

## Лекция 13

### ЭЛЕМЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника прошла несколько этапов развития, за время которых сменилось несколько поколений элементной базы: дискретная электроника электровакуумных приборов, дискретная электроника полупроводниковых приборов, интегральная электроника микросхем (микросистемная электроника), интегральная электроника функциональных микроэлектронных устройств (функциональная микросистемная электроника).

Современный этап развития электроники характеризуется широким применением *интегральных микросхем* (ИМС). Это связано со значительным усложнением требований и задач, решаемых электронной аппаратурой, что привело к росту числа элементов в ней. Число элементов постоянно увеличивается. Разрабатываемые сейчас сложные системы содержат десятки миллионов элементов. В этих условиях исключительно важное значение приобретают проблемы повышения надежности аппаратуры и ее элементов, микроминиатюризация электронных компонентов и комплексной миниатюризации аппаратуры. Все эти проблемы успешно решает микроэлектроника.

Разработка любых ИМС представляет собой довольно сложный процесс, требующий решения разнообразных научно-технических проблем. Вопросы выбора конкретного технологического воплощения ИМС решаются с учетом особенностей разрабатываемой схемы, возможностей и ограничений, присущих различным способам изготовления, а также технико-экономического обоснования целесообразности массового производства.

Эти вопросы находят решение путем использования двух основных классов микросхем – полупроводниковых и гибридных. Оба эти класса могут иметь различные варианты структур, каждый из которых с точки зрения проектирования и изготовления обладает определенными преимуществами и недостатками. По своим конструктивным и электрическим характеристикам полупроводниковые и гибридные интегральные схемы дополняют друг друга и могут одновременно применяться в одних и тех же радиоэлектронных комплексах.

Современная микроэлектроника базируется на интеграции дискретных элементов электронной техники, при которой каждый элемент схемы формируется отдельно в полупроводниковом кристалле. При этом в основе создания, ИМС лежит принцип элементной (технологической) интеграции, сопровождающейся микроминиатюризацией элементов (активных и пассивных) микросхемы. В ИМС можно выделить области, представляющие собой активные (диоды, транзисторы) и пассивные (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) элементы. В интегральной микроэлектронике сохраняется главный принцип дискретной электроники, основанной на разработке электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип неизбежно связан с ростом числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций.

Повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определенные пределы. Интеграция свыше нескольких сотен тысяч элементов (в отдельных случаях и миллионов) на одном кристалле оказывается экономически нецелесообразной и технологически трудно выполнимой.

*Функциональная микроэлектроника* предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, основываясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле. В этом случае локальному объекту твердого тела придаются такие свойства, которые требуются для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления желаемой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сверхпроводники, сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.).

Таким образом, функциональная микроэлектроника охватывает вопросы получения специальных сред с наперед заданными свойствами и создания различных электронных устройств методом физической интеграции, т.е. использования таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить приборы со сложным схемотехническим или системотехническим функциональным назначением.

Изделия микроэлектроники – интегральные микросхемы различной степени интеграции, микросборки, микропроцессоры, мини- и микро-ЭВМ – позволили осуществить проектирование и промышленное производство функционально сложной радио- и вычислительной аппаратуры, отличающейся от аппаратуры предыдущих поколений лучшими параметрами, более высокими надежностью и сроком службы, меньшими потребляемой энергией и стоимостью. Аппаратура на базе изделий микроэлектроники находит широкое применение во всех сферах деятельности человека. Созданию систем автоматического проектирования, промышленных роботов, автоматизированных и автоматических производственных линий, средств связи и многому другому способствует микроэлектроника.

В настоящей главе рассмотрены основные элементы микроэлектроники, методы их изготовления и используемые материалы.

### **13.1 МДП-структуры**

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник, или сокращенно МДП-структуры, широким интересом к изучению их физических свойств обязаны появлению планарной технологии и развитию нового класса полупроводниковых приборов, работающих на основе эффекта поля, таких как приборы с зарядовой связью, полевые транзисторы с изолированным затвором, репрограммируемые элементы памяти с плавающим затвором и т.п. МДП-структуры позволяют анализировать основные процессы, протекающие в приборах такого рода, и являются чрезвычайно удобными объектами исследования. Устройство МДП-структуры следует из ее названия.

МДП-структура (рис. 13.1) представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, называемую подложкой, закрытую с планарной стороны диэлектриком. Металлический электрод, нанесенный на диэлектрик, носит название затвора, а сам диэлектрик называется подзатворным. На обратную непланарную сторону полупроводниковой пластины наносится металлический электрод, называющийся

омическим контактом. Довольно часто в качестве диэлектрика в МДП-структурах используют окислы, поэтому вместо МДП употребляется название МОП-структура.

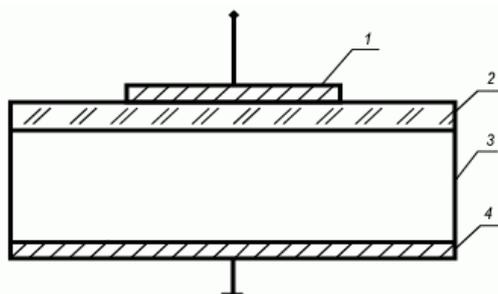


Рис. 13.1 Устройство МДП структуры: 1 - затвор, 2 - подзатворный диэлектрик, 3 - полупроводниковая подложка, 4 - омический контакт

### 13.2 Гомо- и гетероструктуры

*Гомопереход* – контакт двух областей с разными типами проводимости (или концентрациями легирующей примеси) в одном и том же кристалле полупроводника. Различают переходы типа  $p-n$  или  $n-p$ , в которых одна из двух контактирующих областей легирована донорами, другая акцепторами, а также  $(n^+-n)$ -переходы (обе области легированы донорной примесью, но в разной степени; знак + означает большую степень легирования) и  $(p^+-p)$ -переходы (обе области легированы акцепторной примесью).

