатографа.

Оригиналы изображений могут вычерчиваться с помощью ручного (рис. 2.2) или автоматического координатографа. Размножение рисунка на негативе производят с помощью специального фотоштампа (рис. 2.3). Современная техника производства фотошаблонов позволяет получать изображения с шириной линии 1—3 мкм.

Комплект готовых фотошаблонов, необходимый для получения данной микросхемы, используется затем последовательно в установленном порядке в соответствии с принятой топологией. При этом ошибки совмещения часто накапливаются, так что разброс параметров схемы определяется в основном точностью фотошаблонов. Изготовление фотошаблонов — процесс весьма дорогостоящий, и поэтому следует иметь в виду, что изменение величины любого из элементов микросхемы может потребовать переделки всего комплекта фотошаблонов.



Этапы развития процессов изготовления фотошаблонов и фотолитографии приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Этапы развития процессов изготовления фотошаблонов и фотолитографии**

Параметр	Допуск, <i>мкм</i>	Изменение параметров по годам, <i>мкм</i>				
		1971	1972	1973	1974	1975
Точность шага мультипликации	$\pm 3\sigma$	1,5	1,5	1,0	1,0	0,7
Точность воспроизведения размера на фотошаблоне	$\pm 3\sigma$	1	0,7	0,5	0,4	0,3
Точность совмещения	$\pm 3\sigma$	1,5	1,0	1,0	0,7	0,7
Точность воспроизведения размера при фотолитографии	$\pm 3\sigma$	2,0	1,5	1,0	0,7	0,5
Допуск на совмещение рисунка на пластине	$\pm (3\sigma - 1)$	5	4,5	3,4	3,0	2,5

**Подготовка пластин кремния и эпитаксия.** Для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем в большинстве случаев используется монокристаллический кремний. Круглый слиток кремния соответствующего диаметра разрезается на пластины толщиной 0,2÷0,4 мм, которые тщательно шлифуются и полируются специальными составами (например, алмазной пудрой). На рис. 2.4 показаны основные операции по подготовке кремниевых подложек. Наиболее важными из них являются процессы, связанные с окончательным удалением нарушенного слоя путем травления подложек смесью азотной, плавиковой и уксусной кислот, электрохимическим полированием или травлением безводным хлористым водородом. Неровности на поверхности пластины не должны превышать 0,1 мкм, что соответствует 14-му классу чистоты обработки.

При изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем в настоящее время используется эпитаксиальный процесс, представляющий собой выращивание тонкой пленки монокристаллического кремния, осаждаемого

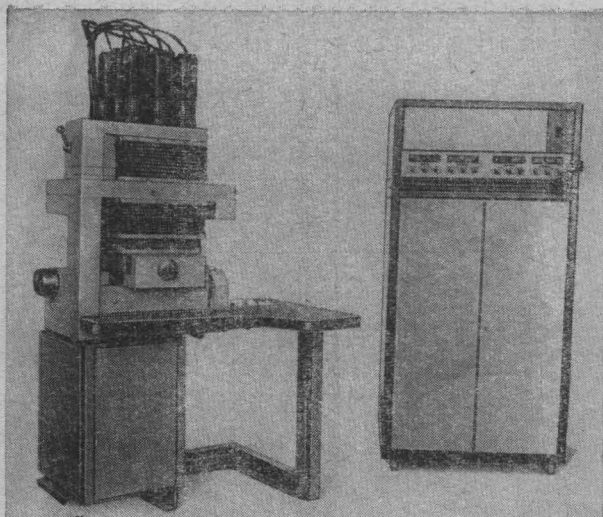


Рис. 2.3. Общий вид фотоштампа.

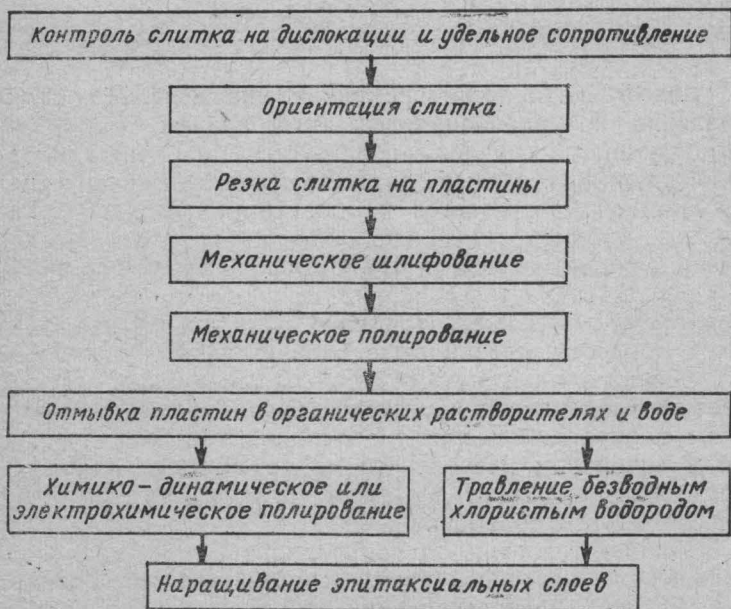


Рис. 2.4. Основные операции по подготовке кремниевых подложек.

из газовой фазы на готовую монокристаллическую пластину из того же материала, Эпитаксия осуществляется нагреванием кремниевой пластины в специальной установке (рис. 2.5) при температуре порядка  $1200^{\circ}\text{C}$  в атмосфере водорода. При добавлении в атмосферу водорода тетрахлорида кремния последний разлагается и на крем-

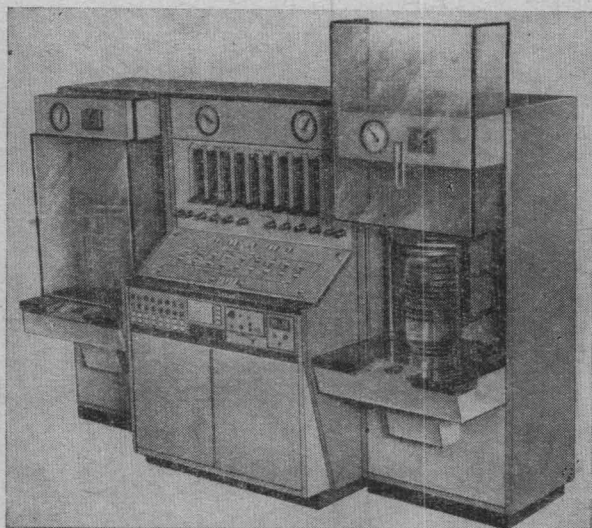


Рис. 2.5. Общий вид установки для эпитаксиального наращивания слоев кремния.

ниевую пластину осаждается чистый кремний той же кристаллической структуры, что и подложка. В газ можно добавить легирующую примесь, например, хлорид фосфора, который, осаждаясь вместе с кремнием, дает эпитаксиальный слой *n*-типа. Толщина слоя зависит в основном от времени процесса. Обычно получают пластины с толщиной слоя  $10 \div 20$  мкм с удельным сопротивлением  $0,5 \div 1,0$  ом·см.

Эпитаксиальные слои можно получать и на диэлектрических подложках (сапфире, рубине, флюорите и др.). Применение диэлектрических подложек обеспечивает высокую изоляцию между элементами в микросхеме и улучшает электрические характеристики элементов.

Весьма перспективным является разработка технологии получения многослойных эпитаксиальных кремниевых структур с резкими  $p-n$  переходами, а также структур типа полупроводник — изолятор (эпитаксиальный слой с окисной или нитридной пленкой), что значительно сократит технологический цикл производства полупроводниковых микросхем.

**Фотолитография.** После получения эпитаксиального слоя производится выращивание на пластине пленки двуоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), которая в последующем служит защитным слоем при проведении диффузии. Пленку двуоксида кремния получают нагреванием пластины в атмосфере кислорода до температуры порядка  $1000^\circ\text{C}$ .

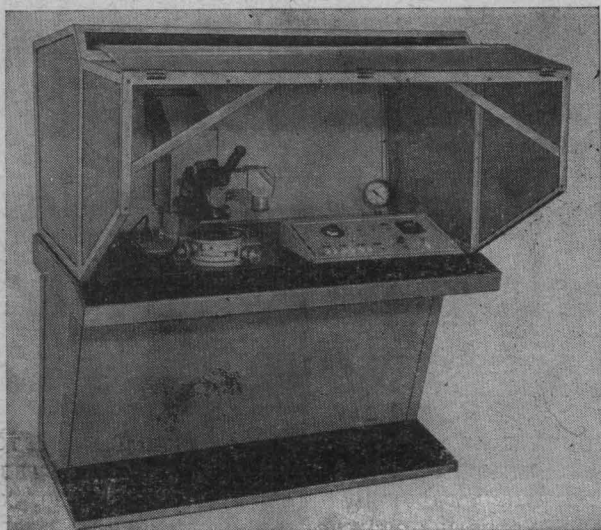


Рис. 2.6. Общий вид установки совмещения.

Толщину пленки получают примерно  $3000\div 6000 \text{ \AA}$  и контролируют ее путем регулировки температуры и влажности атмосферы.

На окисленной пластине методом фотолитографии создаются на поверхности кремния свободные от окисла

участки требуемой конфигурации. В процессе фотолитографии на поверхность окисла кремния наносится с помощью центрифуги тонкая пленка специального состава, называемого фоторезистом, который чувствителен к свету подобно обычной фотоэмульсии и обладает способностью выдерживать действие агрессивных сред, в частности плавиковой кислоты, применяемой для травления окисла кремния. На высушенный слой фоторезиста накладывается фотошаблон и производится экспонирование под ультрафиолетовым источником света на специальном приборе, называемом установкой совмещения (рис. 2.6). В засвеченных участках фоторезист полимеризуется, а в остальных остается неизменным. После экспозиции фоторезист проявляется и затем промывается в деионизованной воде для удаления неполимеризовавшегося материала. Пластина с оставшимся фоторезистом подвергается сушке при 150—200 °С. Далее производится травление в специальном составе из плавиковой кислоты, фтористого аммония и воды с целью удаления незащищенного слоя окисла кремния. На участки пластины, защищенные фоторезистом, травитель не действует. После травления фоторезист удаляется органическим растворителем или горячей серной кислотой. Теперь пластина имеет вытравленные «окна» для проведения диффузии и создания коллекторов транзисторов, баз диодов и сопротивлений.

**Диффузия.** В процессе диффузии на пластине создаются локальные участки кремния *n*- и *p*-типа, составляющие основу полупроводниковой интегральной микросхемы. Сущность диффузии состоит в следующем: пластинку кремния нагревают до температуры, при которой коэффициент диффузии примесей достаточно велик, и пропускают пары примеси, смешанные с несущим газом, над поверхностью кремния. Наиболее часто для образования участков *n*-типа используется фосфор, а участков *p*-типа — бор.

Диффузия вводимой примеси происходит при температуре 1100÷1200 °С от поверхности пластины в глубь ее за счет предварительно создаваемой высокой поверхностной концентрации атомов примеси. Изменение концентрации примеси по глубине полупроводниковой пластины может регулироваться поверхностной концентрацией, длительностью диффузии и температурой процесса. При прочих равных условиях накопление диффундирую-



щей примеси в различных точках пластины описывается уравнением Фика и является функцией времени

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2},$$

где  $N$  — концентрация примеси,  $t$  — время диффузии,  $x$  — глубина проникновения диффундируемой примеси,  $D$  — коэффициент диффузии.

Из этого уравнения видно, что производная концентрации по времени всегда переменна и поэтому в объеме полупроводника получить равномерное распределение диффундируемой примеси практически невозможно. Пределы растворимости примесей в кремнии не позволяют на практике проводить последовательно более трех диффузий.

Диффузия проводится в специальных печах (рис. 2.7), обеспечивающих температуру  $1000 \div 1250^\circ\text{C}$  для всей рабочей зоны печи (до  $40\text{ см}$ ) с отклонением  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Оставшиеся на пластине слои двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) служат маской в последующей операции диффу-

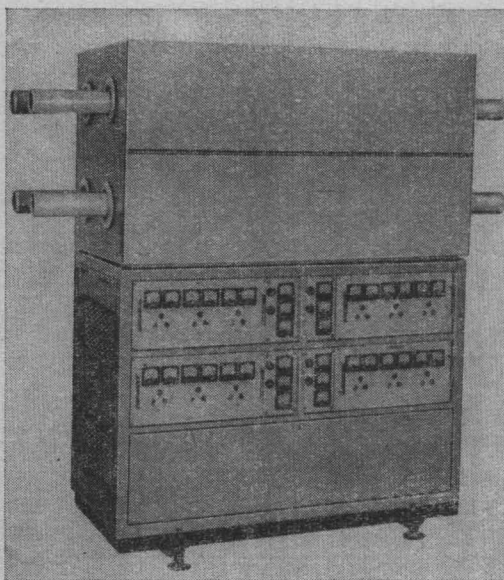


Рис. 2.7. Общий вид диффузионной печи.

зии. Обычно применяемые диффузаны (бор и фосфор) диффундируют гораздо медленнее в  $\text{SiO}_2$ , чем в кремний. Поэтому фосфор, например, проникает в кремний только на тех участках, с которых в процессе фотолитографии был удален слой  $\text{SiO}_2$ . Таким образом, в объеме кремниевой пластины *p*-типа создаются локальные области *n*-типа, которые выполняют функции коллекторов транзисторов, баз диодов или сопротивлений.

Затем проводится повторная операция окисления и второй цикл фотолитографии. Она подобна первой, но усложняется необходимостью совмещения изображения фотошаблона с уже полученным на пластине. Точность совмещения должна быть не менее 1 мкм. В процессе второго цикла фотолитографии в окисле кремния вытравливают участки, в которых проводят второй цикл диффузии (диффузию бора). В результате создаются области *p*-типа; они служат базами транзисторов и эмиттерами диодов.

Следующий, третий цикл фотолитографии и диффузии, приводит к созданию областей *n*-типа, служащих эмиттерами транзисторов и контактными площадками для резисторов, конденсаторов, коллекторов транзисторов и баз диодов.