*Гетероструктура* – термин в физике полупроводников, обозначающий выращенную на подложке слоистую структуру из различных полупроводников, в общем случае отличающихся шириной запрещенной зоны. Между двумя различными материалами формируется гетеропереход, на котором возможна повышенная концентрация носителей, и отсюда – формирование вырожденного двумерного электронного газа. В отличие от гомоперехода обладает большей гибкостью в конструировании нужного потенциального профиля зоны проводимости и валентной зоны.

Для роста гомо- и гетероструктур используют разные методы, среди которых можно выделить два основных:

- *Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) или молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)* – эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими границами и с заданным профилем легирования. В установках МПЭ имеется возможность исследовать качество плёнок *in situ* (то есть прямо в камере во время роста). Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарно гладкой поверхностью. Технология молекулярно-пучковой эпитаксии была создана в конце 1960-х годов Дж.Р. Артуром (J.R. Arthur) и Альфредом Чо (Alfred Y. Cho).

- *Химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений* (англ. Metalorganic chemical vapour deposition, MOCVD) – метод получения материалов, в том числе эпитаксиальных пленок полупроводников, путём термического разложения (пиролиза) металлоорганических соединений, содержащих необходимые химические элементы. Например, арсенид галлия выращивают при использовании триметилгаллия  $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$  и трифенилмышьяка  $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{As}$ . В отличие от МЛЭ рост пленки

происходит не в высоком вакууме, а из парогазовой смеси пониженного давления (от 2 до 100 кПа).

Первый метод позволяет выращивать гетероструктуры с прецизионной точностью (до атомного монослоя). Второй же не отличается такой точностью, но по сравнению с первым методом обладает более высокой скоростью роста.

За развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной оптоэлектроники российский ученый Жорес Алферов получил Нобелевскую премию по физике в 2000 году. В рамках развития нанотехнологий ведётся активное создание производств, связанных с гетероструктурами, а именно производство солнечных батарей и светодиодов.

### 13.3 Плёночные и гибридные интегральные схемы: основные понятия

*Электронный элемент* – это конструктивно самостоятельное образование, выполняющее одну элементарную функцию (резистор, конденсатор, катушка индуктивности).

*Электронная схема* реализуется на базе многих дискретных частей (запоминающий элемент, усилительный каскад, логический элемент).

*Функциональный модуль* появляется при соединении нескольких элементарных схем в одну конструктивно законченную сборочную единицу.

*Узел* – конструктивное объединение нескольких модулей.

Внедрение специальной технологии производства тонких слоев различной проводимости на изоляционной подложке либо целенаправленное изменение проводимости в определенных зонах полупроводникового материала позволило воплотить и объединить разные электрические функции в едином технологическом процессе. При установке такого элемента в корпус с необходимыми выводами получают *интегральную микросхему* (ИМС). Одна ИМС заменяет несколько элементарных схем, выполненных на базе дискретных частей.

В настоящее время употребляют две разновидности технологических действий производства ИМС: 1) тонкопленочные процессы, 2) полупроводниковые процессы. Так как тонкопленочная технология позволяет изготавливать лишь пассивные элементы, а полупроводниковая – активные элементы, то целесообразно употреблять их комбинацию. Это приводит к созданию гибридных ИМС.

Понятия *плёночная технология* включает в себя процессы термовакuumного испарения и катодного распыления, а также трафаретную печать.

*Планарная технология* – совокупность технологических операций, используемая при изготовлении планарных (плоских, поверхностных) полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Особенность планарной технологии состоит в том, чтобы после завершения каждой технологической операции восстанавливается плоская (планарная) форма поверхности пластины, что позволяет создавать достаточно сложную структуру, используя конечный набор технологических операций.

Планарная технология обеспечивает возможность одновременного изготовления в едином технологическом процессе огромного числа дискретных полупроводниковых приборов или ИМС на одной подложке, что позволяет существенно снизить их стоимость. Также в случае изготовления на одной пластине идентичных приборов параметры всех приборов оказываются близкими. Ограничителем является только площадь подложки,

поэтому диаметр подложек по мере развития технологий производства подложек стремятся увеличивать.

**Пленочные ИМС** имеют подложку (плату) из диэлектрика (стекло, керамика и др.). Пассивные элементы, т.е. резисторы, конденсаторы, катушки и межэлементные соединения, выполняются в виде разных пленок, нанесенных на подложку. Активные элементы (диоды, транзисторы) не делают пленочными. Таким образом, пленочные ИМС содержат лишь пассивные элементы.

Принято различать ИМС *тонкопленочные*, у которых толщина пленок не более 2 мкм, и *толстопленочные*, у которых толщина пленок существенно больше. Разница между этими ИМС заключается не столько в толщине пленок, сколько в различной технологии их нанесения. Тонкопленочные ИМС – это схемы, элементы которых совместно с межэлементными соединениями создаются в виде тонких пленок, (проводящих, резистивных, диэлектрических и полупроводниковых) разных материалов, осажденных на общей стеклянной или керамической подложке. Схемы подобного типа изготавливают напылением в вакууме через соответствующие маски. Подложки представляют собой диэлектрические пластинки толщиной 0,5–1,0 мм, тщательно отшлифованные и отполированные.

При изготовлении *пленочных резисторов* на подложку наносят резистивные пленки. Если сопротивление резистора не должно быть очень большим, то пленка делается из металлического сплава высокого сопротивления, например, из нихрома. А для резисторов высокого сопротивления применяют смесь сплава металлов с керамикой. На концах резистивной пленки делаются выводы в виде металлических пленок, которые являются проводниками, соединяющими резистор с другими элементами. Сопротивление пленочного резистора зависит от толщины, ширины и длины пленки, её материала.

Удельное сопротивление пленочных резисторов выражают в особых единицах – омах на квадрат, так как сопротивление данной пленки в форме квадрата не зависит от размеров этого квадрата. Действительно, если сделать сторону квадрата, к примеру, в два раза больше, то длина пути тока возрастет вдвое, но и площадь поперечного сечения пленки для тока также возрастет вдвое, следовательно, сопротивление остается без изменения.

Тонкопленочные резисторы по точности и стабильности превосходят толстопленочные, но производство их сложнее и дороже. У тонкопленочных резисторов удельное сопротивление может быть от 10 до 300 Ом на квадрат. Точность их производства зависит от подгонки. Подгонка состоит в том, что резистивный слой каким-либо методом частично удаляется и сопротивление, сделанное умышленно несколько меньшим, чем необходимо, возрастает до требуемого значения. В течение долгого времени эксплуатации сопротивление этих резисторов незначительно меняется.

Толстопленочные резисторы имеют удельное сопротивление от 2 Ом до 1 МОм на квадрат. Их стабильность во времени хуже, чем у тонкопленочных резисторов.

*Пленочные конденсаторы* чаще всего изготавливают с двумя обкладками. Одна из них наносится на подложку, потом на нее наносят диэлектрическую пленку, а сверху размещают вторую обкладку, содержащую, так же как и первая, соединительные проводящие элементы. В зависимости от толщины диэлектрика конденсаторы бывают тонко- и толстопленочными. Диэлектриком традиционно служат оксиды кремния, алюминия либо титана. Удельная емкость может быть от десятков до тысяч пикофард на квадратный миллиметр, и соответственно этому при площади конденсатора в 25 мм<sup>2</sup>

достигаются номинальные емкости от сотен до десятков тысяч пикофарад. Точность производства таких конденсаторов составляет  $\pm 15\%$ .

*Пленочные катушки* делаются в виде плоских спиралей, чаще всего прямоугольной формы. Ширина проводящих полосок и просветов между ними составляет несколько десятков микрометров. Тогда создается удельная индуктивность  $10\div 20$  мкГн/мм<sup>2</sup>. На площади 25 мм<sup>2</sup> можно получить индуктивность до 0,5 мГн. Обычно такие катушки изготавливают с индуктивностью не более нескольких микрогенри. Увеличить индуктивность можно нанесением на катушку ферромагнитной пленки, которая будет выполнять роль сердечника.

**Гибридные ИС** (ГИС) – интегральные схемы, в которых используются плёночные пассивные элементы и навесные элементы (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы), называемые компонентами ГИС. Электрические связи между элементами и компонентами осуществляются с помощью плёночного либо проволочного монтажа.

*Навесными элементами* в микроэлектронике называют миниатюрные, обычно бескорпусные диоды и транзисторы, представляющие собой самостоятельные элементы. Время от времени в гибридных ИС навесными могут быть и некие пассивные элементы, к примеру, миниатюрные конденсаторы с такой большой емкостью, что их нереально выполнить в виде пленок. Это могут быть и миниатюрные трансформаторы. В некоторых вариантах в гибридных ИС навесными являются целые полупроводниковые ИМС. Проводники от транзистора либо от остальных навесных частей присоединяют к подходящим точкам схемы чаще всего способом термокомпрессии (провод при высокой температуре прижимают под большим давлением).

Гибридные ИС изготавливают следующим образом. Сначала подложку тщательно шлифуют и полируют. Потом наносят резистивные пленки, далее – нижние обкладки конденсаторов, катушки и соединительные полосы, после чего – диэлектрические пленки, а потом опять металлические. Навешивают («приклеивают») активные и остальные дискретные элементы, и их выводы присоединяют к подходящим точкам схемы. Схему помещают в корпус и присоединяют к контактным штырькам корпуса. Осуществляют испытание схемы. Затем корпус герметизируют и маркируют, т.е. указывают нужные условные обозначения.

Разновидность гибридных ИС – так называемые *микросборки*. Обычно они содержат разные элементы, составляющие и интегральные схемы. Особенность микросборок состоит в том, что они являются изделиями частного использования, т.е. изготавливаются для конкретного типа аппаратуры. А обычные ГИС представляют собой изделия общего использования, пригодные для разных видов аппаратуры. Иногда микросборками также называют наборы нескольких активных либо пассивных элементов, находящихся в одном корпусе и имеющих самостоятельные выводы. Иначе эти наборы еще называют *матрицами*.