*Внутрисхемные соединения на пластине и номинальные значения элементов.* После создания активных и пассивных элементов интегральной микросхемы необходимо обеспечить соединения между этими элементами. Для этой цели вновь производят окисление поверхности пластины и в слое двуокиси кремния вытравливают «окна», где необходимо делать контакты к каждому из элементов схемы. Затем на поверхность всей пластины методом вакуумного напыления наносят тонкое металлическое покрытие. В качестве металла обычно используется алюминий, потому что он имеет хорошую адгезию с окисью кремния, а также образует надежный омический контакт как с *n*-, так и *p*-областями в кремнии. После этого методом фотолитографии формируют схему соединений между элементами полупроводниковой микросхемы. Ненужные участки алюминиевого покрытия стравливают, после чего остаются только соединительные линии между транзисторами, резисторами и диодами.

В полупроводниковых микросхемах в соответствии с современными технологическими возможностями можно получать сравнительно ограниченные номинальные

значения элементов, которые надо учитывать при обработке схемотехнических решений.

*Диффузионные резисторы* в полупроводниковой интегральной микросхеме характеризуются следующими данными:

- поверхностное сопротивление  $100 \div 400$  ом/квadrat;
- сопротивление  $100$  ом  $\div$   $30$  ком;
- производственный допуск  $\pm 5 \div \pm 20\%$ ;
- температурный коэффициент сопротивления  $(50-5000) \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ .

Такие резисторы имеют широкие допуски и большие температурные коэффициенты. Лучше всего их применять в схемах, где используется отношение сопротивлений, а не их абсолютные значения.

Для *диффузионных конденсаторов*, использующих *p-n* переходы в качестве емкости, характерны следующие параметры:

- напряжение пробоя до  $70$  в;
- емкость до  $2400$  пф/мм<sup>2</sup>;
- допуск  $15 \div 50\%$ ;
- температурный коэффициент около  $200 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ .

Емкость таких конденсаторов зависит от приложенного напряжения, его полярности и является обратной функцией напряжения пробоя.

*Транзисторы* в полупроводниковых интегральных микросхемах обычно создаются маломощные переключающие, высокочастотные и низкочастотные. Можно получать высокочастотные транзисторы с частотой отсечки до  $1000$  Мгц и выше.

*Диоды* в полупроводниковых интегральных микросхемах создаются двух типов: низковольтный диод, эквивалентный переходу эмиттер — база транзистора, и диод, рассчитанный на среднюю величину напряжения, эквивалентный переходу коллектор — база. Максимальная величина обратного смещения для диода с высоким быстродействием (эмиттер — база) составляет  $5$  в, а для диода со средним быстродействием (коллектор — база)  $30$  в. Ток утечки при нормальных условиях не более  $10$  ма.

**Резка пластины и присоединение выводов.** Кремниевая пластина, на которой изготовлено несколько сотен интегральных микросхем, должна быть подвергнута испытаниям на функционирование отдельных микросхем. Эти испытания проводятся при помощи многозондовой

головки (рис. 2.8), которая контактирует с контактными площадками на кристалле. Те микросхемы, которые не выдерживают испытаний, маркируются и после разрезания пластины изымаются.

После необходимых испытаний полупроводниковая пластина разрезается на отдельные кристаллы, содержащие интегральные микросхемы. Разрезание пластины на кристаллы производится несколькими способами, основ-

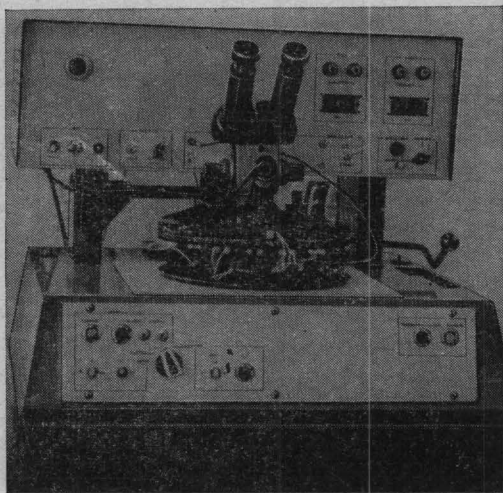


Рис. 2.8. Многозондовая головка для испытания полупроводниковых интегральных микросхем на пластине.

ными из которых являются: скрайбирование и раскалывание, разрезание травлением и разрезание ультразвуком.

При скрайбировании на поверхности кремниевой пластины алмазным резцом, на специальной установке (рис. 2.9) наносится сетка линий, разделяющих отдельные микросхемы. Затем пластину изгибающим усилием разламывают по этим линиям на отдельные кристаллы, содержащие микросхемы.

При разрезании травлением пластину покрывают слоем парафина или фоторезиста, после чего непокрытые граничные участки вытравливают. Разрезание пластины

ультразвуком производится путем воздействия ультразвуковых колебаний на абразивную суспензию, которая через специальные отверстия в головке преобразователя разрезает кремниевую пластину. Наибольшее распространение на практике получил метод скрайбирования.

После разрезания отдельные интегральные микросхемы очищают от кремниевой пыли и других посторонних частиц. Далее полупроводниковая интегральная микро-

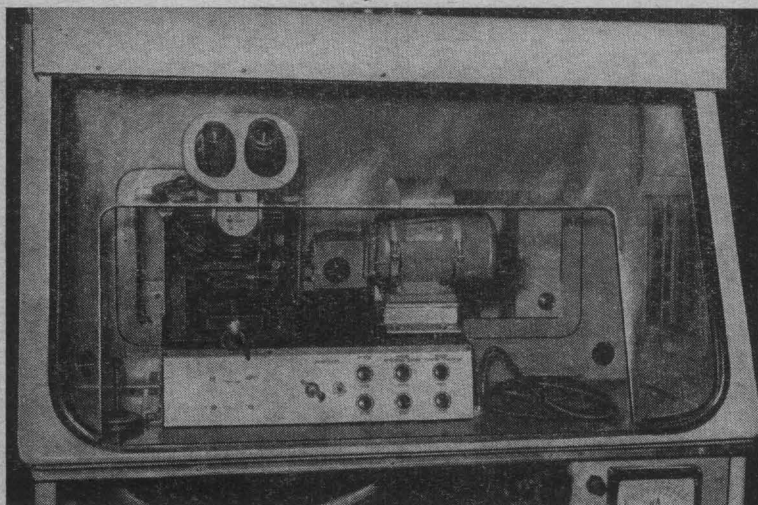


Рис. 2.9. Общий вид установки скрайбирования полупроводниковых интегральных микросхем.

схема крепится к основанию корпуса, после чего контактные площадки на кремнии соединяются тонкой золотой проволокой с соответствующими выводами на корпусе.

Для полупроводниковых микросхем используется несколько способов выполнения электрических соединений контактных площадок с выводами в корпусе. Наибольшее распространение получила термокомпрессионная сварка, при которой полупроводниковый кристалл нагревается до  $350 \div 370^\circ\text{C}$  и золотая проволока диаметром  $20 \div 25$  мкм присоединяется к контактной площадке (рис. 2.10) путем прижатия под давлением  $350 \div 700$  кг/см<sup>2</sup> для германия и  $1400$  кг/см<sup>2</sup> для кремния в те-



чение  $5 \div 10$  сек. При этом образуется прочный контакт между проволочкой и площадкой.

Для соединения контактных площадок микросхем с выводами в корпусе разработано несколько видов различных установок, в том числе для ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом. Общий вид одной из таких установок показан на рис. 2.11. С помощью этой установки можно присоединять

круглые (диаметром  $0,02-0,1$  мм) и плоские (толщиной до  $0,05$  мм) проволоки из золота, алюминия, меди к тонким пленкам из алюминия, золота, меди, тантала, никеля, нанесенным на полупроводниковые и диэлектрические подложки.

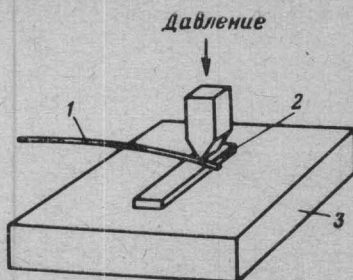


Рис. 2.10. Соединение контактных площадок микросхем с выводами в корпусе методом термокомпресии:

1 — проволока; 2 — контакт; 3 — нагретый полупроводник.

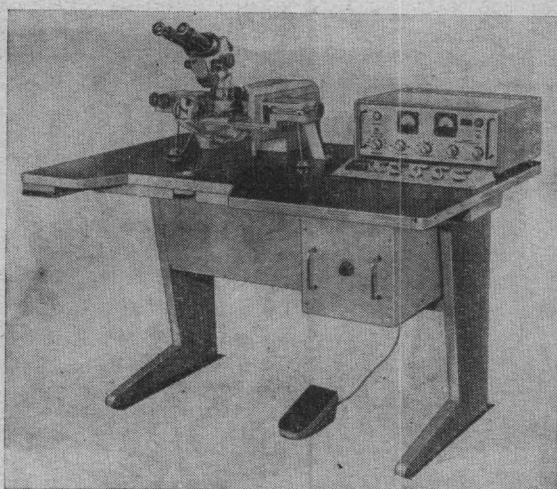


Рис. 2.11. Общий вид установки для ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом типа УЗСКН-1.

**Монтаж в корпусе.** Корпус интегральной схемы должен иметь достаточную механическую прочность, небольшие размеры, хорошую герметичность и обеспечивать высокие электрические характеристики схемы. Для полупроводниковых микросхем применяются в основном следующие типы корпусов:

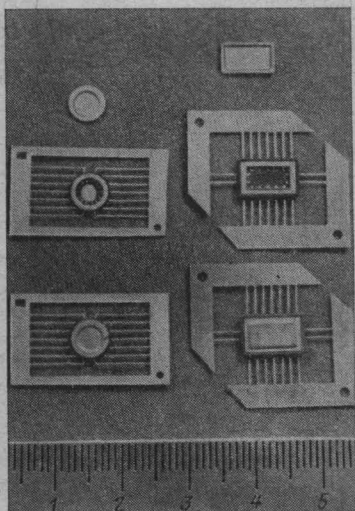


Рис. 2.12. Плоские металлоглазные или керамические корпуса для полупроводниковых интегральных микросхем с 14-ю выводами (тип I).

— корпуса (тип I) прямоугольной или круглой формы с выводами, расположенными параллельно монтажной плоскости корпуса (рис. 2.12);

— корпуса (тип III) прямоугольной формы с выводами, расположенными с двух сторон и изогнутыми перпендикулярно монтажной плоскости корпуса (рис. 2.13);

— корпуса (тип IV), имеющие форму круглого цилиндра, с выводами, расположенными по кругу с одной из плоских сторон цилиндра перпендикулярно монтажной плоскости корпуса (рис. 2.14).

Прямоугольный плоский корпус (рис. 2.12) имеет габаритные размеры  $9,8 \times 6,5$  мм, высоту 2 мм и 14 выводов при шаге 0,625 мм. Корпус третьего типа (рис. 2.13) имеет размеры  $19,5 \times 6,5$  мм, высоту 5 мм и 14 выводов при шаге 2,5 мм. Как правило этот корпус изготавливается из пластмассы. Круглые корпуса (тип IV) имеют диаметр 9,5 мм, высоту 4,6 мм, 8 или 12 выводов. Эти корпуса имеют форму корпуса типа ТО-5, широко применяемого для полупроводниковых приборов и изготавливаются из металла.

Кристалл полупроводниковой микросхемы закрепляется на основании корпуса; выводы микросхемы соединяются с ножками корпуса с помощью золотых или алюминиевых проволочек диаметром 20—25 мкм. Далее

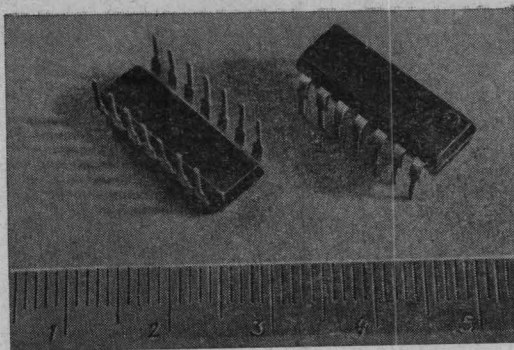


Рис. 2.13. Плоский пластмассовый корпус для полупроводниковых микросхем с 14-ю выводами (тип III).

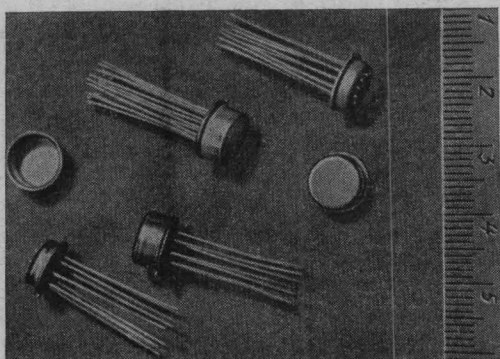


Рис. 2.14. Круглые металлостеклянные корпуса с 8-ю и 12-ю выводами (тип IV).

производится электрическая проверка интегральных микросхем и герметизация корпуса путем пайки или сварки крышки корпуса с его основанием.

## 2.2. Методы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем

В настоящее время наиболее широко применяется планарно-эпитаксиальная технология при изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем. При этом основными методами являются метод изоляции элементов в микросхеме с помощью *p-n* переходов, метод

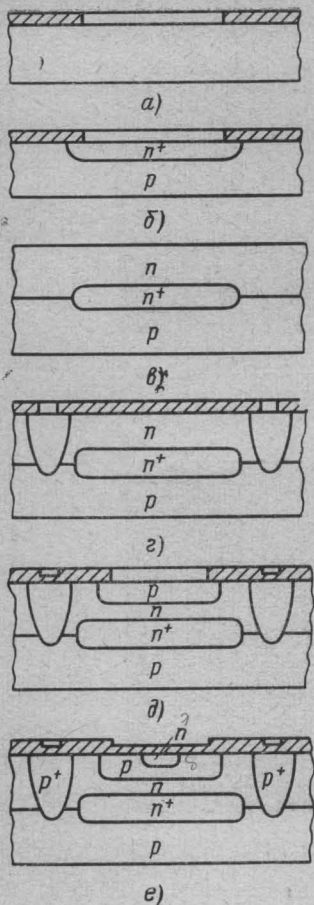


Рис. 2.15. Последовательность основных процессов для получения интегрального транзистора:

*а* — окисление и вскрытие окна для создания  $p^+$ -слоя; *б* — диффузия для получения  $p^+$ -слоя; *в* — снятие окисла и наращивание эпитаксиального  $n$ -слоя; *г* — окисление и проведение разделительной диффузии; *д* — диффузия для получения базы; *е* — диффузия для получения эмиттеров.