## 13.4 Материалы тонкопленочных ГИС

### 13.4.1 Контакты

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС для получения омических контактов к кремнию, межэлементных соединений и контактных площадок, а также

электродов затвора МОП-структур широкое распространение получили пленки алюминия, что обусловлено следующими достоинствами этого металла:

- низкой стоимостью Al и возможностью использования для всех процессов металлизации одного металла, что значительно упрощает и удешевляет технологию и предотвращает возникновение гальванических эффектов;
- высокой электропроводностью пленок Al, близкой к электропроводности объемного материала; легкостью испарения Al в вакууме из вольфрамовых тиглей и электронно-лучевых испарителей;
- высокой адгезией Al к кремнию и его окислам; низкоомностью контакта Al с кремнием *p*- и *n*-типов проводимости;
- заметной растворимостью кремния в Al с образованием твердого раствора, почти не уменьшающего электропроводности;
- отсутствием в системе Al-Si химических соединений;
- химическим взаимодействием Al с SiO<sub>2</sub>, частично остающимся на контактных площадках; химической стойкостью Al в окислительной среде и радиационной стойкостью;
- легкостью проведения фотолитографических операций для получения конфигурации проводящих дорожек с использованием травителей, не реагирующих с кремнием и двуокисью кремния; хорошей пластичностью Al и устойчивостью к циклическим изменениям температуры.

Наряду с перечисленными достоинствами металлизация алюминием обладает рядом существенных недостатков, важнейшими из которых являются следующие:

- малая величина энергии активации атомов Al, вызывающая электромиграцию при плотностях тока примерно 10<sup>6</sup> А/см<sup>2</sup> и повышенных температурах, в результате чего появляются пустоты в пленках;
- возможность короткого замыкания через диэлектрик в многоуровневых системах металлизации вследствие образования острых выступов на пленке в результате электромиграции и рекристаллизации Al;
- опасность гальванической коррозии Al при одновременном использовании других металлов
- большая скорость диффузии Al по границам зерен, не допускающая использования приборов с металлизацией Al при температурах более 500°С;
- интенсивное химическое взаимодействие Al с двуокисью кремния при температуре около 500°С;
- низкая точка плавления (около 577°С) в эвтектике систем алюминий-кремний;
- большое различие (в 6 раз) коэффициентов термического расширения Al и кремния;
- мягкость Al и, следовательно, невысокая механическая прочность пленок;
- невозможность присоединения выводов с помощью пайки;
- высокое пороговое напряжение в МОП-структурах в связи с большой работой выхода.

Из-за перечисленных недостатков алюминиевая металлизация не применяется в ИС и транзисторах с мелкими эмиттерными переходами, а также в МДП ИС для создания затворных электродов. Для этой цели применяют однослойные и многослойные системы из различных металлов (в том числе Al для получения верхнего слоя). Наиболее

подходящими материалами являются вольфрам и молибден. В частности, вольфрам имеет практически одинаковый с кремнием температурный коэффициент сопротивления (ТКС), хороший омический контакт к кремнию *p*- и *n*- типов проводимости, малое (в 2,5 раза) отличие от алюминия по электропроводности, самое высокое из всех металлов значение энергии активации при самодиффузии, высокую температуру плавления эвтектики с кремнием, химическую инертность на воздухе и в водном растворе плавиковой кислоты, а также высокую твердость, что исключает возможность появления царапин на пленке.

Благодаря высокой температурной стойкости W его можно использовать для многоуровневой металлизации, чередуя слои двуокиси кремния с W. При термообработке на поверхности пленки не образуются холмики, и нет опасности короткого замыкания между токоведущими дорожками в многослойной металлизации. Кроме того, пленки W (также как и пленки Mo) являются металлургическим барьером, препятствующим образованию межкристаллической структуры кремния и алюминия.

Недостатком металлизации W является трудность получения пленок (для чего обычно используют пиролиз гексофторида вольфрама) и их травления (в щелочном растворе ферроцианида). Оба эти процесса сложны и проводятся с использованием токсичных веществ. Кроме того, непосредственно к вольфраму невозможно подсоединить внешние выводы, поэтому поверх него на контактные площадки наносят какой-либо другой металл (Pt, Ni, Au, Cu, Al и др.).

#### 13.4.2 Подложки

Материал, используемый для изготовления подложек, должен иметь однородный состав, гладкую поверхность (с чистотой обработки по 12÷14 классу), обладать высокой электрической и механической прочностью, быть химически инертным, обладать высокой теплостойкостью и теплопроводностью, коэффициенты термического расширения материала подложки и осаждаемой пленки должны быть близки по значению. Вполне понятно, что практически почти невозможно подобрать материалы для подложек, которые в равной степени удовлетворяли бы всем перечисленным требованиям.

В качестве подложек для гибридных ИС используют ситаллы, фотоситаллы, высокоглиноземистую и бериллиевую керамику, стекло, полиимид, а также металлы, покрытые диэлектрической пленкой.

*Ситаллы* – стеклокерамические материалы, получаемые путем термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство ситаллов получено в системах  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$  и  $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$  (где в качестве R могут быть Ca, Mg, Ba).

В отличие от большинства высокопрочных тугоплавких кристаллических материалов ситаллы обладают хорошей гибкостью при формировании. Их можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом, причем они выдерживают резкие перепады температуры. Они имеют низкие диэлектрические потери, по электрической прочности не уступают лучшим сортам вакуумной керамики, и по механической прочности в 2÷3 раза прочнее стекла. Ситаллы непористы, газонепроницаемы и имеют незначительное газовыделение при высоких температурах.