изоляции элементов дву-окисью кремния и «совмещенный» метод. Рассмотрим кратко эти методы [18].

### Метод разделительной диффузии

Последовательность основных процессов для получения интегрального транзистора этим методом показана на рис. 2.15: диффузия донорной примеси для получения  $n^+$ -слоя, проводимая перед наращиванием эпитаксиального слоя; эпитаксиальное наращивание  $n$ -слоя; диффузия акцепторной примеси для разделения элементов (разделительная диффузия); диффузия акцепторной примеси для создания базы; диффузия донорной примеси для получения эмиттера; диффузия золота; травление окисла перед металлизацией; создание контактов и внутрисхемных соединений путем металлизации пластины; контроль схем на пластине, их сборка и герметизация.

**Диффузия для получения  $n^+$ -слоя, проводимая перед эпитаксиальным наращиванием, проводится в подложку для получения более низкого коллекторного сопротивления насыщения.** Сначала пластина кремния  $n$ -типа подвергается окислению в атмосфере сухого кислорода при  $T \approx 1000^\circ\text{C}$ , затем фотогравировкой окисла создаются

окна, шириной несколько большей ширины коллекторного перехода: через окна проводят диффузию сурьмы или мышьяка, в результате появляется хорошо проводящая область под коллектором будущего транзистора.

**Эпитаксиальное наращивание.** Производится удаление окисла со всей поверхности пластины и выращивание эпитаксиального слоя. Эпитаксиальный слой обладает проводимостью  $n$ -типа и необходимым для изготавливаемой схемы определенным удельным сопротивлением.

Эпитаксиально выращенный слой кремния имеет ту же кристаллическую структуру, что и кремниевая подложка, на которой выращен этот слой, создаваемый путем восстановления тетрахлорида кремния при температуре около  $1200^\circ\text{C}$ . Параметры эпитаксиального слоя влияют на электрические характеристики микросхем, поэтому особенно важно контролировать концентрацию примесей, толщину и кристаллическое совершенство этого слоя. Например, концентрация примесей в эпитаксиальном слое определяется необходимыми величинами пробивного напряжения, сопротивления насыщения и емкости перехода база — коллектор; эти параметры являются важнейшими характеристиками транзистора.

**Разделительная диффузия.** На поверхности пластины с эпитаксиальным слоем получают окисную пленку толщиной примерно  $1\ \mu\text{м}$  в высокотемпературной окислительной среде. После этого при помощи фотолитографии с определенных участков поверхности селективно удаляют окисную пленку. Диффузию проводят в те участки поверхности, с которых была снята окисная пленка. Часто применяется двухстадийный процесс диффузии: сначала производится осаждение диффузанта на пластину, затем пластина подвергается термообработке.

Далее проводят диффузию бора при температуре примерно  $1100^\circ\text{C}$  в течение  $20\ \text{мин}$  и продолжают процесс в атмосфере осушенного кислорода при  $T \approx 1250^\circ\text{C}$  в течение  $3\ \text{час}$ , после чего в эпитаксиальном слое толщиной  $15\ \mu\text{м}$  появляются изолированные области.

**Диффузия для создания базы транзистора.** Для создания базовых областей транзисторов, сопротивлений и диодов в область  $n$ -типа проводится диффузия акцепторных примесей через окна в окисной пленке. Величина диффузионного сопротивления определяется шириной, длиной и поверхностным сопротивлением диффузионной области. Для получения нужного распределения примеси



необходимо произвести диффузию примеси в высокотемпературной атмосфере, затем продолжить ее с одновременным окислением поверхности. В качестве акцепторной примеси используется бор. Диффузия бора проводится при температуре около  $950^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин, в последующие 30 мин диффузия продолжается при температуре  $1200^{\circ}\text{C}$  в атмосфере влажного кислорода. При этом одновременно происходит окисление поверхности. Величина поверхностного сопротивления изменяется с изменением времени и температуры диффузии. Величина диффузионного сопротивления при этом определяется с точностью  $\pm 10\%$ . Помимо величины поверхностного сопротивления, необходимо контролировать и глубину перехода.

**Диффузия для получения эмиттера транзистора.** Диффузией донорных примесей создают эмиттерные области транзисторов, катодные области диодов и омические контакты к коллекторным областям.

Диффузия фосфора проводится при температуре около  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение 10—20 мин, затем поверхность пластины окисляется в парах воды при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ .

**Диффузия золота.** Для уменьшения времени переключения логических интегральных схем в кремний вводятся вещества, уменьшающие время жизни неосновных носителей. Для этого обычно применяется золото. После того как окисная пленка на поверхности пластины удаляется плавиковой кислотой, на эту поверхность производится вакуумное напыление золота и последующая диффузия при высокой температуре. Диффузия золота при температуре примерно  $1050^{\circ}\text{C}$  в течение нескольких минут уменьшает время жизни неосновных носителей, что и приводит к уменьшению времени переключения.

**Травление окисла перед металлизацией.** Для получения соединений элементов необходимо селективно удалить с определенных участков окисную пленку. Такими участками являются коллекторные области резисторов, контактная область подключения заземления и т. д.

Перед напылением алюминия окисная пленка с контактных участков должна быть полностью удалена. Для этого пластину необходимо на 10 сек поместить в раствор плавиковой кислоты, разбавленной водой (1:20).

**Создание контактов и внутрисхемных соединений путем металлизации.** При помощи вакуумного напыления на поверхность пластины, с контактных участков которой

был удален окисел, наносят пленку алюминия толщиной около 1 мкм. После фотолитографического удаления алюминия для создания рисунка необходимых соединений пластина подвергается термообработке при температуре, близкой к температуре эвтектики Al—Si. Термообработка обеспечивает хорошие контакты в местах соединения алюминия с кремнием, а также адгезию между алюминием и кремниевой окисной пленкой.

**Контроль микросхем на пластине.** Пластина с интегральными схемами содержит несколько сотен микросхем, часть которых не функционирует. Было бы неэкономично собирать в корпус все микросхемы, в том числе и дефектные, так как сборка дефектных микросхем вызвала бы напрасные затраты. Поэтому перед резкой пластины на отдельные микросхемы проводятся измерения статических характеристик каждой микросхемы путем размещения игловидных микрозондов на алюминиевых контактных площадках и соединения их с контрольно-измерительной аппаратурой. Микросхема, которая оказывается дефектной, метится краской и удаляется после разрезания пластины на отдельные микросхемы.

**Сборка и герметизация.** Кристаллы с микросхемами собирают и помещают в герметичные корпуса. Когда кристаллодержатель корпуса изготовлен из металла, для припайки микросхемы применяют сплав золота с кремнием; когда же кристаллодержатель изготовлен из керамики, для монтажа микросхем применяют стекло.

Контактные площадки монтируемой микросхемы соединяют с наружными выводами обычно посредством тонких проволочек или припаивают к ножке, имеющей выводы, расположение которых соответствует расположению контактных площадок на кристалле. Последний способ применяется значительно реже; обычно используют алюминиевую или золотую проволоку (диаметром 25–50 мкм). Тонкие проволочные выводы присоединяются методом термокомпрессии или термокомпрессии с подачей ультразвуковых колебаний; первый способ применяют при золотой проволоке, второй — при алюминиевой.

После соединения микросхемы с выводами корпуса ее необходимо герметизировать. Герметизация металлического корпуса обычно осуществляется одним из методов сварки; керамические корпуса герметизируются путем применения специального стекла.

В настоящее время наметилась тенденция к отказу от

применения тонких проволочных выводов при монтаже полупроводниковых схем в корпусах. Изыскиваются различные способы непосредственного соединения контактных площадок полупроводниковых схем с контактными площадками других схем, корпусами и т. д. В технике выполнения таких электрических соединений имеется тенденция к дальнейшему развитию методов микросварки термокомпрессией с одновременным действием ультразвука, к применению микросварки «клювом», к использованию некоторых новых методов соединений, например микропайки, с помощью нагретого инертного газа.

Для непосредственной защиты (герметизации) поверхности «бескорпусных» полупроводниковых схем используют неорганические и органические материалы.

Основным недостатком метода разделительной диффузии является наличие паразитных емкостей и токов утечки изолирующих *p-n* переходов, что особенно сказывается при разработках логических полупроводниковых интегральных микросхем с малой потребляемой мощностью (порядка нескольких микроватт на одну микросхему). Попытки устранить недостатки, свойственные изолирующим *p-n* переходам, привели к созданию новых технологических методов, в которых изолирующие *p-n* переходы заменены слоем диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ).

### Метод изоляции элементов двуокисью кремния

Этот метод изоляции элементов имеет несколько вариантов. На рис. 2.16 показана обычная последовательность процессов:

— на кремниевой пластине *n*-типа путем диффузии примеси получают тонкий поверхностный слой *n*<sup>+</sup>-типа толщиной 1—3 мкм;

— методом глубокой фотолитографии вытравливают со стороны *n*<sup>+</sup>-слоя канавки глубиной 15—20 мкм; глубина травления должна быть несколько больше толщины коллекторной области;

— на поверхность со стороны канавок наносят слой двуокиси кремния путем пиролитического разложения силана или непосредственным окислением кремния при высокой температуре, толщина слоя примерно 1 мкм;

— на поверхности со стороны окисленных канавок выращивается поликристаллический слой кремния толщиной 100 мкм или больше. Этот слой можно также получить методом пиролитического разложения силана;

— с противоположной поверхности слой монокристаллического кремния сошлифовывается или стравливается до окисного слоя. Эта операция является наиболее критичной и требует специального прецизионного оборудования.

Часто применяется усовершенствованный вариант метода диэлектрической изоляции. Последовательность основных операций при таком варианте показана на рис. 2.17. Здесь используется четырехслойная структура: подложка  $n^+$ -типа, эпитаксиальный слой, слой окисла, поликристаллического кремния толщиной приблизительно 100 мкм.

Монокристаллический кремний  $n^+$ -типа сошлифовывается или стравливается от 100 до 20 мкм. Поверхность  $n^+$ -подложки вновь окисляется, путем фотолитографии в ней вытравливаются канавки. Затем поверхность монокристаллического слоя и канавок еще раз окисляется, и на этой стороне выращивается второй слой поликристаллического кремния. После этого с обратной стороны пластины полностью удаляется первый слой поликристаллического кремния вплоть до слоя двуокиси кремния. Открывшийся окисный слой используется в качестве маски для образования элементов по обычной планарной технологии.

Данный вариант изоляции окислом имеет некоторые преимущества по сравнению с процессом, описанным

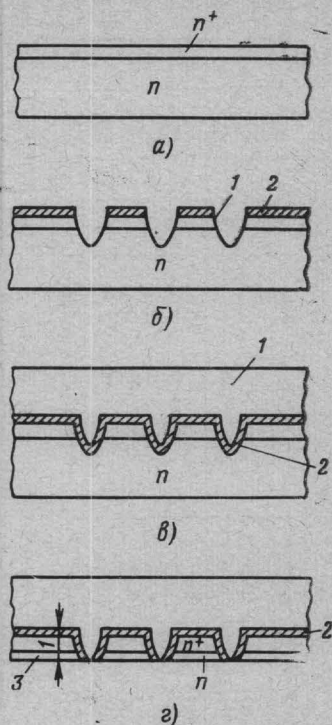


Рис. 2.16. Последовательность основных процессов при изготовлении полупроводниковых микросхем с изоляцией элементов двуокисью кремния:

*a* — наращивание эпитаксиального слоя; *b* — окисление и вытравливание канавок; *1* — вытравливание канавки, *2* — слой двуокиси кремния; *в* — окисление и наращивание поликристаллического кремния: *1* — эпитаксиальный поликристаллический кремний, *2* — слой двуокиси кремния; *г* — шлифовка: *1* — критическая толщина, *2* — слой двуокиси кремния, *3* — шлифовка.

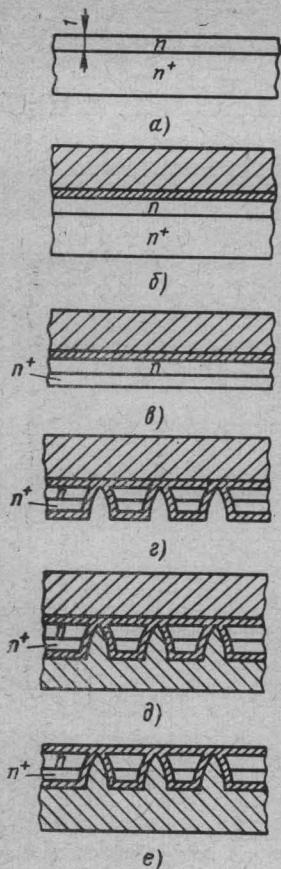


Рис. 2.17. Последовательность основных процессов усовершенствованного варианта получения диэлектрической изоляции:

*а* — эпитаксиальное наращивание *n*-слоя: *1* — критичный слой *n*-типа; *б* — окисление и наращивание поликристаллического слоя кремния; *в* — частичная шлифовка *n*<sup>+</sup>-слоя; *г* — вытравливание канавок для получения «островков» и окисление поликристаллического кремния; *д* — наращивание опорного поликристаллического кремния; *е* — удаление поликристаллического эпитаксиального кремния.

выше; отсутствие строгих требований к толщине оставшегося после шлифовки монокристаллического кремния; необходимая плоскопараллельность верхней стороны монокристаллического слоя и защищенность ее слоем двуоксида кремния; исключение возможности повреждения активных областей полупроводниковых интегральных схем при шлифовке.

Метод изоляции окислом позволяет получить хорошую изоляцию как по постоянному, так и по переменному току, поскольку емкость, связанная с окисным слоем, может быть очень малой (300 пф/мм<sup>2</sup> при слое двуоксида кремния толщиной 1 мкм). Измеренное сопротивление изоляции превышает 10<sup>12</sup> ом при напряжении 100 в, а пробивное напряжение — выше 800 в для слоя SiO<sub>2</sub> толщиной 1 мкм.

Можно указать и на дополнительные возможности данного метода диэлектрической изоляции: на одном кристалле можно изготовить высокочастотные и низкочастотные диоды методом селективной диффузии золота; облегчено получение в одном кристалле *p-n-p* и *n-p-n*-транзисторов.

Метод диэлектрической изоляции целесообразно использовать при разработках микромощных логических полупроводниковых интегральных микросхем.

Основным недостатком данного метода является его более высокая стоимость по сравнению с планарно-эпитаксиальным.



## Метод совмещенных схем

Для расширения номинальных значений сопротивлений и емкостей в полупроводниковых интегральных микросхемах и улучшения их рабочих характеристик разработана специальная технология, основанная на технологии тонких пленок. Комбинированную технологию изготовления полупроводниковых интегральных микросхем принято называть технологией совмещенных схем.

В этом случае активные элементы микросхемы (а возможно, и некоторые некритичные по номинальному значению сопротивления) изготавливаются в теле кремниевого кристалла методом эпитаксиального наращивания, фотолитографии и диффузии. Технология тонких пленок используется для получения пассивных элементов непосредственно на поверхности слоя  $\text{SiO}_2$ , выращенного на верхней поверхности монокристаллической структуры.

Этим методом можно получить сопротивления и емкости с уменьшенными паразитными связями и меньши-

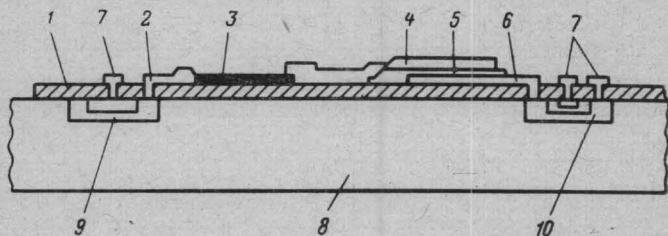


Рис. 2.18. Поперечный разрез полупроводниковой интегральной микросхемы, изготовленной по совмещенной технологии:

1 — слой двуокиси кремния; 2 — внутрисхемные соединения; 3 — тонкопленочное сопротивление; 4 — верхняя пластина конденсатора; 5 — диэлектрик конденсатора; 6 — нижняя пластина конденсатора; 7 — омические контакты; 8 — подложка кремния; 9 — диод; 10 — транзистор.

ми допусками, что позволяет достичь большего быстродействия и улучшить рабочие характеристики полупроводниковых интегральных микросхем. Применение такой технологии позволяет получать большие абсолютные значения сопротивлений и емкостей. На рис. 2.18 приведен поперечный разрез интегральной микросхемы, изготовленной по технологии совмещенных схем. Этот вид технологии целесообразно применять при разработках микромощных и сверхбыстродействующих полупроводниковых интегральных микросхем.

## Гибридные интегральные микросхемы

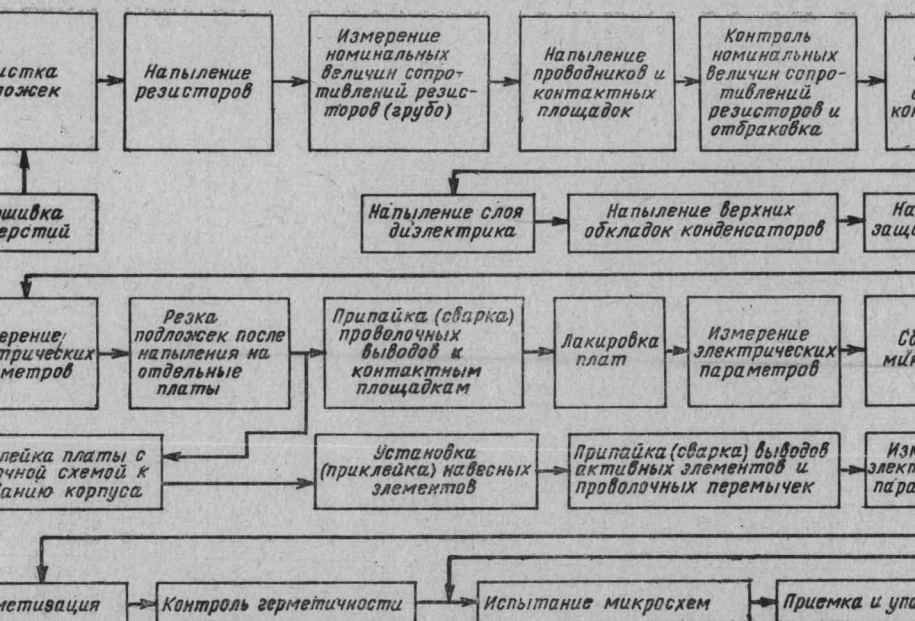
---

### 3.1. Основные технологические этапы изготовления гибридных интегральных микросхем

Гибридные интегральные микросхемы представляют собой сочетание пленочных пассивных элементов и навесных активных элементов. Несовершенство технологии изготовления активных пленочных элементов (транзисторов, диодов) не позволяет выпускать пленочные интегральные микросхемы. Гибридные микросхемы появились как компромиссное решение проблемы создания в будущем пленочных интегральных микросхем. Резисторы, конденсаторы, контактные площадки и внутрисхемные соединения в гибридных интегральных 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 методами (химическими, шелкографии и др.).

Навесные активные элементы (транзисторы, диоды и др.) в гибридной интегральной микросхеме крепят на плату с пленочными пассивными элементами либо на основание корпуса гибридной микросхемы или, при необходимости, на дополнительную плату. Выводы активных элементов присоединяют к соответствующим контактным площадкам путем пайки, сварки или другим способом. В гибридной интегральной микросхеме при необходимости могут быть установлены навесные конденсаторы, индуктивности, трансформаторы и другие микроминиатюрные элементы.

Гибридные интегральные микросхемы, предназначенные для использования в разных типах аппаратуры, должны быть герметизированы, по возможности представлять собой функционально законченные узлы, и



... Схема технологического процесса при изготовлении гибридных интегральных микросхем

должна быть обеспечена возможность контроля электрических параметров.

Процесс изготовления тонкопленочной гибридной интегральной 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, выделение всех технологически разнородных групп ее элементов, например, резисторов, соединений и т. д. и разработка ее топологии с последующим изготовлением точного рисунка 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, требуемых для изготовления элементов микросхемы, и получение пленочных элементов путем осаждения паров через маски или травления пленочных покрытий после их осаждения;

— крепление активных элементов, присоединение выводов к подложке и герметизация микросхемы.

Следует отметить, что в технологическом процессе изготовления тонкопленочных гибридных интегральных микросхем различают основные и вспомогательные процессы производства. К основным 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. 3.1. Как видно из этого рисунка, изготовление микросхемы требует проведения большого числа различных операций, а следовательно, и разнообразного оборудования.

### 3.2. Подложки для пленочных интегральных микросхем

Подложки в пленочных интегральных 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 к аппаратуре. 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 выделять газов в вакууме, обладать хорошей полируемостью поверхности, иметь коэффициенты термического расширения материала подложки и напыляемых слоев по возможности близкими и, наконец, должен быть недефицитным и иметь невысокую стоимость.

В настоящее время нет такого материала для подложек, который в одинаковой мере удовлетворял бы этим разнообразным требованиям. К сожалению, многие органические материалы не могут быть использованы в качестве подложек, поскольку изготовление пленочных элементов микросхем ведется в вакууме и при повышенных температурах. Исключение составляют лишь некоторые полимерные материалы, например лавсан. Поэтому при подборе материала для подложек оказывается возможным использовать в основном стекло и керамику. При этом рекомендуются только некоторые типы стекол и керамики.

Из стекол лучшими для подложек являются боросиликатные и алюмосиликатные сорта. Путем листового проката этих стекол получают достаточно гладкую поверхность, не прибегая к полировке. Полировка хотя и уменьшает микронеровности (менее  $100 \text{ \AA}$ ), но она значительно дороже листового проката. Кроме того, при полировке стеклянных подложек могут ухудшиться их поверхностные свойства.

Применение щелочных стекол ограничено нестабильностью их свойств, поскольку при нагреве в электриче-



ском поле наблюдается интенсивное выщелачивание. К недостаткам подложек из стекла следует отнести также малую теплопроводность, что не позволяет их применять при повышенных мощностях нагрева. При интенсивном нагреве предпочтительнее использовать стекло «Пирекс», а также кварц и кварцевое стекло.

Основным преимуществом керамических подложек по сравнению со 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 теплопроводность керамики.

К недостаткам керамики следует отнести большую шероховатость ее поверхности. Микронеровности необработанной керамики могут составлять несколько тысяч ангстрем и значительно уменьшаются 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.

В последнее время все большее применение для подложек пленочных интегральных микросхем находят новые материалы: ситалл и фотоситалл.

Ситалл представляет собой стеклокерамический материал, получаемый путем термообработки (кристаллизации) стекла. По своим свойствам ситалл превосходит свойства исходного стекла. 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 порядка  $5 \cdot 10^{-6}$  1/град в интервале температур от 20 до 300 °С, теплопроводность  $3,4 \cdot 10^{-3}$  кал/см·сек × град, диэлектрическая проницаемость 8,5 и тангенс угла диэлектрических потерь порядка  $2 \cdot 10^{-3}$  при частоте  $1 \cdot 10^6$  гц и температуре 20 °С. Температура деформации ситалла выше, чем температура начала размягчения исходного стекла. Ситалл выдерживает резкие перепады температуры в воздушной среде от  $-60^\circ$  до  $+700^\circ$ С. Он

обладает высоким электрическим сопротивлением, которое несколько уменьшается с повышением температуры. По электрической прочности ситалл не уступает лучшим видам вакуумной керамики, а по механической прочности в 2—3 раза прочнее стекла. Он обладает высокой химической стойкостью к кислотам, не порист, дает незначительную объемную усадку, газонепроницаем и имеет малую газоотдачу при высоких температурах.

Фотоситалл — это стеклокристаллический материал, получаемый путем кристаллизации светочувствительного стекла. Основными частями фотоситалла являются окись кремния (75%), окись лития (11,5%), окись алюминия (10%) и окись калия (3,5%) 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 составляет  $9 \cdot 10^{-6}$  1/град в диапазоне температур от 20 до 120 °С, удельное объемное сопротивление при 150 °С равно  $1 \cdot 10^9$ — $1 \cdot 10^{10}$  ом·см.

Подложки, применяемые для гибридных интегральных микросхем имеют, как правило, квадратную и прямоугольную форму (рис. 3.2). Рекомендуемые размеры подложек приведены в табл. 3.1.

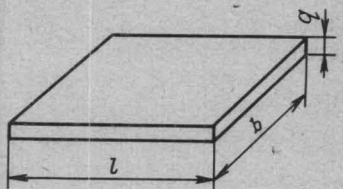


Рис. 3.2. Подложка для гибридных интегральных микросхем.

Таблица 3.1

Рекомендуемые размеры подложек гибридных интегральных микросхем

Ширина, <i>b</i> мм	30	24	20	16	16	16	12	12	10	10
Длина <i>l</i> , мм	48	30	24	60	30	20	48	30	16	12

Толщину подложки *q* рекомендуется принимать равной 0,6 или 1,6 мм. В отдельных случаях она может быть и меньше, до 0,2 мм.

Подложки размером 48×60 мм из стекла и ситалла и размерами 100×100 мм, 50×50 мм из стекла использу-

ются обычно для одновременного напыления одной или нескольких пленочных микросхем с последующей разрезкой в соответствии с размерами, приведенными в табл. 3.1. Материал подложки и технология ее изготовления должны обеспечивать требуемый класс чистоты ее поверхности.

Необходима тщательная очистка поверхности подложек перед напылением тонкопленочных слоев, так как даже малая шероховатость или загрязнение при малой толщине пленки ухудшает условия конденсации и влияет на качество микросхемы. Шероховатость поверхности подложки должна соответствовать 13—14-му классу чистоты обработки.

Диэлектрические пленки особенно чувствительны даже к единичному незначительному дефекту на поверхности подложки. Высота гребешков микрорельефа допускается не более 250 Å. 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 резистора и они обычно не вызывают обрывов или чрезмерной концентрации тока в этих местах. Однако грубый микрорельеф вызывает дополнительный разброс удельного сопротивления пленки.

Высокая чистота обработки поверхности подложки необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров схемных элементов микросхемы и для создания требуемых условий проведения процессов вакуумного осаждения или фототравления. Очень важно, чтобы на поверхности подложки не было различных загрязнений. К загрязнениям относят все посторонние включения на поверхности подложки: пыль, жировая пленка, влага 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, а также 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 методы очистки различны. 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 подложки.

### 3.3. Пленочные резисторы

В гибридных интегральных микросхемах широко применяются тонкопленочные резисторы, которые напыляются на подложки в виде узких полосок (или иной формы), заканчивающихся контактными площадками, обладающими высокой проводимостью (рис. 3.3). 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 квадрата любых размеров.

Действительно, если принять, что сторона квадрата пленки из материала с удельным сопротивлением  $\rho$  равна  $a$ , а ее толщина  $t$ , то ее сопротивление

$$R = \frac{\rho l}{s} = \rho \frac{a}{at} = \frac{\rho}{t} = R_s \text{ [ом/квadrat]},$$

где  $l$  — длина пленки,  $s$  — поперечное сечение пленки.

Ширину резистивной линии принимают обычно не менее 0,2 мм, так как более узкая линия может приводить 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 щели маски на получение требуемого номинального значения сопротивления резистора.

Практически установлено, что лучше всего изготавливать резисторы прямоугольной формы. При одной и той

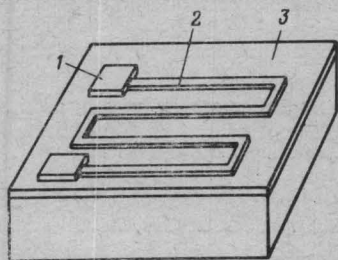


Рис. 3.3. Характерная конфигурация тонкопленочного резистора в гибридной интегральной микросхеме.

1 — металлический контакт; 2 — пленка резистора; 3 — подложка.

же толщине резистивной пленки можно получать различные сопротивления, отличающиеся по величине в десятки раз. Для этого достаточно изменять отношение длины пленки к ее ширине. Максимальная рассеиваемая мощность на резисторе ограничена допустимой температурой для резистора и зависит от теплопроводности подложки, от отношения площади, занятой резистором, ко всей площади подложки, а также от выбранного способа охлаждения и температуры окружающей среды.