Поскольку по своей структуре ситаллы многофазны, то при воздействии на них различных химических реактивов, применяемых, например, для очистки поверхности подложки от загрязнений, возможно глубокое селективное травление отдельных фаз, приводящее к образованию резкого и глубокого рельефа на поверхности подложки.

Наличие шероховатостей на поверхности подложки снижает воспроизводимость параметров и надежность тонкопленочных резисторов и конденсаторов. Поэтому для уменьшения высоты и сглаживания краев микронеровностей иногда на подложку наносят грунтующий слой из материала, обладающего хорошими диэлектрическими и адгезионными свойствами, а также однородной структурой (например, слой монооксида кремния толщиной в несколько микрометров).

Из *стекол* в качестве подложек применяются аморфные силикатные стекла, бесщелочное стекло С48-3, боросиликатное и кварцевое стекло. Силикатные стекла получают из жидкого расплава окислов путем их переохлаждения, в результате чего сохраняется структура жидкости, т.е. характерное аморфное состояние. Хотя в стеклах имеются области с кристаллической фазой (кристаллиты), они распределены хаотично по всей структуре, занимают малую часть объема и существенного влияния на аморфную природу стекла не оказывают.

Кварцевое стекло является однокомпонентным силикатным стеклом, состоит практически из одного оксида кремния и получается путем плавления его природных разновидностей. Оно имеет очень низкий коэффициент термического расширения, что определяет его исключительно высокую термостойкость. По сравнению с другими стеклами кварцевое стекло инертно к действию большинства химических реагентов. Органические и минеральные кислоты (за исключением плавиковой и фосфорной кислот) любых концентраций даже при повышенной температуре почти не действуют на кварцевое стекло.

*Керамические подложки* находят ограниченное применение из-за высокой пористости. Достоинствами этих подложек являются высокая прочность и теплопроводность. Так, например, подложка из керамики на основе  $\text{BeO}$  обладает в 200÷250 раз более высокой теплопроводностью, чем стекло, поэтому при напряженных тепловых режимах целесообразно применять бериллиевую керамику. Помимо бериллиевой керамики применяют высокоглиноземистую (94%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) керамику, плотный алюмооксид, стеатитовую керамику, а также глазурованную керамику на основе окиси алюминия. Следует отметить, что глазури имеют толщину менее 100 мкм, и поэтому не являются заметным барьером между пленкой и подложкой при невысоких уровнях мощности. Микронеровности необработанной керамики в сотни раз больше, чем у стекла, и достигают нескольких микрометров. Они могут быть значительно снижены путем полировки, однако при этом существенно загрязняется поверхность керамической подложки.

Наличие загрязнений на подложке оказывает существенное влияние как на адгезию, так и на электрофизические свойства пленок. Поэтому перед осаждением приходится тщательно очищать подложки, а также защищать их от возможности появления масляных пленок, которые могут возникнуть в результате миграции паров рабочих жидкостей из насосов. Эффективным способом очистки является ионная бомбардировка поверхности подложки в плазме тлеющего разряда. Для этого в рабочей камере вакуумной установки обычно предусматриваются особые электроды, на которые от маломощного высоковольтного источника подается напряжение в несколько киловольт. Электроды чаще всего изготавливают из алюминия, поскольку среди металлов он имеет самую низкую скорость катодного распыления.

Даже незначительное загрязнение подложки может полностью изменить условия роста пленки. Если загрязнения располагаются на подложке в форме небольших

изолированных друг от друга островков, то в зависимости от того, какая энергия связи больше – между материалом пленки и материалом загрязнения или же между материалом пленки и подложкой – пленка может образоваться либо на этих островках, либо на обнаженной части подложки.

Адгезия пленки в очень сильной степени зависит от наличия окисного слоя, который может возникнуть в процессе осаждения между пленкой и подложкой. Такой окисный слой образуется, например, при осаждении железа и никрома, чем и объясняется хорошая адгезия этих пленок. Пленки из золота, которое не подвержено окислению, имеют плохую адгезию, и поэтому между золотом и подложкой приходится создавать промежуточный подслои из материала с высокой адгезией. Желательно, чтобы образующийся слой окисла был сосредоточен между пленкой и подложкой. Если же окисел будет диспергирован по всей пленке или же будет располагаться на ее поверхности, то свойства пленки могут сильно измениться. На образование окислов сильное влияние оказывают состав остаточных газов в рабочем объеме установки и в особенности наличие паров воды.

### **13.4.3 Тонкопленочные резисторы**

Если еще недавно тонкопленочные резисторы использовались главным образом при изготовлении гибридных ИС, то за последние годы они все шире начинают применяться в производстве монокристаллических ИС по совмещенной технологии. Замена диффузионных резисторов на тонкопленочные дает целый ряд преимуществ: низкий температурный коэффициент сопротивления, низкую паразитную емкость, более высокую радиационную стойкость, более высокую точность номинала и др.

Материалы, используемые при изготовлении резистивных пленок, должны обеспечивать возможность получения широкого диапазона стабильных во времени резисторов с низким ТКС, обладать хорошей адгезией, высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к длительному воздействию повышенных температур. При осаждении материала на подложке должны образовываться тонкие, четкие линии сложной конфигурации с хорошей повторяемостью рисунка от образца к образцу.

Резистивные пленки чаще всего имеют мелкозернистую дисперсную структуру. Наличие дисперсности в структуре пленок позволяет в первом приближении рассматривать их электросопротивление как суммарное сопротивление отдельных гранул и барьеров между ними, при котором характер общего сопротивления определяет величину и знак ТКС. Так, например, если преобладающим является сопротивление самих зерен, то проводимость пленки имеет металлический характер и ТКС будет положительным. С другой стороны, если сопротивление обусловлено прохождением электронов через промежутки между зернами (что обычно имеет место при малых толщинах пленки), то проводимость будет иметь полупроводниковый характер и ТКС соответственно будет отрицательным.

В производстве монокристаллических ИС используются главным образом высокоомные резисторы. Для того чтобы резисторы имели минимально возможные габариты, они должны изготавливаться с тем же разрешением и допуском, что и другие элементы ИС. Это исключает применение для получения требуемой конфигурации

резисторов свободных металлических масок и позволяет осуществлять ее только с помощью фотолитографии.

Процесс изготовления резисторов должен быть совмещен с основным технологическим процессом изготовления всей кремниевой ИС по планарной или эпитаксиально-планарной технологии. Так, например, резистивные пленки не должны быть чувствительны к присутствию на кремниевой пластинке нитрида кремния, фосфора, боросиликатного стекла и других материалов, используемых в производстве монокристаллических ИС. Они должны выдерживать сравнительно высокую температуру ( $500\div 550^\circ\text{C}$ ), которая имеет место в процессе герметизации ИС, и в некоторых случаях не должны изменять свои свойства под воздействием окислительной среды. В монокристаллических ИС для изготовления резисторов используют в основном нихром и тантал.

При изготовлении гибридных ИС используется значительно более широкая номенклатура материалов для тонкопленочных резисторов. В качестве низкоомных пленок с  $R_s$  от 10 до 300 Ом используют пленки хрома, нихрома и тантала. Получение пленок хрома с воспроизводимыми электрофизическими свойствами несколько затруднено его способностью образовывать соединения (особенно окисные) при взаимодействии с остаточными газами в процессе испарения и осаждения. Значительно более стабильными характеристиками обладают резисторы на основе хромоникелевого сплава (20% Cr и 80% Ni). Пленки тантала благодаря наличию различных его структурных модификаций имеют очень широкий диапазон поверхностных сопротивлений (от нескольких Ом до нескольких МОм). В качестве высокостабильного резистивного материала применяют также нитрид тантала,

Значительное расширение номиналов резисторов достигается путем применения металлокерамических пленок и пленок силицидов некоторых металлов. В этих системах в качестве металла чаще всего используется хром, а в качестве диэлектрика – оксиды, бориды, нитриды и силициды переходных металлов, а также окислы некоторых металлоидов. Пленки из дисилицида хрома, так же как и пленки из сплава кремния, хрома и никеля, имеют  $R_s$  до 5 кОм. У пленок на основе системы хром – моноокись кремния  $R_s$  в зависимости от содержания хрома может изменяться от единиц до сотен Ом.

#### **13.4.4 Тонкопленочные конденсаторы**

Тонкопленочные конденсаторы, несмотря на кажущуюся простоту трехслойной структуры, являются наиболее сложными и трудоемкими по сравнению с другими пленочными пассивными элементами.

В отличие от резисторов, контактных площадок и коммутации, при изготовлении которых достаточно произвести осаждение одного или двух слоев (подслоя и слоя), изготовление тонкопленочных конденсаторов требует по меньшей мере осаждения трех слоев: нижней обкладки, пленки диэлектрика и верхней обкладки (применение большего числа обкладок затрудняет процесс изготовления конденсаторов и увеличивает их стоимость).

Материал, используемый для изготовления диэлектрических пленок, должен иметь хорошую адгезию к металлам, используемым для обкладок конденсатора, быть плотным и не подвергаться механическому разрушению при воздействии температурных циклов, обладать высоким пробивным напряжением и малыми диэлектрическими

потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость, не разлагаться в процессе испарения и осаждения и обладать минимальной гигроскопичностью.

Самыми распространенными материалами, применяемыми в качестве диэлектрика в пленочных конденсаторах, являются моноокись кремния ( $\text{SiO}$ ) и моноокись германия ( $\text{GeO}$ ). В последние годы для этой цели стали применять алюмосиликатные, боросиликатные и антимонидогерманиевые стекла.

Наиболее перспективными диэлектриками являются композиционные стеклообразные соединения, поскольку для них имеется возможность изменять в широких пределах электрофизические, физико-химические и термодинамические свойства путем подбора состава стекла и реализации особенностей агрегатного состояния стеклообразных систем в тонкопленочных структурах металл-диэлектрик-металл.

### 13.5 Тонкие диэлектрические пленки

В современной микроэлектронике широко используются различные виды тонких диэлектрических пленок. Наиболее широко применяются тонкие пленки  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и тонкие пленки поликристаллического кремния (которые, строго говоря, не являются диэлектрическими, но методы их получения аналогичны методам получения тонких пленок).

*Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ .* Чаще всего применяется в качестве подзатворного диэлектрика. Наиболее распространенным способом получения тонких пленок  $\text{SiO}_2$  является термическое окисление. Слой двуокиси кремния формируется на кремниевой пластине за счет химического взаимодействия в приповерхностной области полупроводника атомов кремния и кислорода. Кислород содержится в окислительной среде, с которой контактирует поверхность кремниевой подложки, нагретой в печи до температуры  $900\div 1200$  °С. Однако в настоящее время толщина подзатворных диэлектриков снизилась более чем на порядок и приблизилась к  $5\div 10$  нм. Сформировать такие слои окисла обычным термическим окислением сложно, так как процессы нагрева и охлаждения полупроводниковых пластин в диффузионных печах очень инерционны, что не позволяет точно контролировать технологические режимы окисления и, следовательно, приводит к разбросу электрофизических параметров полупроводниковых структур.