Материал, используемый для получения резистивных пленок, должен обеспечивать возможность получения широкого диапазона стабильных во времени сопротивлений, обладать низким температурным коэффициентом и высокой коррозионной стойкостью. При напылении материала

Таблица 3.2

**Характеристики материалов, применяемых для изготовления тонкопленочных резисторов**

Материал	Поверхностное сопротивление, ом/квадрат	Температурный коэффициент сопротивления, ТКС, $10^6$ 1/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 <sup>3</sup> ÷10 <sup>4</sup>	50÷250
	10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>4</sup>	250
Моноксид кремний — хром	10÷10 <sup>4</sup>	100
Оксид тантала	10÷10 <sup>4</sup>	—
Углерод	10÷10 <sup>7</sup>	—
Никель	10÷300	250
Оксид олова	10÷10 <sup>3</sup>	250
Вольфрам	10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>4</sup>	100
Танталово-хромовый силикат	10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>4</sup>	500
Палладиево-серебряная глазурь	10 <sup>2</sup> ÷10 <sup>5</sup>	500

должны образовываться тонкие, четкие линии с хорошей повторяемостью этих линий от образца к образцу.

Свойства некоторых материалов, используемых при изготовлении тонкопленочных резисторов, приведены в табл. 3.2. Следует отметить, что значения поверхностных сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) являются ориентировочными, так как



они сильно 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. 3.4 показана типичная зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины. При малых толщинах пленки ее свойства сильно зависят от характера микронеровностей поверхности подложки. В этой области могут наблюдаться нарушения непрерывности структуры пленки, проводимость же осуществляется за счет туннельного эффекта и термоэмиссии между отдельными кристаллитами. Наиболее целесообразно использовать пленки такой толщины, при которой существенно сказываются их объемные свойства. Поэтому легче регулировать толщину пленки, так как нарушения поверхности уже не имеют существенного значения.

Металлическая пленка толщиной порядка  $10 \text{ \AA}$ , независимо от природы металла имеет очень большое удельное электрическое сопротивление, которое экспоненциально уменьшается с увеличением толщины. Пленки такой малой толщины имеют весьма нестабильные характеристики и практически не применяются. Для того чтобы заведомо получать сплошную пленку при имеющихся в производстве отклонениях от выбранного технологического режима, считают, что толщина пленки, наносимая вакуумным испарением, должна быть порядка  $1000 \text{ \AA}$ . Следует отметить, что пленки 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 сопро-

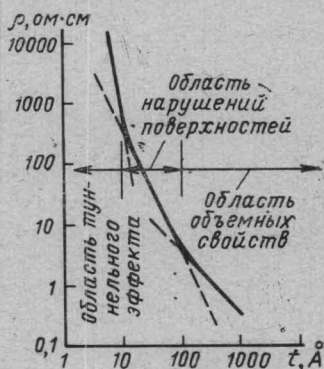


Рис. 3.4. Зависимость удельного сопротивления ( $\rho$ ) пленки от ее толщины.

тивление пленки из этого сплава достигает 300 ом/квadrat при малом температурном коэффициенте сопротивления. Температура испарения у этого сплава значительная (1600 °C), причем для получения высококачественного пленочного резистора подложка должна подогреваться до 300—350 °C. Из сплава железа с хромом (79% железа, 21% хрома) и железноникелевого сплава (71,5% железа, 21% хрома, 7,5% никеля) получают пленки, обладающие поверхностным сопротивлением 150 ом/квadrat с температурным коэффициентом сопротивления не более  $1 \times 10^{-4}$  1/град. Значительно большим удельным сопротивлением (до 400 ом/квadrat) обладает многокомпонентный сплав, состоящий из 74% никеля, 20% хрома, 3% железа и 3% алюминия [52].

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 выше стабильность характеристик пленки. Вольфрам дает очень стабильные характеристики пленок в вакууме, но эти пленки имеют весьма нестабильные характеристики на воздухе. Рений — тугоплавкий металл, обладающий такими свойствами, которые обеспечивают образование очень стабильных характеристик пленок. Поэтому он находит все большее применение для получения пленочных резисторов.

Резисторы из рения напыляются методом электронной бомбардировки в вакууме. Температура подложки поддерживается равной 275—450 °C. В качестве материала для подложки используется в большинстве случаев плавленый кварц. Резисторы из рения обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением, обычно порядка нескольких тысяч ом на квадрат и стабильны в вакууме при температурах до +500 °C. Стабильность вне вакуума зависит от типа защиты поверхности и метода термообработки. Защитным поверхностным слоем для резисторов из рения обычно служит окись кремния.

В том случае, когда необходимо получить высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением (соответствует нескольким тысячам 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 коррозии в различных атмосферных условиях и не поддается воздействию многих кислот; реакция окисления тантала легко управляема и может быть использована для регулирования толщины пленки и ее сопротивления; пентаокись тантала является хорошим диэлектриком, что позволяет использовать тантал для изготовления не только пленочных резисторов, но и пленочных конденсаторов.

Большим поверхностным сопротивлением (соответствует до 10 000 ом/квadrat) обладает пленка из сплава 24% хрома и 76% кремния. Напыление такой пленки производится по методу «взрыва», 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  $200 \div 500^\circ\text{C}$ . Полученные таким путем пленки отличаются малым температурным коэффициентом сопротивления ( $5 \cdot 10^{-5}$  1/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%) [52].

Еще бóльшим поверхностным сопротивлением (соответствует до 50 000 ом/квadrat) 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 микросхемах, 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 температуростойчивостью 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  $1300 \div 1600^\circ\text{C}$  на подложку, нагретую до  $200 \div 250^\circ\text{C}$ . После напыления

пленки для стабилизации параметров ее нагревают в контролируемой среде до температуры  $400 \div 450^\circ\text{C}$ .

Наиболее простым методом регулирования осаждения резистивных пленок является помещение в рабочий объем вакуумной установки вблизи напыляемых подложек контрольной подложки с серебряными контактами (так называемого «свидетеля»). 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 же 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 соединяются с ней. Другая причина заключается в возникновении в материале пленки напряжений, которые могут изменяться в процессе отжига.

При изготовлении пленочных резисторов можно использовать и химические методы осаждения пленок. При этом необходимая конфигурация пленки получается с помощью съёмной маски. Наибольшее распространение получили станатные резистивные пленки, состоящие в основном 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 станатной пленки без добавок невысокое, до  $20 \text{ ом/кв. см}$ .

Основным положительным качеством станатных пленок является высокая теплостойкость (до  $250^\circ\text{C}$ ), высокая химическая и механическая стойкость, влагуустойчивость. Эти свойства при хорошей технологичности способствуют широкому применению станатных 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 при протекании тока и управлять температурным коэффициентом сопротивления в весьма широких пределах, вплоть до изменения его знака. До-

бавление в пленку двуокиси титана повышает ее удельное сопротивление.

### 3.4. Пленочные конденсаторы

Пленочные конденсаторы гибридных интегральных микросхем изготавливаются в большинстве случаев вакуумным напылением. При этом требуется по меньшей мере три этапа напыления: нижней проводящей обкладки, диэлектрической пленки и верхней проводящей обкладки (рис. 3.5). 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 для плоского конденсатора:

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S}{d}, \quad (3.1)$$

где  $C$  — емкость,  $nф$ ,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $S$  — площадь обкладки,  $см^2$ ,  $d$  — толщина диэлектрика,  $см$ . Если число обкладок  $N$ , то емкость определяется по формуле

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S (N - 1)}{d}. \quad (3.2)$$

Основным элементом пленочного конденсатора, определяющим его параметры и свойства, является диэлектрик. В качестве диэлектрика применяются изоляционные материалы, из которых образуются непористые тонкие пленки, обладающие необходимыми электрофизическими свойствами. Материал для изготовления диэлектрических пленок должен удовлетворять следующим основным требованиям: хорошей адгезией к материалу подложки и металла, быть плотным и не подвергаться механическому разрушению при воздействии температурных

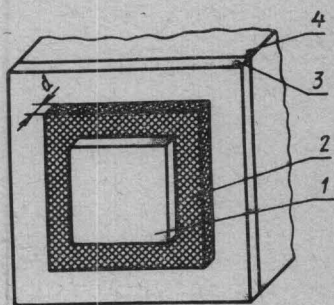


Рис. 3.5. Общий вид тонкопленочного конденсатора:

1 — верхняя металлическая обкладка; 2 — диэлектрическая пленка; 3 — нижняя металлическая обкладка; 4 — подложка.



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  $1\ 000 \div 1\ 800\ ^\circ\text{C}$ , поскольку более низкая температура свидетельствует о недопустимо высокой подвижности атомов, а при более высокой температуре испарения возникают большие трудности при создании испарителей.

Исследования показали, что указанным выше требованиям удовлетворяет весьма небольшое число диэлектриков. Наиболее часто применяются моноокись кремния  $\text{SiO}_2$ , трехсернистая сурьма  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ , моноокись германия  $\text{GeO}$ . Можно использовать также сульфид цинка  $\text{ZnS}$ , фтористый магний  $\text{MgF}_2$ , а также некоторые редкоземельные окислы и фтористые соединения. Возможно применение в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов ферроэлектрических пленок, например, титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  и смеси титаната бария с титанатом стронция  $\text{BaTiO}_3 + \text{SrTiO}_3$ . Пленки этих соединений, полученных испарением в вакууме, могут иметь в некоторых случаях очень высокую диэлектрическую проницаемость (до 1 000).

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 осаж-

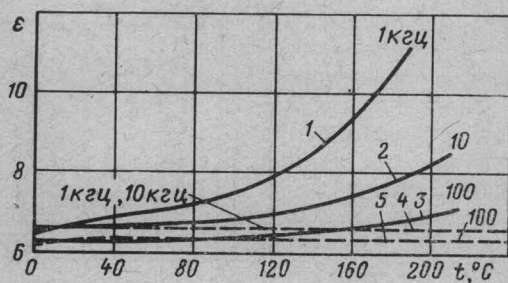


Рис. 3.6. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости пленочного конденсатора на основе окиси кремния на разных частотах:

1, 2, 3 — до тепловой обработки; 4, 5 — после тепловой обработки на воздухе при  $400\ ^\circ\text{C}$  в течение 30 мин.

дения ( $25 \div 30 \text{ \AA/сек}$ ), 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  $1250 \div 1400^\circ\text{C}$  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. 3.6 приведены сравнительные температурные зависимости диэлектрической проницаемости конденсатора на основе окиси кремния на разных частотах до тепловой обработки и после отжига на воздухе при  $400^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Эти данные указывают на стабильность параметров конденсаторов и на то, что тепловая обработка увеличивает область рабочих температур до  $160 \div 170^\circ\text{C}$ .

Исследования показали, что наилучшим материалом для обкладок пленочного конденсатора является алюми-

Таблица 3.3

Характеристики пленочных конденсаторов

Материал диэлектрика	Максимальная удельная емкость, $\text{пф/см}^2$	Рекомендуемый диапазон применяемой удельной емкости, $\text{пф/см}^2$	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ , $10^6 \text{ в.см}$	Рабочее напряжение при максимальной удельной емкости, $\text{в}$
Моноокись кремния	15 000	$10\,000 \div 12\,000$	$5 \div 6$	$0,002 \div 0,02$	$2 \div 5$	15
Трехсернистая сурьма	20 000	$10\,000 \div 15\,000$	$18 \div 21$	$0,004 \div 0,01$	$0,2 \div 1,0$	4
Два слоя: моноокись кремний — трехсернистая сурьма	20 000	$10\,000 \div 15\,000$	$13 \div 14$	$0,005 \div 0,01$	$0,7 \div 2,0$	$6 \div 10$
Моноокись германия	15 000	$10\,000 \div 12\,000$	$10 \div 11$	$0,001 \div 0,005$	$0,5 \div 1,5$	$6 \div 10$

ний. Этот материал по сравнению с другими металлами, которые можно было бы использовать (например, никель, хром, золото), дает значительно меньшее 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. 3.3.

Диэлектрические пленки можно получить: термическим испарением в вакууме (из резистивного испарителя или с помощью электронного луча), катодным распылением, анодированием осажденных на подложку металлических пленок и химическим осаждением — реакцией в газовой фазе.

Термическое испарение в вакууме — наиболее простой и производительный метод получения пленочных конденсаторов, резистивных и коммутационных элементов. Основное преимущество этого метода — унификация технологических операций получения различных элементов, возможность изготовления микросхемы в едином технологическом цикле.

Метод термического испарения диэлектрических пленок уже давно широко применяется 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 для получения пленок в интегральных микросхемах. 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  $1000 \text{ \AA}$ , электрическая прочность  $E_{пр}$  равна  $0,8 \cdot 10^6 \text{ в/см}$ , тангенс угла потерь — 0,01, ТКЕ  $(1 \div 4) \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$ . Таким образом, основные характеристики пленок удовлетворительны [25], но 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, конденсаторы обладают по-

вышенной чувствительностью к атмосферной влажности.

Как отмечалось выше, моноокись кремния является пока наилучшим диэлектриком для пленочных конденсаторов. Однако и этот материал требует эффективного строгого контроля во время осаждения, так как воспроизводимость характеристик пленок сильно зависит от состава исходного материала для напыления и изменения технологических факторов во время напыления (рис. 3.7 и 3.8). Используя эффективные методы контроля, во время осаждения монооксида кремния, удается получать конденсаторы на основе  $\text{SiO}$  с удельной емкостью до  $10\,000 \text{ нф/см}^2$  с хорошими электрофизическими характеристиками.

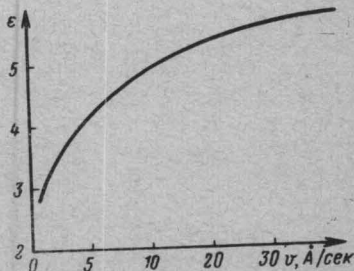


Рис. 3.7. Изменение диэлектрической проницаемости пленок монооксида кремния в зависимости от скорости осаждения.

Некоторое распространение получили конденсаторы на основе халькогенидных стекол. Температура испарения этих материалов — невелика ( $400 \div 700^\circ\text{C}$ ), а величина  $\epsilon$ , например, в пленках трехсернистой сурьмы  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  достигает 18—21. Эти конденсаторы критичны к влажности окружающего воздуха, к примесям исходного материала. Рабочий температурный диапазон и  $E_{\text{пр}}$  невелики и соответственно равны от  $-60$  до  $+(85 \div 100)^\circ\text{C}$  и  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ в/см}$ . Таким образом, несмотря на высокое значение  $\epsilon$  трехсернистой сурьмы, удельная емкость конденсаторов на ее основе обычно не превышает  $15\,000 \div 200 \text{ нф/см}^2$ ; недостаточную стабильность и электрическую прочность приходится компенсировать большей толщиной диэлектрического слоя [25].

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  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и др., применяют электронный луч. Однако несмотря на высокую скорость осаждения (до  $24\,000 \text{ Å/мин}$  для  $\text{SiO}_2$ ), при напылении все же возможна диссоциация испаряющегося материала. Регулируя скорость осаждения и темпера-

туру подложки, можно получать конденсаторы на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , стабильность которых такая же, как и конденсаторов на основе  $\text{SiO}$ .

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 положи-

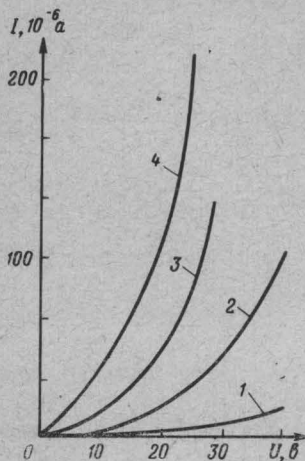


Рис. 3.8. Вольт-амперные характеристики конденсаторов на основе монооксида кремния, напыленных при различном давлении остаточных газов.

- 1)  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.;
- 2)  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. (кислород);
- 3)  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.;
- 4)  $1 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.

тельный 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 окислов обеспечивается композицией сплава в катоде. Таким путем могут быть получены, например, окислы  $\text{TaO}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  и др., которые могут быть использованы в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов.

Основной недостаток катодного распыления — низкая скорость осаждения (порядка  $40 \text{ \AA}/\text{мин}$ ) — 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. Такие пленочные конденсаторы имеют хорошие характеристики.

Методом анодирования можно получить окисные пленки некоторых металлов (тантал, титан, ниобий, цирконий, алюминий и др.). Наиболее часто на практике



применяются пленочные конденсаторы, полученные анодированием тантала. Пленки 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 ( $0,1—0,2 \text{ мкф/см}^2$ ),  $\text{tg } \delta = 0,01$  (на частоте  $1 \text{ кгц}$ ),  $E_{\text{пр}} = (1 \div 1,5) \times 10^6 \text{ в/см}$ ,  $\text{ТКЕ} = (2 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$ . Однако рабочий диапазон этих элементов ограничивается частотами  $0,1 \div 1,0 \text{ Мгц}$  вследствие большого удельного поверхностного сопротивления танталовых пленок.

В последнее время получают распространение конденсаторы на основе анодированного алюминия. Несмотря на небольшую величину относительной диэлектрической проницаемости ( $8 \div 9$ ) имеет место высокая воспроизводимость и простота получения исходных металлических пленок и стабильность окисной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Травление алюминия не представляет трудностей; рисунок на плате может быть получен и обычным способом с использованием масок. Высокое значение электропроводности обкладок позволяет создавать высокочастотные емкостные элементы. Конденсаторы мало критичны к технологическим факторам при анодировании.

Химические методы получения диэлектрических пленок еще не нашли широкого применения и исследования в этом направлении продолжают. Наилучшим пока является метод осаждения диэлектрических пленок из газовой фазы. Например, разложением тетраэтоксилана при температуре свыше  $600^\circ\text{C}$  и этилсиликатов можно получить пленки двуокиси кремния. Существенным недостатком метода осаждения из газовой фазы является невысокая пока воспроизводимость параметров пленок, обусловленная наличием примесей.

В качестве диэлектрика пленочных конденсаторов можно использовать полимерные пленки, например, полистирола, полипараксилена, фторопласта-4 и др. Хотя относительная диэлектрическая проницаемость полимерных пленок и невелика ( $2 \div 4$ ), 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.

### 3.5. Индуктивные элементы в пленочных интегральных микросхемах

В интегральных микросхемах, так же, как и в любых радиотехнических схемах, необходимы индуктивные элементы. Величина необходимой индуктивности зависит от частоты. В табл. 3.4 приведены расчетные значения максимальной индуктивности катушек, практически необходимой для различных частот. Добротность  $Q$ , требуемая для таких катушек, зависит от функции, выполняемой ими в данной схеме, однако величина  $Q$ , равная порядка 100, является приемлемой для большинства применений.

Таблица 3.4

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 затруднено, хотя работы в этом направлении и ведутся.

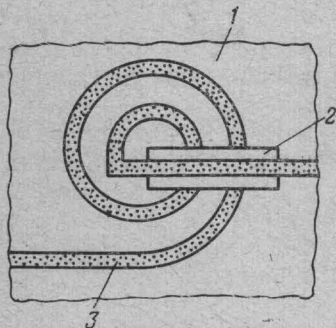


Рис. 3.9. Тонкопленочный спиральный индуктивный элемент:

1 — подложка; 2 — изоляционная пленка; 3 — токопроводящая пленка.

Небольшие индуктивности для гибридных интегральных микросхем можно получать двумя путями: осаждением на подложку проводящей спирали через соответствующую маску методом вакуумного испарения (рис. 3.9) и изготовлением миниатюрной тороидальной катушки с магнитным сердечником. Пленочная спираль из 20 витков диаметром 8,3 мм, осажденная на стеклянной подложке и на кремнии с удельным сопротивлением 50  $ом \cdot см$ , имеет характеристики, приведенные в табл. 3.5.

Из табл. 3.5 видно, что индуктивные элементы, напыленные на стекле, имеют добротность на порядок выше,

**Характеристики катушки индуктивности, выполненной  
в виде 20-витковой спирали на стеклянной и кремниевой  
подложках**

f, Мгц	Стекло		Кремний	
	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

чем напыленные на кремнии, однако они еще не полностью удовлетворяют необходимым требованиям. Напыляемые индуктивные элементы могут иметь форму в виде прямоугольной спирали.

Однако во всех случаях не удается получить в пределах допустимых размеров индуктивность более 5 мкГн. В некоторых случаях такая величина индуктивности оказывается достаточной.

Обычно конструкторы избегают использовать напыляемые элементы индуктивности в тонкопленочных микросхемах, работающих на частотах ниже 30 Мгц.

Величина индуктивности в виде плоской спирали может быть определена по следующей приближенной формуле:

$$L = (k/m)^2 D_1^3, \quad (3.3)$$

где  $L$  — индуктивность, мкГн,  $m$  — шаг спирали, мм,  $k$  — коэффициент, зависящий от отношения  $D_2/D_1$  (рис. 3.10),  $D_1$  — внутренний диаметр спирали, мм,  $D_2$  — внешний диаметр спирали, мм.

Ширина витка  $b_0$  при заданной добротности  $Q$  может быть определена (без учета влияния поверхностного эф-

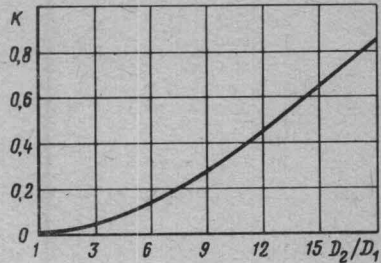


Рис. 3.10. К расчету индуктивности плоской спирали.

фекта) по формуле

$$b_0 = \frac{\rho m (D_2^2/D_1^2 - 1) \cdot 10^4}{16fD_1k^2\theta} Q, \quad (3.4)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала спирали, *ом·см*,  $f$  — рабочая частота, *Мгц*,  $\theta$  — толщина проводящего слоя, *мм*.

Значения внутреннего и внешнего диаметров спирали выбирают исходя из возможных размеров элемента индуктивности, размещаемой в гибридной микросхеме. Так как формулой (3.4) не учитывается влияния поверхностного эффекта, значение  $b_0$ , полученное по этой формуле, следует увеличивать в 1,5—2 раза.

Если нанести две спирали на обе стороны подложки, можно получить пленочный трансформатор. Толщиной подложки, разделяющей первичную и вторичную обмотки в виде спиралей, определяется взаимная индуктивность. Коэффициент взаимоиндукции в этом случае очень мал, так как материал подложки является обычно диамагнитным материалом.

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 интегральных микросхем.

Во многих случаях вместо элементов индуктивности можно использовать транзисторные схемы, эквивалентные индуктивностям. Именно этот путь в основном и используется в интегральных микросхемах.

### 3.6. Пленочные проводники и контактные площадки

Для электрического соединения различных элементов микросхем на подложке используются тонкопленочные проводники. Для этой цели необходимы материалы с высокой электрической проводимостью и хорошей адгезией к подложке. Необходимо также обеспечить соединение внешних выводов с контактными площадками микросхемы с помощью пайки или сварки. Процесс значительно упрощается, если для внутрисхемных соединений и кон-

тактных площадок используются одинаковые материалы. Алюминий с успехом применяется 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.

Для напыления проводников и контактных площадок рекомендуются золото, никель, медь вакуумной плавки

Таблица 3.6

**Характеристики материалов, применяемых для проводников и контактных площадок гибридных интегральных микросхем**

Материал проводников, контактных площадок и подслоя	Толщина слоя, Å	Удельное сопротивление, ом/кв.драт	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 двоянным электродом, сварка импульсным косвенным нагревом или двоянным 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 двоянным электродом

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. 3.6 приведены характеристики исходных материалов для проводников, контактных площадок и материалов для подслоя, улучшающего адгезию проводника к подложке.

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.

### 3.7. Межслойная изоляция

В конструкции тонкопленочной интегральной микросхемы часто возникает необходимость пересечения одного проводника с другим. В месте пересечения проводники необходимо изолировать 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 проводников в микросхеме каждое пересечение должно иметь сопротивление проводников не более  $0,8 \text{ ом/см}$ , а емкость не более  $2 \text{ пф}$ . Для изоляции между проводниками применяются в большинстве случаев моноокись кремния и халькогенидное стекло. Характеристики этих материалов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Характеристики материалов, применяемых для межслойной изоляции

Материал диэлектрика	Удельная емкость, $\text{пф/см}^2$ (не более)	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $1 \text{ кгц}$ (не более)	Удельное объемное сопротивление, $\text{ом.см}$ (не менее)	Пробивное напряжение, $\text{в/см}$ (не менее)
Моноокись кремния	1700	0,03	$1 \cdot 10^{12}$	$0,8 \cdot 10^6$
Халькогенидное стекло	5000	0,01	$1 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^6$

При выборе материала межслойной изоляции и прилегающих проводников необходимо учитывать совмести-

мость материалов. Несовместимость может иметь место, например при использовании хрома для проводника и монооксида кремния для изолятора. Хром будет диффундировать в моноокись кремния, снижая пробивное напряжение. Может возникнуть и другое явление — галвано-диффузионный эффект.

Этот эффект появляется в структурах металл — диэлектрик — металл; он увеличивает ток утечки в месте пересечения проводников и разрушает проводники.

### 3.8. Методы получения заданных конфигураций пассивных элементов пленочных интегральных микросхем

Пленочные резисторы, конденсаторы, соединительные проводники, контактные площадки для выполнения заданных функций должны иметь определенную конфигурацию. Заданную конфигурацию пленок получают несколькими способами: методом фотолитографии, свободной или контактной маски, химического травления и др. [19]. Выбор того или иного метода 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 изображение 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  $12,5 \text{ мкм}$ , и точностью определения координаты  $25 \text{ мкм}$  обеспечивает высокую точность изготовления фотооригиналов. Так, для минимального размера элемента микросхемы ( $2,5 \text{ мкм}$ ) при увеличении в 200 раз ошибка выполнения фотооригинала, равная  $25 \text{ мкм}$ , не имеет существенного значения ( $0,125 \text{ мкм}$ ), так как она составляет 5%.

Затем с фотооригинала изготавливают с помощью репродукционной камеры промежуточный негатив, с кото-

рого осуществляется мультиплицирование с помощью фотоповторителя и изготовление окончательного негатива — фотошаблона; на фотошаблоне расположение и размеры элементов микросхемы соответствуют реальным размерам. Полученный фотошаблон должен изготавливаться с применением высокоразрешающей оптики на фотопластинках с разрешением около 100 *линий/мм*. С целью повышения износостойчивости с 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 *мкм*.

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 конфигурацию изображения после проявления и фиксации, обладать высокой химической стойкостью к селективным травителям. Для изготовления многослойных микросхем необходимы как позитивные, так и негативные фоторезисты. Они позволяют получать при проявлении линии шириной порядка 0,3 *мкм*.

**Метод свободной маски.** Этот метод 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 расположения которых соответствуют желаемой конфигурации напыляемого на пленку элемента. Свободную маску укрепляют в маскодержателе, который обеспечивает плотный «прижим» маски и ее фиксированное положение по отношению к подложке. Осаждение испаряемого вещества происходит только на незакрытые маской места подложки.

Существуют различные виды свободных масок и соответственно способы их изготовления. Если маска изготовлена из одного материала (например, металлической фольги), то ее можно назвать монометаллической. 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 и точного воспроизведения размеров элементов. Маска должна 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 мкм) 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, через которое пропускают проволоку диаметром 30—50 мкм. Она используется как электрод и вырезает на всех заготовках одновременно рисунок требуемой конфигурации. Размеры вырезанных отверстий в масках из одной пачки отличаются друг от друга на  $10 \div 15$  мкм, несмотря на непрерывное протягивание проволоки с целью сохранения размера 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 местам будущих 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 маски снижает точность и воспроизводимость результатов. Кроме того, изготовление этим способом масок со сложной конфигурацией элементов затруднительно из-за возможности повреждения элементов при отделении от стальной пластинки. Производительность этого способа ограничена длительностью электрохимического процесса наращивания слоя металла толщиной  $40 \div 50$  мкм.

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. 3.11).

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 линию, ширина которой меньше толщины применяемой фольги. Это справедливо и для случая одновременного или последовательного травления заготовки с двух сторон. С помощью последнего способа на фольге толщиной 50 мкм можно получить щель шириной 50 мкм с точностью  $\pm 2$  мкм при печатании на фоторезисте изображения линии шириной 25 мкм.

Свободные маски из молибдена, тантала, вольфрама, полученные таким способом, обладают высокой термо-

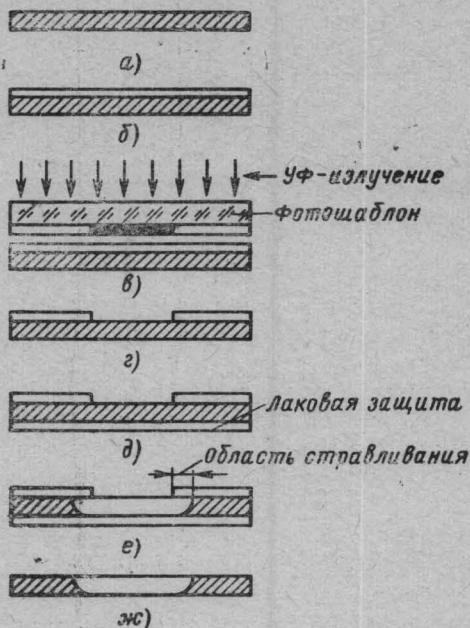


Рис. 3.11. Схема изготовления монометаллических свободных масок фотохимическим способом:

а — заготовка; б — нанесение фоторезиста; в — экспонирование; г — проявление; д — нанесение лаковой защиты; е — травление; ж — готовая маска после удаления фоторезиста и лаковой защиты.

стойкостью, что позволяет 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 на разных масках возникает расхождение в 5—15 *мкм*. Применение этих масок целесообразно в тех случаях, когда условия напыления требуют высокой температуры, а указанная точность удовлетворяет требованиям, необходимым для работы микросхемы.

Устранение колебаний размеров элементов маски из-за растравливания достигается при изготовлении биметаллических масок. Биметаллические маски состоят из двух слоев металла. Один, более толстый (примерно 100 *мкм*), служит основой и обеспечивает жесткость и механическую прочность маски. Другой слой, относительно тонкий, является образующим слоем и обеспечивает высокую точность воспроизводимого рисунка. Наиболее распространены биметаллические маски типа бронза — никель (основа — бронза, а образующий слой — никель). Металл для основного слоя биметаллических масок должен химически растворяться в растворителях, не действующих на образующий слой.

Основной недостаток 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 маски.

Способ изготовления трехслойных масок имеет определенные трудности при изготовлении второго «зеркального» фотошаблона и совмещении этих фотошаблонов с высокой точностью в процессе двухсторонней печати. Для обеспечения требуемой точности номинала резистора при напылении полоски шириной 100 *мкм* точность совмещения должна быть в пределах до 3—5 *мкм*.

Требования к точности совмещения можно снизить применением «зеркального» фотошаблона с равномерно увеличенным по ширине изображением щелей.

**Метод контактной маски.** Контактная маска изготавливается непосредственно на подложке и держится на ней благодаря адгезии маски с подложкой, что позволяет отказаться от маскодержателя. Материал контактной маски (медь, алюминий, никель, окись висмута, фоторе-

зист) должен выдерживать условия нанесения материала тонкой пленки: не испаряться и не взаимодействовать химически с этим материалом; обладать малым коэффициентом диффузии; легко удаляться с подложки способами, не влияющими на свойства материала тонкой пленки.

В зависимости от материала контактной маски существуют две разновидности этого метода. Сущность первого способа (прямой вариант) состоит в том, что на чистую подложку наносят слой фоторезиста, экспонируют и проявляют его, открывая нужные участки подложки, а затем на полученное рельефное изображение наносят сплошной слой материала тонкопленочного элемента. Обработка полученной заготовки в растворителе приводит к удалению материала тонкой пленки, лежащего на слое фоторезиста.

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 с соответствующих мест материал контактной маски в необходимом травителе или растворителе. При этом открываются заданные места поверхности подложки. 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 за собой и лежащий на ней слой материала тонкопленочного элемента, который остается только на тех местах, где был нанесен непосредственно на поверхность подложки. Из сказанного следует, что косвенный вариант метода контактной маски довольно сложен и трудоемок и пользуются им при невозможности применения других способов из-за жестких условий нанесения материала тонкой пленки.

Метод контактной маски является весьма перспективным. Он обеспечивает большую точность и применим не только в случае вакуумного, но и в случае катодного распыления (в последнем случае самый сложный процесс — маскирование), а также пиролизных способов получения тонких пленок.

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.

Кроме описанных, разрабатываются методы, собственно не относящиеся к фотолитографическим, поскольку они не требуют применения фоторезистов. К ним относятся: получение элементов микросхем непосредственно на подложке с помощью ионного пучка, перемещающегося по заданной программе; обработка электронным лучом по программе 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.

### 3.9. Активные элементы гибридных интегральных микросхем

В гибридных интегральных микросхемах в качестве активных элементов применяют полупроводниковые микроминиатюрные приборы: дискретные транзисторы и диоды, транзисторные и диодные матрицы.

Активные элементы для гибридных интегральных микросхем по способу герметизации делятся на бескорпусные и корпусные (табл. 3.8). Корпусные активные элементы заключены в миниатюрный корпус.

Бескорпусные полупроводниковые приборы наилучшим образом удовлетворяют основному требованию, предъявляемому к приборам, используемым в гибридных интегральных микросхемах: иметь малые размеры и вес. В этих приборах кристаллы полупроводника защищены от воздействия внешних факторов методом пассивации поверхности и герметизации при помощи специальных защитных покрытий (лаки, стекло, эмали, смолы, компанды и др.).

Электрические характеристики транзистора 2Т319 следующие:

Начальный ток коллектора  $I_{кн} \leq 33$  мка.

Напряжение между эмиттером и базой в режиме насыщения  $U_{бн} \approx 0,85$  в.

## Характеристики активных элементов гибридных интегральных микросхем

Наименование и тип активного элемента	Конструктивные данные	Рабочие температуры, °С	Влагоустойчивость
Транзисторы кремниевые, $n-p-n$ , 2Т319 (А, Б, В)	Бескорпусные. Максимальные габаритные размеры: $1,1 \times 1,1 \times 0,8$ мм	$-60 \div +80$	Относительная влажность воздуха до 80% при температуре $+20 \pm 10$ °С в течение 24 час
Диодные матрицы, КД901 (А, Б, В, Г)	Бескорпусные. Максимальный диаметр 21 мм, максимальная высота 4,5 мм	$-60 \div +85$	Относительная влажность воздуха 80% при температуре $+25 \pm 10$ °С в течение 24 час
Транзистор, $p-n-p$ , ГТ109В	Металлический корпус. Максимальный диаметр 3,7 мм, высота 2,5 мм	$-20 \div +55$	Относительная влажность воздуха 95—98% при температуре $+40 \pm 50$ °С
Транзистор, $p-n-p$ , ГТ310 (Б, В)	Металлический корпус. Максимальный диаметр 3,7 мм, высота 2,5 мм	$-20 \div +55$	То же

Напряжение между коллектором и эмиттером в режиме насыщения  $U_{кн} \leq 0,33$  в.

Емкость коллектора  $C_k \leq 1/1$  пф.

Статический коэффициент передачи тока  $\beta_{ст} = 15$  (для А).

Статический коэффициент передачи тока  $\beta_{ст} = 25$  (для Б).

Статический коэффициент передачи тока  $\beta_{ст} = 40$  (для В).

Диодные матрицы КД901 имеют прямое напряжение  $U_{пр1} = 0,4$  в (при  $I_{пр} = 10$  мка),  $U_{пр2} = 0,7$  в (при  $I_{пр} = 1$  ма), время восстановления обратного сопротивления  $\tau \leq 20$  нсек, емкость диода  $C_d = 4$  пф (при напряжении смещения  $U_{см} = 0,1$  в).

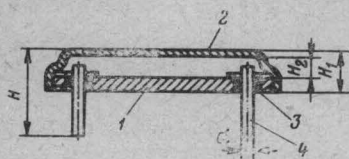
Транзисторы 2Т319 и диодные матрицы КД901 предназначены для использования в гибридных схемах, помещаемых в герметичный корпус.

Транзистор типа ГТ109В имеет коэффициент усиления по току  $\beta = 60 \div 130$  и емкость коллектора  $C_k \leq 30$  пф. Транзистор ГТ310Б имеет статический коэффициент передачи тока  $\beta_{ст} = 60 \div 180$ , емкость коллектора  $C_k \leq 4$  пф, коэффициент шума  $F_{ш} \leq 3$  дб, а транзистор типа ГТ310В соответственно  $\beta_{ст} = 20 \div 70$ ,  $C_k \leq 5$  пф,  $F_{ш} \leq 4$  дб. Эти транзисторы имеют герметичный корпус и могут работать в условиях тропической влажности без дополнительной защиты.



### 3.10. Корпуса для гибридных интегральных микросхем

Корпуса интегральных микросхем должны удовлетворять ряду требований, обеспечивающих надежную эксплуатацию этих микросхем. Корпус должен обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие при сборке, при соединении с другими корпусами и во время эксплуатации. Стремятся получить возможно меньшие размеры корпуса и придать ему форму, позволяющую осуществлять компактную сборку. Конструкция корпуса должна позволять легко и надежно выполнять электрические соединения между микросхемой, расположенной внутри корпуса, и другими микросхемами. Паразитные индуктивности и емкости, несмотря на высокую плотность проводников в корпусе, должны быть минимальными, элементы в микросхеме надежно изолированы друг от друга, а тепловое сопротивление между микросхемой и окружающей средой должно иметь минимально возможную величину.



Вид сверху со снятой крышкой

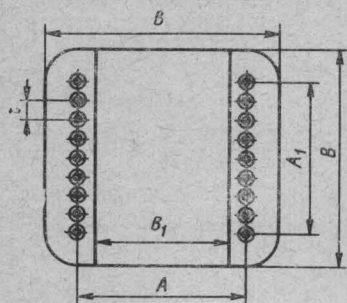


Рис. 3.12. Металлостеклянный квадратный корпус:

1 — фланец; 2 — крышка; 3 — изолятор; 4 — выводы.

В большинстве случаев корпус интегральной микросхемы должен быть герметичным. Внутренняя среда в корпусе не должна сказываться на его рабочих характеристиках и надежности. Корпус должен защищать действующий прибор или микросхему 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 микросхем применяется в основном три вида корпусов: металлостеклянный квад-

Таблица 3.9

## Размеры металlostеклянного квадратного корпуса

Размеры, мм									Количество выводов	Вес, г
$B$	$B_1$	$A$	$A_1$	$H$	$H_1$	$H_2$	$t$	$d$		
24,6	16,2	20	16	9	4	2,7	2	0,45	18	6,5

ратный, металlostеклянный круглый и корпус пенально-го вида.

Металlostеклянный квадратный корпус (рис. 3.12) состоит из металлического основания 1 с впаянными изолированными выводами 4, изолятора 3 и металлической крышки 2. Выводы в основании корпуса герметизируют металlostеклянным спаем. После окончательного монтажа микросхемы герметизацию корпуса производят электроннолучевой сваркой основания 1 с крышкой 2. Допустимая мощность рассеяния 750 мвт. Размеры корпуса приведены в табл. 3.9.

Металlostеклянный круглый корпус (рис. 3.13) состоит из изолятора 1, металлического фланца 3, крышки 2 и выводов 4. Фланец имеет ключ, расположенный против вывода. Выводы в основании корпуса герметизируются металlostеклянным спаем. После окончательного

монтажа микросхемы герметизацию корпуса осуществляют конденсаторной сваркой металлического фланца 3 с крышкой 2. Допустимая мощность рассеяния 60 мвт. Размеры корпусов приведены в табл. 3.10.

Круглый металlostеклянный корпус на 8 выводов может иметь в необходимых случаях вывод заземления. Этот вывод приваривается к фланцу и служит для заземления корпуса. Размеры корпуса остаются неизменными.

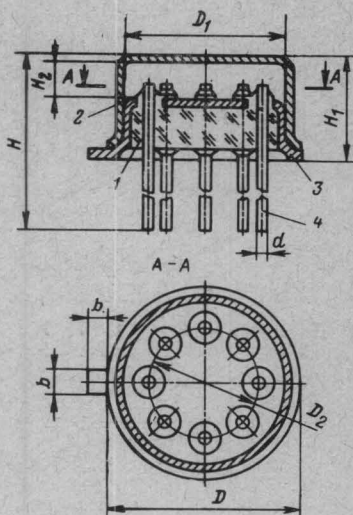


Рис. 3.13. Металlostеклянный круглый корпус:

1 — изолятор; 2 — крышка; 3 — фланец; 4 — выводы.

## Размеры металлостеклянных круглых корпусов

Размеры, мм								Количество выводов	Вес, г
$D$	$D_1$	$D_2$	$H$	$H_1$	$H_2$	$b$	$d$		
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

Корпус пенального вида (рис. 3.14) состоит из алюминиевого кожуха 3, в который вставляют плату с пленочной микросхемой 1. К контактным площадкам приваривают контактную гребенку из меди (лента, толщиной

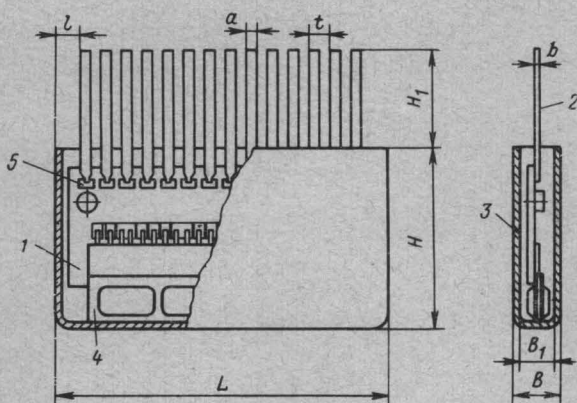


Рис. 3.14. Корпус пенального вида:

1 — плата с пленочной микросхемой; 2 — выводы; 3 — кожух; 4 — кассета; 5 — контактные площадки.

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. 3.11. Герметизация корпуса достигается заливкой компаундом со стороны выводов.

Кроме описанного выше корпуса пенального вида, применяются также пенальные корпуса, состоящие из пластмассового основания с впрессованными в него выводами, изготовленными из бронзы, и алюминиевого ко-

Размеры корпуса пенального вида

Размеры, мм									Количество выводов
<i>L</i>	<i>t</i>	<i>B</i>	<i>B<sub>1</sub></i>	<i>b</i>	<i>H</i>	<i>H<sub>1</sub></i>	<i>a</i>	<i>t</i>	
16	1,2	1,7	1,3	0,08	9	5	0,4	1	14

жуха. На пластмассовом основании размещают подложки различных размеров:  $48 \times 12 \times 0,6$  мм,  $30 \times 12 \times 0,6$  мм и  $20 \times 8 \times 0,6$  мм. В соответствии с этими размерами применяются и три типа аналогичных корпусов, отличающихся габаритными размерами и соответственно равными:  $52 \times 29,8 \times 3,3$  мм,  $34 \times 29,8 \times 3,3$  мм,  $26 \times 26,5 \times 3,1$  мм. Для размещения активных элементов в основании имеются 28, 22 или 20 углублений в зависимости от размера корпуса.

При выборе того или иного вида корпуса руководствуются требованиями, предъявляемыми к условиям работы гибридной интегральной 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 соответствующим защитным лаком.

Рассмотренные выше металlostеклянные и металлополимерные (пенальные) корпуса обеспечивают длительную работу в условиях повышенной относительной влажности до 98% и в температурном диапазоне от  $-60^\circ$  до  $+125^\circ\text{C}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Классификация и система обозначений интегральных микросхем

Интегральные микросхемы по технологическому исполнению подразделяются на три вида: полупроводниковые и совмещенные, гибридные, пленочные. Каждому виду микросхемы присвоено следующее цифровое обозначение

### Классы и группы интегральных микросхем

Класс		Группа		Бук- венный индекс		
Наименование	Обоз- наче- ние	Наименование	Обоз- наче- ние			
Усилители	У	Синусоидальные	С	УС		
		Постоянного тока	Т	УТ		
		Видеоусилители	В	УВ		
		Импульсные	И	УИ		
		Повторители	Э	УЭ		
Генераторы	Г	Прочие	П	УП		
		Синусоидальных колебаний	С	ГС		
Преобразователи	П	Сигналов специальной формы	Ф	ГФ		
		Частоты	С	ПС		
		Фазы	Ф	ПФ		
		Формы	М	ПМ		
		Напряжения	Н	ПН		
		Кодирующие	К	ПК		
		Декодирующие	Д	ПД		
		Прочие	П	ПП		
		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 раздельным запуском	Р	ТР		
		С комбинированным запуском	К	ТК		
		Шмита	Ш	ТШ		
		Динамические	Д	ТД		
Электронные ключи	К	Транзисторные	Т	КТ		
		Диодные	Д	КД		
		Оптоэлектронные	Э	КЭ		
		Прочие	П	КП		
		Верхних частот	В	ФВ		
Фильтры	Ф	Нижних частот	Н	ФН		
		Полосовые	П	ФП		
		Заградительные	Г	ФГ		
		Сглаживающие	С	ФС		
		Схемные	С	ШС		
Линии задержки	Ш	Прочие	П	ШП		
		Схемные	С	ШС		
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		
		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		
		Резисторов	С	НС		
		Конденсаторов	Е	НЕ		
Наборы элементов	Н	Диодов	Д	НД		



Класс		Группа		Бук- венный индекс		
Наименование	Обоз- наче- ние	Наименование	Обоз- наче- ние			
Микросхемы селекции и сравнения	С	Транзисторов	Т	НТ		
		Комбинированные	К	НК		
		Амплитудные	А	СА		
		Временные	В	СВ		
		Частотные	С	СС		
		Фазовые	Ф	СФ		
		Многофункциональные микросхемы	Ж	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				

чение: полупроводниковые и совмещенные — 1, гибридные — 2, пленочные — 3.

По характеру выполнения электрических функций интегральные микросхемы подразделяются на классы, которые, в свою очередь, разделяются по групповым признакам. Классы, группы, обозначения классов и групп, а также буквенные индексы интегральных микросхем приведены в таблице.

Система обозначений интегральных микросхем предусматривает их разделение на серии и типы. Обозначение серии микросхем состоит из трех цифр. Первая цифра обозначает вид микросхемы, а вторая и третья — конструктивно-технологическое исполнение данной серии микросхем. Например, в обозначении серии 201 цифра 2 указывает на принадлежность серии к гибридным микросхемам, а цифры 01 указывают на выполнение схем на толстых пленках в квадратном металло-полимерном корпусе. Обозначение типа микросхемы состоит из четырех частей. Первая часть, представляющая собой цифру, указывает на вид микросхемы, вторая часть, представляющая собой две буквы, характеризует собой функциональный признак микросхемы (берется из вышеприведенной таблицы), третья часть содержит две последние цифры серии и четвертая часть представляет собой цифру, обозначающую порядковый номер микросхемы одинакового функционального признака в данной серии. Например, тип микросхемы 2ЛБ011 обозначает гибридную логическую схему И—НЕ/ИЛИ—НЕ серии 201.

## Список литературы

1. «Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры». Пер. с англ. под ред. А. А. Тудоровского. «Судпромгиз», 1962.
2. Данилин Б. С., Ефимов И. Е. Перспективы микроэлектроники. «Радиотехника», 1971, № 5.
3. Васильев Г. Ф., Данилин Б. С., Ефимов И. Е. Тенденции развития интегральной электроники. «Электронная техника», 1967, серия VI, вып. 6.
4. «Введение в микроэлектронику». Пер. с англ. под ред. И. П. Степаненко. Изд-во «Советское радио», 1968.
5. Валиев К. А., Кармазинский А. Н., Королев М. А. Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах. Изд-во «Советское радио», 1971.
6. «Интегральные схемы. Основы проектирования и технологии». Пер. с англ. под ред. К. И. Мартюшова. Изд-во «Советское радио», 1970.
7. Данилин Б. С., Логунов В. И. «Зарубежная электронная техника», институт «Электроника», 1971, вып. 3.
8. Вул Б. М., Елинсон М. И., Калашников С. Г. «Вестник АН СССР», 1969, № 11.
9. Колосов А. А., Горбунов Ю. И., Наумов Ю. Е. Полупроводниковые твердые схемы. Изд-во «Советское радио», 1965.
10. «Миниатюризация и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры». Пер. с англ. под ред. Н. А. Барканова, М. С. Лихачева. Изд-во «Мир», 1965.
11. «Микроэлектроника». Пер. с англ. под ред. Н. П. Богородицкого. Изд-во «Советское радио», 1966.
12. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок. Изд-во «Энергия», 1967.
13. «Пленочная микроэлектроника». Пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона. Изд-во «Мир», 1968.
14. Иванов-Есипович Н. К. Инженерные основы пленочной микроэлектроники. Изд-во «Энергия», 1968.
15. «Интегральные схемы». Пер. с англ. под ред. А. А. Колосова. Изд-во «Советское радио», 1968.
16. «Микроэлектроника». Сб. статей под ред. Ф. В. Лукина. Вып. 1—5. Изд-во «Советское радио», 1967—1972.
17. «Основы технологии кремниевых интегральных схем». Пер. с англ. под ред. В. Н. Мордковича и Ф. П. Пресса. Изд-во «Мир», 1969.
18. Валиев К. А., Казеннов Г. Г., Прохоров К. Я. Логические интегральные твердые схемы и технология их изготовления. «Электронная техника», 1967, серия VI, вып. 6.
19. Лаврищев В. П. Получение конфигурации элементов тонкопленочных микросхем. «Электронная техника», 1967, серия VI, вып. 6.

20. Ефимов И. Е., Блинов Г. А., Воженни И. Н. Методы изготовления и электрофизические характеристики тонкопленочных конденсаторов. «Электронная техника», 1968, серия V, вып. 2.
21. Алексенко А. Г., Малин Б. В., Степаненко И. П. Современная микроэлектроника и ее перспективы. «Известия вузов». Радиоэлектроника, 1968, том XI, вып. 7.
22. Ефимов И. Е., Кальман И. Г., Мартынов В. И. Надежность интегральных полупроводниковых схем. Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1969.
23. «Электронная техника», 1970, серия VI, вып. 2.
24. Наумов Ю. Е. Интегральные логические схемы. Изд-во «Советское радио», 1970.
25. «Электронная техника», 1968, серия VI, вып. 2; 1969, серия VI, вып. 3.
26. Прангишвили И. В., Абрамова Н. А., Бабичева Е. В., Игнатущенко В. В. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. Изд-во «Наука», 1967.
27. Физика тонких пленок. Под ред. Г. Хасса и Р. Э. Туна. Пер. с англ., т. I, II и III. Изд-во «Советское радио», 1968.
28. Пленочная микроэлектроника. Пер. с англ. Под ред. М. И. Елинсона. Изд-во «Мир», 1968.
29. Данилин Б. С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. Изд-во «Энергия», 1972.
30. Елинсон М. И. Современное состояние и перспективы пленочной электроники и некоторых разделов оптоэлектроники. «Радиотехника и электроника», 1968, т. XIII, № 1.
31. Смолко Г. Г., Заумыслов Ю. В., Желтов В. Н. Электронно-ионная технология изготовления интегральных схем. «Электронная промышленность», 1970, № 1.
32. Микроэлектроника. Сборник статей под ред. Т. М. Агаханяна. Вып. 1. Атомиздат, 1971, изд. МИФИ (сб. статей МИФИ).
33. Микроэлектроника и большие системы. Пер. с англ. под ред. В. Г. Толстова. Изд-во «Мир», 1967.
34. Говядинов В. А. Проблемы и перспективы развития радиоэлектроники. «Обмен опытом в радиопромышленности». 1972, № 12.
35. Анализ и расчет интегральных схем. Пер. с англ. под ред. Б. И. Ермолаева. Изд-во «Мир», 1969.
36. Алексенко А. Г. Основы микросхемотехники. Изд-во «Советское радио», 1971.
37. Манукян Э. М. Новые направления и перспективы развития микроэлектроники. Изд-во «Машиностроение», 1972.
38. Гаврилов С. Н., Никулин С. М. Микроэлектроника. Изд-во «Энергия», 1970.
39. Васенков А. А. О планировании развития микроэлектроники. «Электронная промышленность», 1972, № 7.
40. Елинсон М. И. Фундаментальные проблемы микроэлектроники и научно-технический прогресс. «Микроэлектроника», 1972, т. 1, вып. 1.
41. Свистунов Ю. А., Солдатенков В. А. Микроэлектроника. М., «Знание», 1970.
42. Кхамбата А. Большие интегральные схемы. Пер. с англ. под ред. Б. И. Ермолаева. Изд-во «Мир», 1971.
43. Машинный расчет интегральных схем. Пер. с англ. под ред. К. А. Валиева, Г. Г. Қазеннова, А. П. Голубева. Изд-во «Мир», 1971.

44. Барканов Н. А., Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Митрофанов О. В., Самохвалов Г. К., Шер Ю. А. Основы микроэлектроники и технологии производства микросхем. Ч. 1, 2. М., Изд. МИЭТ, 1971.
45. Иванов-Есипович Н. К. Технология микросхем. Изд-во «Высшая школа», 1972.
46. Валиев К. А., Контарев В. Я. Полупроводниковая интегральная микроэлектроника и некоторые тенденции ее развития. «Микроэлектроника», 1972, т. 1, вып. 1.
47. Юдицкий Д. И., Черкалов Ю. Н. Большие кибернетические системы и микроэлектроника. «Микроэлектроника», 1972, т. 1, вып. 1.
48. Ржанов А. В. Новые функциональные полупроводниковые приборы с переносом заряда. «Микроэлектроника», 1972, т. 1, вып. 1.
49. Алексенко А. Г. Перспективы развития нового поколения средств микроэлектроники. «Микроэлектроника», 1972, т. 1, вып. 1.
50. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. Изд-во «Советское радио», 1971.
51. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. Изд-во «Высшая школа», 1972.
52. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок. Изд-во «Энергия», 1967.

# Оглавление

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Микроэлектроника и перспективы ее развития . . . . .</b>	<b>5</b>
1.0. Терминология . . . . .	5
1.1. Общая характеристика микроэлектроники . . . . .	7
1.2. Основные факторы, определяющие развитие микроэлектроники . . . . .	16
Материалы . . . . .	16
Технология . . . . .	18
Оборудование . . . . .	23
Подготовка инженерных кадров . . . . .	27
1.3. Большие интегральные схемы . . . . .	29
1.4. Интегральные микросхемы СВЧ диапазона . . . . .	31
1.5. Применение интегральных микросхем в ЭВМ . . . . .	34
1.6. Применение интегральных микросхем в аппаратуре связи и бытовой аппаратуре . . . . .	35
1.7. Новые направления микроэлектроники . . . . .	36
<b>Глава 2. Полупроводниковые интегральные микросхемы . . . . .</b>	<b>45</b>
2.1. Основные технологические процессы . . . . .	46
2.2. Методы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем . . . . .	61
Метод разделительной диффузии . . . . .	62
Метод изоляции элементов двуокисью кремния . . . . .	66
Метод совмещенных схем . . . . .	69
<b>Глава 3. Гибридные интегральные микросхемы . . . . .</b>	<b>70</b>
3.1. Основные технологические этапы изготовления гибридных интегральных микросхем . . . . .	70
3.2. Подложки для пленочных интегральных микросхем . . . . .	73
3.3. Пленочные резисторы . . . . .	77
3.4. Пленочные конденсаторы . . . . .	83
3.5. Индуктивные элементы в пленочных интегральных микросхемах . . . . .	90
3.6. Пленочные проводники и контактные площадки . . . . .	92
3.7. Межслойная изоляция . . . . .	94
3.8. Методы получения заданных конфигураций пассивных элементов пленочных интегральных микросхем . . . . .	95
3.9. Активные элементы гибридных интегральных микросхем . . . . .	102
3.10. Корпуса для гибридных интегральных микросхем . . . . .	104
Приложение. Классификация и система обозначений интегральных микросхем . . . . .	107
Список литературы . . . . .	110



32 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО • СОВЕТСКОЕ РАДИО •