Поэтому тонкие ( $10\div 20$  нм) и ультратонкие (менее 10 нм) слои окисла формируют методом быстрой термической обработки (БТО). Особенностью этого метода является быстрый нагрев и охлаждение подложек с использованием некогерентных источников света. Обработка полупроводниковых пластин осуществляется в режиме теплового баланса с длительностью нагрева от единиц до десятков секунд. Существенным достоинством технологии БТО является возможность отслеживать процесс окисления в реальном режиме времени с точностью до долей секунды.

Но и это не решает всех проблем. При дальнейшей миниатюризации микросхем на основе  $\text{SiO}_2$  возникает еще одна проблема: при уменьшении толщины подзатворного диэлектрика до 1 нм и ниже токи утечки возрастают экспоненциально. Для преодоления этого ограничения в качестве подзатворного диэлектрика используют диоксид гафния  $\text{HfO}_2$ , а также другие диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. Преимуществами  $\text{HfO}_2$  являются: относительно высокая величина диэлектрической

проницаемости ( $\epsilon \approx 25$ ) при большой ширине запрещенной зоны ( $E_g \approx 5,7$  эВ) и термодинамически стабильная граница раздела с кремнием.

*Нитрид кремния*  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Наряду с защитными диэлектрическими пленками диоксида кремния в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем все более широкое применение находят пленки нитрида кремния. Пленки нитрида кремния обладают меньшей проницаемостью для диффузатов, используемых в обычной планарной технологии, чем пленки диоксида кремния. Поэтому пленки нитрида кремния получаются более тонкими. Это является важным фактором для фотолитографии, способствующим увеличению ее разрешающей способности. Пленки нитрида кремния можно выращивать во много раз быстрее, чем пленки диоксида кремния, и при более низких температурах. Их можно выращивать различными способами, например:

- реакцией взаимодействия кремния с азотом (или аммиаком);
- реакцией взаимодействия силана ( $\text{SiH}_4$ ) с аммиаком;
- методом открытой трубы;
- методом реактивного катодного осаждения.

Нитрид кремния используется в микроэлектронике для маскирования поверхности кремниевой подложки при проведении процессов локальной диффузии, локального окисления, локального травления, а также для защиты готовых структур от окружающей среды.

### 13.6 Толсто пленочные интегральные микросхемы

Толсто пленочными называются интегральные микросхемы с толщиной пленок  $10\div 70$  мкм, изготавливаемые методами трафаретной печати (сеткография).

Сущность процесса изготовления толсто пленочных микросхем заключается в нанесении на керамическую подложку специальных проводниковых, резистивных или диэлектрических паст путем продавливания их через сетчатый трафарет с помощью ракеля и в последующей термообработке (вжигании) этих паст, в результате чего образуется прочная монолитная структура.

Проводниковые и резистивные пасты состоят из порошков металлов и их окислов, а также содержат порошки низкоплавких стекол (стеклянную фритту). В диэлектрических пастах металлические порошки отсутствуют. Для придания пастам необходимой вязкости их замешивают на органических связующих веществах (этил-целлюлоза, вазелины).

При вжигании паст стеклянная фритта размягчается, обволакивает и затем при охлаждении связывает проводящие частицы проводниковых и резистивных паст. Диэлектрические пасты после термообработки представляют однородные стекловидные пленки.

Относительная простота технологии при сравнительно низких затратах на оборудование и материалы, достаточно высокая эксплуатационная надежность и другие достоинства толсто пленочных микросхем способствуют увеличению их производства и расширению областей применения. Конструктивно подобные микросхемы выполняются в виде наборов резисторов или конденсаторов, а также в виде гибридных микросхем, т.е. могут содержать навесные активные и пассивные компоненты. Широкое применение

находит толстопленочная многоуровневая разводка межэлементных соединений в гибридных микросхемах.

### **13.6.1 Подложки толстопленочных ИМС**

Для изготовления подложек обычно используют керамические материалы или стекла. Чаще всего употребляют керамику на основе 96 %-ной поликристаллической окиси алюминия. Для мощных микросхем применяют также бериллиевую керамику, обладающую хорошей теплопроводностью, но требующую особых мер обеспечения безопасности при обработке вследствие ее токсичности.

Точность получаемого в процессе трафаретной печати рисунка микросхемы в значительной степени зависит от плоскостности поверхности подложки и ее шероховатости. Максимальная кривизна поверхности (*макронеровность*) не должна превышать 4 мкм на 1 мм длины. Шероховатость (*микронеровность*) рабочей поверхности подложки должна быть не ниже восьмого класса ( $R_a = 0,32 \div 0,63$  мкм). Необходимо также иметь в виду, что слишком малая шероховатость может приводить к ухудшению адгезии наносимых пленок.

Размеры плат определяются конкретной конструкцией применяемых корпусов микросхем. Рекомендуются размеры  $8 \times 15$  мм<sup>2</sup>,  $10 \times 16$  мм<sup>2</sup> и кратные им. Толщина плат составляет 0,6 мм.

### **13.6.2 Толстопленочные проводниковые пленки**

Толстопленочные проводниковые пленки должны обладать следующими качествами: высокой проводимостью; хорошей адгезией к подложке (данное требование является общим для всех пленок); совместимостью с резистивными пастами для обеспечения электрического контакта; совместимостью с диэлектрическими пастами для создания конденсаторов и многослойной разводки соединений; возможностью присоединения навесных компонентов и внешних выводов микросхемы термокомпрессией, ультразвуковой сваркой или пайкой.

Проводниковые пасты могут изготавливаться на основе золота, золота-платины, золота-палладия, палладия-серебра, индия, рения. В последние годы активно исследуется возможность изготовления проводниковых паст на основе неблагородных металлов – меди, никеля.

Толщина слоя проводника на основе композиции палладий-серебро составляет  $10 \div 25$  мкм, минимальная ширина (длина) проводника колеблется в пределах  $0,15 \div 0,20$  мм при нанесении пасты на керамику и  $0,20 \div 0,30$  мм при нанесении на слой диэлектрика. Минимальное расстояние между проводниковыми элементами  $0,05 \div 0,20$  мм в зависимости от рецептурного состава пасты. Сопротивление квадрата проводниковой пленки на основе данной композиции колеблется в пределах  $0,05 \div 5,00$  Ом/кв.

Пасты на основе золота обеспечивают наиболее низкое поверхностное сопротивление в пределах  $0,001 \div 0,003$  Ом/кв, а на основе композиции золото-платина – менее 0,1 Ом/кв. Золотосодержащая проводниковая паста позволяет изготавливать дорожки шириной 125 мкм с расстоянием между ними 175 мкм при толщине пленки 12

мкм. Максимальная точность изготовления пленочных элементов из проводниковых паст на основе палладий-серебро находится в пределах  $\pm 0,1$  мм.

### 13.6.3 Толстопленочные резисторы

Резистивные толстопленочные элементы должны обеспечивать: широкий диапазон номиналов сопротивлений; высокую точность получения номиналов сопротивлений; высокую временную и температурную стабильности сопротивлений резисторов; хороший электрический контакт с проводниковыми элементами микросхем. Среди названных требований важнейшее значение имеет требование температурной стабильности, которая характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Резистивные пасты приготавливают на основе композиции палладий-серебро. Они обеспечивают номинальные сопротивления резисторов от 25 Ом до 1 МОм. Сопротивление квадрата резистивной пленки соответствует следующему ряду значений: 5, 100, 500, 1000, 3000, 6000, 20 000, 50 000 Ом/кв.

В последнее время разработаны пасты, обладающие повышенной температурной и временной стабильностью. В их состав входят такие редкие металлы, как рутений и иридий, а также платина. Обычная толщина резистивных пленок  $18\div 25$  мкм.

### 13.6.4 Диэлектрические элементы

Диэлектрические пленки в толстопленочных микросхемах применяются в качестве диэлектриков конденсаторов, межслойной изоляции и защитных слоев.

Диэлектрики толстопленочных конденсаторов должны обеспечивать высокие значения удельной емкости; широкий диапазон номинальных значений емкости; высокое пробивное напряжение; малый температурный коэффициент емкости (ТКЕ); малые диэлектрические потери; высокую временную стабильность.

Диэлектрические пасты для конденсаторов изготавливают на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина пленки после термической обработки составляет  $40\div 60$  мкм.

Используя пленки, обеспечивающие удельную емкость  $C_0 = 3700$  пФ/см<sup>2</sup>, изготавливают конденсаторы с номинальной емкостью от 500 до 300 пФ, а пленки с  $C_0 = 10000$  пФ/см<sup>2</sup> позволяют изготавливать конденсаторы с номинальной емкостью в диапазоне от 100 до 2500 пФ. Погрешность номинальной емкости конденсаторов обычно составляет  $\pm 15\%$ . Пробивное напряжение не менее 150 В.

Величина диэлектрической проницаемости для диэлектрических паст конденсаторов на основе композиции «титанат бария - окись титана - окись алюминия - легкоплавкое стекло» составляет от 10 до 2000.

Расчетная площадь верхней обкладки конденсатора определяется по формуле  $S = C/C_0$ , где  $C$  – номинальное заданное значение емкости;  $C_0$  – удельная емкость.

Нижняя обкладка конденсатора должна выступать за край верхней не менее чем на 0,3 мм, пленка диэлектрика должна выступать за край нижней обкладки не менее чем на 0,2 мм. Толстопленочные конденсаторы в некоторых случаях допускают подгонку воздушно-абразивной струей, при этом погрешность составляет не более 1%. В

настоящее время разрабатываются способы лазерной подгонки конденсаторов. Пасты верхних обкладок должны быть инертны к лужению.

### ***13.6.5 Межслойная и защитная изоляция***

Пасты для межслойной изоляции и защиты от внешней среды изготавливают из низкоплавкого стекла и глинозема. Толщина диэлектрического слоя составляет от 30 до 70 мкм, удельная емкость от 150 до 200 пФ/см<sup>2</sup>, пробивное напряжение 500 В.

Диэлектрическая проницаемость паст для изоляции и защиты находится в пределах от 10 до 15. Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте от 1 кГц до 1,5 МГц не превышает  $25 \cdot 10^{-4}$ . Сопротивление изоляции более  $10^{12}$  Ом при постоянном напряжении 100 В.

Для многослойной сложной разводки межэлементных соединений используют кристаллизующееся стекло. В целях удобства сортировки различных микросхем на операциях сборки применяют разноцветные защитные пасты.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОМЫ