МИРЭА(ТУ)

##### РЕФЕРАТ НА ТЕМУ:

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Работы выполнил:

Семенов Д.А.

РР-2-97

План.

1. **Роль тонкопленочной технологии в производстве интегральных схем**
2. **Тонкопленочная металлизация полупроводниковых приборов и интегральных схем**
3. **Факторы, влияющие на свойства тонких пленок**

#### Подложки

#### Тонкопленочные резисторы

#### Тонкопленочные конденсаторы

#### Пленки тантала и его соединений

**ВВЕДЕНИЕ**

Зарождение и развитие микроэлектроники как нового научно-технического направления, обеспечивающего создание сложной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), непосредственно связаны с кризисной ситуацией, возникшей в начале 60-х годов, когда традиционные методы изготовления РЭА из дискретных элементов путем их последовательной сборки не могли обеспечить требуемую надежность, экономичность, энергоемкость время изготовления и приемлемые габариты РЭА.

Несмотря на малый срок своего существования, взаимосвязь микроэлектроники с другими областями науки и техники обеспечила необычайно высокие темпы развития этой отрасли и существенно сократила время для промышленной реализации новых идей. Этому способствовало также возникновение своеобразных обратных связей между разработкой интегральных схем, являющихся базой автоматизации производства и управления, и использованием этих разработок для автоматизации самого процесса проектирования, производства и испытаний интегральных схем.

Развитие микроэлектроники внесло коренные изменения в принципы конструирования РЭА и привело к использованию комплексной интеграции, которая состоит из:

структурной или схемной интеграции (т. е. интеграции схемных функций в пределах единой структурной единицы); при степени интеграции порядка сотен и тысяч компонентов существующие приемы подразделения систем на компоненты, приборы, субсистемы и блоки, а также формы координации разработок компонентов, приборов и субсистем становятся уже малоэффективными; при этом центр тяжести перемещается в область схемотехники, что требует коренной перестройки способов реализации электронных систем с построением аппаратуры на супермодульном уровне;

**Роль тонкопленочной технологии в производстве интегральных схем**

Интегральная электроника развивается не как новая или обособленная область техники, а путем обобщения многих технологических приемов, ранее используемых в производстве дискретных полупроводниковых приборов и при изготовлении топкопленочпых покрытий. В соответствии с этим в интегральной электронике определились два главных направления: полупроводниковое и тонкопленочное.

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

Тонкопленочное направление интегральной электроники основано на последовательном наращивании пленок различных материалов на общем основании (подложке) с одновременным формированием из этих пленок микро деталей (резисторов, конденсаторов, контакт­ных площадок и др.) и внутрисхемных соединений.

Сравнительно недавно полупроводниковые (твердые) и тонкопленочные гибридные ИС рассматривались как конкурирующие направления в развитии интегральной электроники. В последние годы стало очевидно, что эти два направления отнюдь не исключают, а скорее, наоборот, взаимно дополняют и обогащают друг друга. Более того, до сегодняшнего дня не созданы (да, видимо, в этом и нет необходимости) интегральные схемы, использующие какой-либо один вид технологии. Даже монолитные кремниевые схемы, изготавливаемые в основном по полупроводниковой технологии, одновременно применяют такие методы, как вакуумное осаждение пленок алюминия и других металлов для получения внутрисхемных соединений, т. е. методы, на которых основана тонкопленочная технология.

Большим достоинством тонкопленочной технологии является ее гибкость, выражающаяся в возможности выбора материалов с оптимальными параметрами и характеристиками и в получении по сути дела любой требуемой конфигурации и параметров пассивных элементов. При этом допуски, с которыми выдерживаются отдельные параметры элементов, могут быть доведены до 1—2%. Это достоинство особенно эффективно проявляется в тех случаях, когда точное значение номиналов и стабильность параметров пассивных компонентов имеют решающее значение (например, при изготовлении линейных схем, резистивных и резистивно-емкостных схем, некоторых видов фильтров, фазочувствительных и избирательных схем, генераторов и т. п.).

В связи с непрерывным развитием и совершенствованием как полупроводниковой, так и тонкопленочной технологии, а также ввиду все большего усложнения ИС, что выражается в увеличении числа компонентов и усложнении выполняемых ими функций, следует ожидать, что в ближайшем будущем будет происходить процесс интеграции технологических методов и приемов и большинство сложных ИС будут изготовляться на основе совмещенной технологии. При этом можно получить такие параметры и такую надежность ИС, которых нельзя достигнуть при использовании каждого вида технологии в отдельности. Например, при изготовлении полупроводниковой ИС 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 транзистора. Нельзя оптимизировать параметры одного элемента, не изменив одновременно характеристики других. При заданных характеристиках активных элементов изменять номиналы пассивных элементов можно лишь изменением их размеров.

При использовании совмещенной технологии активные элементы изготовляются чаще всего методами планарной технологии в пластине кремния, а пассивные годами тонкопленочной технологии на окисленной поэлементны (резисторы, а иногда и конденсаторы) — поверхности той же самой кремниевой пластины. Однако процессы изготовления активной и пассивной частей ИС разнесены по времени. Поэтому характеристики пассивных элементов в значительной мере независимы и определяются выбором материала, толщиной пленок и их геометрией. Поскольку транзисторы совмещенной ИС находятся внутри подложки, размеры такой схемы могут быть значительно уменьшены по сравнению с гибридными ИС, которые используют дискретные активные элементы, занимающие сравнительно много места на подложке.

Схемы, изготовленные по совмещенной технологии, имеют целый ряд несомненных достоинств. Так, например, при этом имеется возможность получения на малой площади резисторов с большой величиной и малым температурным коэффициентом сопротивления, имеющих очень узкую ширину и большое поверхностное сопротивление. Контроль скорости осаждения в процессе получения резисторов позволяет изготовить их с очень высокой точностью. Резисторам, полученным путем осаждения пленок, не свойственны токи утечки через подложку даже при высоких температурах, а сравнительно большая теплопроводность подложки препятствует возможности появления в схемах участков с повышенной температурой.

Тонкие пленки, помимо производства ИС по эпитаксиально-планарной технологии, широко используются в производстве гибридных ИС, а также при изготовлении новых видов микроэлектронных приборов (приборов с зарядовой связью, криотронных ЗУ на основе эффекта Джозефсона, ЗУ на цилиндрических магнитных доменах и др.).

**Тонкопленочная металлизация полупроводниковых приборов и интегральных схем**

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС для получения омических контактов к кремнию, меж соединений и контактных площадок, а также электродов затвора МОП структур широкое распространение получили пленки алюминия, что обусловлено следующими достоинствами этого металла:

низкой стоимостью Аl и возможностью использования для всех процессов металлизации одного металла, что значительно упрощает и удешевляет технологию и предотвращает возникновение гальванических эффектов;

высокой электропроводностью пленок Аl, близкой к электропроводности объемного материала; легкостью испарения Аl в вакууме из вольфрамовых тиглей и электронно-лучевых испарителей;

высокой адгезией А1 к кремнию и его окислам; низкоомностью контакта Аl с кремнием *р-* и n-типов проводимости;

заметной растворимостью кремния в Аl с образованием твердого раствора, почти не уменьшающего электропроводности;

отсутствием в системе Аl—Si химических соединений;

химическим взаимодействием А1 с Si02, частично остающимся на контактных площадках; химической стойкостью А1 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 Аl и устойчивостью к циклическим изменениям температуры.

Величина зерен осаждаемых пленок Аl существенно зависит от скорости испарения и температуры подложек. Чем больше величина зерна и чем более совершенна кристаллическая структура пленки, тем меньше ее удельное сопротивление, меньше сказывается эффект электромиграции и как следствие токоведущие дорожки, и омические контакты имеют больший срок службы. Ориентированный рост пленок Аl на не окисленных поверхностях кремния в плоскости (111) наблюдается при скоростях осаждения около 3 • 10-2 мкм • с-1 и температуре подложки 200—250°С.

Для получения столь больших скоростей осаждения пленок чаще всего используются электронно-лучевые испарители. При этом степень совершенства кристаллической структуры пленок может неконтролируемо изменяться вследствие дополнительного радиационного нагрева подложек, величина которого зависит как от мощности испарителя, так и от материала подложки и толщины осаждаемой пленки. Неконтролируемые изменения в структуре пленки возникают также из-за наличия заряженных частиц в молекулярном пучке испаряемых паров Аl. Концентрация заряженных частиц тем выше, чем больше ток эмиссии катода и больше скорость испарения.

Одним из существенных недостатков пленок чистого Аl является перенос вещества в результате электродиффузии (дрейфа ионов материала вдоль проводника, ее ли на концах последнего имеется разность потенциалов). Скорость перемещения ионов является функцией температуры и увеличивается с ростом последней. По мимо электродиффузии, возможна диффузия атомов металла в результате разности температур на концах проводника. Если Аl осаждается на окисел кремния, то это вызывает плохой отвод тепла, появление «горячих» центров на проводящих дорожках и как следствие значительные градиенты температуры. Электромиграция А1 при плотностях тока, меньших, чем для других металлов, приводит к появлению пустот в пленке (эффект Киркендалла).

Поскольку электродиффузия является активационным процессом, то она существенно зависит от состояния поверхности границы зерен. Уменьшение протяженности границ за счет увеличения размеров зерна и подбор материала защитного покрытия могут существенно увеличить энергию активации и как следствие время наработки на отказ. Значительного увеличения времени наработки на отказ можно достичь за счет добавки к алюминию примесей меди, магния, хрома, а также окиси алюминия.

После нанесения пленки А1 и получения требуемой конфигурации токоведущих дорожек производят вплавление А1 в кремний при температуре 500—550°С для получения низкоомного контакта. Миграция избыточного кремния на токоведущих дорожках, прилегающих к контактным подложкам, вызывает шелушение А1 и отказы ИС. Для предотвращения этого необходимо при испарении А1 вводить в него около 2 масс. % кремния. Добавка кремния в контактные площадки из А1 уменьшает миграцию кремния из неглубоко залегающего эмиттерного слоя (около 1 мкм), что существенно увеличивает быстродействие ИС на биполярных транзисторах и предотвращает закорачивание в ИС неглубоко залегающих эмиттерных переходов. Для предотвращения миграции кремния в пленку А1 в качестве промежуточного слоя может быть использована пленка титана. Применение метода создания омических контактов с подслоем титана в быстро действовавших ИС позволило в 20 раз увеличить время наработки на отказ. Помимо титана, может использоваться подслой платины или палладия с образованием силицида платины или силицида палладия.

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

малая величина энергии активации атомов А1, вызывающая электромиграцию при плотностях тока примерно 106 А/см2 и повышенных температурах, в результате чего появляются пустоты в пленках;

возможность короткого замыкания через диэлектрик в многоуровневых системах металлизации вследствие образования острых выступов на плевке в результате электромиграции и рекристаллизации А1;

опасность гальванической коррозии Аl при одновременном использовании других металлов; большая скорость диффузии А1 по границам зерен, не допускающая использования приборов с металлизацией А1 при температурах более 500°С;

интенсивное химическое взаимодействие А1 с двуокисью кремния при температуре около 500°С;

низкая точка плавления в эвтектике систем алюминий — кремний около 577°С;

большое различие (в 6 раз) коэффициентов термического расширения А1 и 51;

мягкость А1 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 А1 для получение верхнего слоя). Наиболее подходящими материалами являются вольфрам и молибден. В частности, вольфрам имеет практически одинаковый с кремнием ТКС, хороший омический контакт к кремнию *р-* 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 (так же как и пленки Мо) являются металлургическим барьером, препятствующим образованию межкристаллической структуры кремния и алюминия.

Недостатком металлизации W является трудность получения пленок (для чего обычно используется 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 и наносят какой-либо другой металл (Рt, Ni, Аи, Си, А1 и др.).

При изготовлении ИС СВЧ диапазона, ИС специального назначения, а также в гибридной технологии применяют металлизацию, состоящую из нескольких слоев тонких металлов. При этом обычно первый (нижний) слой металла должен обладать высокой адгезией как к кремнию, так и к двуокиси кремния и одновременно иметь малые значения коэффициентов растворимости и диффузии в этих материалах. Этим требованиям удовлетворяют такие металлы, как хром, титан, молибден, а также силицид платины. При двухслойной металлизации второй (верхний) слой металла должен иметь высокую электропроводность и обеспечивать приварку к нему проволочных выводов. Однако в некоторых системах (таких, как Сг-Аu, Тi-Аu или Сг-Сu) контакты

при термообработке теряют механическую прочность в результате образования на их границе интерметаллических соединений. Кроме того, верхний металл диффундирует через нижележащий слой в кремний, что снижает механическую прочность соединения и изменяет контактное сопротивление. Для устранения этого явления обычно используют третий слой металла, который является барьером, препятствующим взаимодей:твию верхнего слоя металлизации с кремнием. Так, например, в тройной системе Тt-Рl-Аu, которая применяется при изготовлении балочных выводов, слой

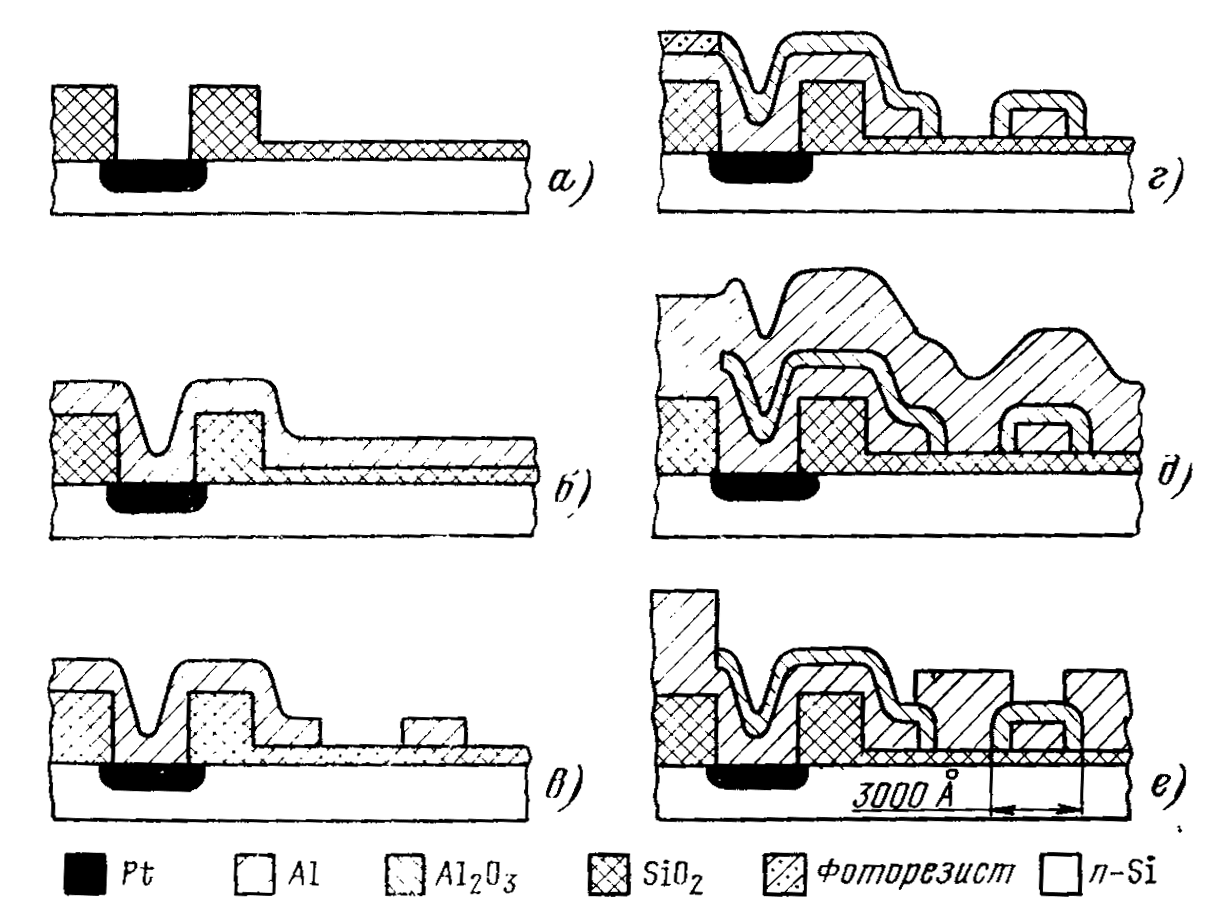


Рис. 1. Схема процесса изготовления двухуровневой металлизации в системе А1-А1гОз-А1.

а-- нанесение толстого и тонкого слоев окисла кремния перед металлизацией (показана область омического контакта); б—нанесение алюминия, образующего первый уровень; в — фотогравировка первого уровня металла; г — анодирование первого уровня металлизации с фоторезистивной маской; *д —* нанесение алюминия, образующего второй уровень; *е —* фотогравировка второго уровня металлизации.

Рt толщиной около 5Х10-2 мкм служит барьером против диффузии А1 в S1. Помимо этого для балочных выводов в МДП ИС применяются системы Сг-Аg-Аu, Сг-Аg-Рt, Рd-Аg-Аu, в которых роль барьера выполняет пленка серебра. Для гибридных ИС и полосковмх линий ИС СВЧ диапазона применяются системы Сг-Сu и Сг-Сu-Сг.

Увеличение плотности размещения элементов на кристалле потребовало применения многоуровневой металлизации. На рис. 1 показана последовательность изготовления двухуровневой металлизации в системе А1-А120з-А1, которая применяется в приборах с зарядовой связью.

Сравнительно новым изолирующим материалом для многоуровневой металлизации является полиимид, с помощью которого получают пятиуровневую металлизацию БИС на МДП транзисторах.

### Факторы, влияющие на свойства тонких пленок

Рост одного вещества на подложке из другого вещества — очень сложный процесс, зависящий от большого числа трудно контролируемых параметров: структуры подложки, состояния ее поверхности, температуры, свойств испаряемого вещества и скорости его осаждения, материала и .конструкции испарителя, степени разрежения, состава остаточной среды и ряда других. В табл. 1 показана связь между свойствами пленок и условиями их осаждения.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Свойства пленки | | | факторы, влияющие на указанные свойства | | | | |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Размер зерен | | | Материал подложки и пленки. Загрязнения подложки. | | | | | |
|  |  |  | Подвижность атомов осаждаемого материала на поверхности | | | | | |
|  |  |  | подложки (температура подложки, скорость осаждения). | | | | | |
|  |  |  | Структура поверхности подложки (степень шероховатости, | | | | | |
|  |  |  | наличие кристаллов) | | |  |  |  |
| Расположение кристаллов | | | Структура подложки ''(монокристаллическая, | | | | |  |
|  |  |  | поликристаллическая или аморфная). Загрязнения подложки | | | | | |
|  |  |  | (нарушение структуры пленки). Температура подложки | | | | | |
|  |  |  | (обеспечение необходимой подвижности атомов осаждаемого | | | | | |
|  |  |  | материала) |  |  |  |  |  |
| Адгезия между пленкой |  |  | Материал подложки и пленки. Дополнительные процессы |  |  |  |  |  |
|  |  |  | (например, образование промежуточного слоя окисла |  |  |  |  |  |
|  |  |  | между пленкой и подложкой). Загрязнение подложки. |  |  |  |  |  |
|  |  |  | Подвижность атомов осаждаемого материала |  |  |  |  |  |
| Загрязнение |  |  | Чистота испаряемого материала. Материал испарителя. |  |  |  |  |  |
|  |  |  | Загрязнение подложки. Степень разрежения и состав |  |  |  |  |  |
|  |  |  | остаточной среды. Соотношение между давлением остаточных |  |  |  |  |  |
|  |  |  | газов и скоростью осаждения |  |  |  |  |  |
| Окисление |  |  | Степень химического сродства осаждаемого материала к |  |  |  |  |  |
|  |  |  | кислороду. Поглощение водяных паров подложкой. |  |  |  |  |  |
|  |  |  | Температура подложки. Степень разрежения и состав |  |  |  |  |  |
|  |  |  | остаточной среды. Соотношение между давлением остаточных |  |  |  |  |  |
|  |  |  | газов и скоростью осаждения |  |  |  |  |  |
| Напряжение |  |  | Материал пленки и подложки. Температура подложки. |  |  |  |  |  |
|  |  |  | Размер зерен, включения, кристаллографические дефекты в |  |  |  |  |  |
|  |  |  | пленке. Отжиг. Угол между молекулярным пучком и подложкой |  |  |  |  |  |

В зависимости от конкретных условий осаждения пленки одного и того же вещества могут иметь следующие основные структурные особенности: аморфную структуру, характеризующуюся отсутствием кристаллической решетки; коллоидную (мелкозернистую) структуру, характеризующуюся наличием очень мелких кристалликов (менее 10~2 мкм); гранулярную (крупнозернистую) структуру, имеющую крупные кристаллы (10-1 мкм и более); монокристаллическую структуру, когда вся пленка представляет собой сплошную кристаллическую решетку атомов данного материала.

#### Подложки

Материал, используемый для изготовления подложек, должен иметь однородный состав, гладкую поверхность (с чистотой обработки по 12—14-му 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 пени удовлетворяли бы всем перечисленным требованиям.

В качестве подложек для гибридных ИС использую ситалл, фотоситалл, высокоглиноземистую и бериллиевую керамику, стекло, поликор, полиимид, а также металлы, покрытые диэлектрической пленкой.

Ситаллы—это стеклокерамические материалы, полу чаемые путем термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство ситаллов получено в системах Li2О-Аl2Оз-SiO2-ТiO2 и RО-Al2Оз-SiO2-ТiO2 (КО типа СаО, МgО, ВаО).

В отличие от большинства высокопрочных тугоплавких кристаллических материалов ситалл обладает хорошей гибкостью при формировании. Его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом, причем он выдерживает резкие перепады температуры. Он имеет низкие диэлектрические потери, по электрической прочности не уступает лучшим сортам вакуумной керамики, и по механической прочности в 2—3 раза прочнее стекла. Ситалл не порист, газонепроницаем и имеет 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 моноокиси кремния толщиной в несколько микрон).

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 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 ВеО обладает в 200—250 раз более высокой теплопроводностью, чем стекло, поэтому при напряженных тепловых режимах целесообразно применять бериллиевую керамику. Помимо бериллиевой керамики, применяются высокоглиноземистая (94% Аl2Оз) керамика, плотный алюмооксид, стеатитовая керамика, а также глазурованная керамика 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 тысяч ангстрем. Они могут быть значительно снижены путем полировки, однако при этом существенно загрязняется поверхность керамики.

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 очистка является ионная бомбардировка поверхности подложки в плазме тлеющего разряда. Для этой цели в рабочей камере вакуумной установки обычно предусматриваются особые электроды, на которые от маломощного высоковольтного источника подается напряжение в несколько киловольт. Электроды чаще всего изготавливаются из алюминия, поскольку среди металлов он имеет самую низкую скорость катодного распыления.

Следует иметь в виду, что даже незначительное загрязнение 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 нихрома, 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 подслой 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.

#### 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 монолитных 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 температурным коэффициентом сопротивления (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 г, 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 ТК.С. 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 монолитных ИС используются главным образом .высокоомные резисторы., Для того чтобы резисторы имели минимально возможные габариты, они должны изготовляться 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.

При изготовлении микро мощных монолитных ИС по совмещенной технологии возникает необходимость разместить на сравнительно небольшой площади .кристалла высокоомные резисторы, имеющие сопротивление до нескольких мегаом, что может быть достигнуто только в том случае, если материал резистора будет обладать Rs ­ (10—20) кОм/⬜. 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 монолитных ИС. Они должны выдерживать сравнительно высокую температуру (500-550°С), которая имеет место в процессе герметизации ИС, и в некоторых случаях не должны изменять свои свойства под воздействием окислительной среды. В монолитных ИС для изготовления резисторов используются в основном нихром и танта.

При изготовлении гибридных ИС используется значительно более широкая номенклатура материалов для тонкопленочных резисторов.

В качестве низкоомных пленок с Rs от 10 до 300 Ом. используются пленки хрома, нихрома и т тала. Получение пленок хрома с воспроизводимы электрофизическими свойствами несколько затруднено его способностью образовывать соединения (особен окисные) при взаимодействии с остаточными газа в процессе испарения и осаждения. Значительно более стабильными характеристиками обладают резисторы основе хромоникелевого сплава (20% Сг и 80% Ni Пленки тантала благодаря наличию различных его структурных модификаций имеют очень широкий диапазон поверхностных сопротивлений (от несколько Ом/⬜ для а-тантала до нескольких МОм/⬜для тантала с малой плотностью). В качестве высокостабильного резистивного материала применяется 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 — окислы, 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 Rs до 5 кОм/⬜; у пленок на основе. системы хром —- моноокись кремния *Rs* в зависимости от содержания хрома может изменяться от единиц до сотен Ом/⬜.

#### Тонкопленочные конденсаторы

Тонкопленочиые 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 удорожает их стоимость).

Материал, используемый для изготовления диэлектрических пленок, должен иметь хорошую адгезию с металлом, используемым для обкладок конденсатора, быть плотным и н.е 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 (Si0) и моноокись германия (GеО). В последние годы для этой цели стали применяться алюмосиликатные, боросиликатные и антимонидогерманиевые стекла.

Наиболее перспективными диэлектриками являются композиционные стеклообразные соединения, поскольку у 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.

#### Пленки тантала и его соединений

Пленки тантала и его соединений в последние годы получают все более широкое распространение при изготовлении тоикопленочных элементов интегральных схем. Выбор тантала в качестве исходного материала во многом объясняется тем, что в зависимости от условий получения талталовых пленок они могут иметь различную структуру и соответственно в широких пределах изменять как свое удельное сопротивление, так и его температурный коэффициент.

По кристаллическому строению и электрофизическим свойствам к массивному образцу наиболее близки пленки α- тантала, имеющие крупмокристаллическую объемно-центрованную структуру и обладающие сравнительно невысоким удельным сопротивлением (20— 40 мкОм-см). В отличие от к-тантала р-тантал, имеющий тетрагональную мелкокристаллическую структуру и удельное сопротивление 160—200 кмОм • см, в массивных образцах не встречается. Эта метастабильная модификация тантала характерна только для тонких пленок.

Получение пленок α - и β- тантала обычно производят путем катодного распыления при напряжении 4—5 кВ и плотности тока 0,1--1 мА/см2. Если снизить напряжение и при этом не увеличивать давление аргона, то разрядный ток уменьшится, что приведет к значительному снижению скорости осаждения. При этом получаются пленки низкой плотности, имеющие сильно пористую структуру с размерами пор (4—7)-10-3 мкм, состоящие из большего числа зерен к- или р-тантала с размерами кристаллов (3—5) • 10-2 мкм. Высокая пористость пле­нок и появление системы металл — диэлектрическая смесь вызывают аномальное повышение удельного со­противления (примерно в 200 раз по сравнению с α- танталом) и изменение его температурного коэф­фициента. Если в аргон добавить азот в количестве, существенно превышающем фон остаточных газов, то мо­гут быть получены пленки нитрида тантала, имеющие два устойчивых состояния Та2N и TaN с разной кри­сталлической структурой и электрофизическими свой­ствами.

Наличие нескольких модификаций тантала (α- и β- тантал, тантал малой плотности) и его нитрида дает возможность выбора самых различных топологических решений при проектировании пассивной части микро­схем.

Чистый α- тантал из-за больших механических на­пряжений в пленке и плохой адгезии .к подложке не нашел широкого применения при изготовлении RС -элементов микросхем, β- тантал используется для изготов­ления нижних обкладок конденсаторов и частично для получения резисторов. Нитрид тантала и тантал малой плотности используются для изготовления резисторов. Практическая ценность тантала с низкой плотностью заключается в возможности получать высокостабильные тонкопленочные резисторы (от 10 кОм до нескольких мегаом), имеющие небольшие размеры и простую кон­фигурацию. Из тантала с низкой плотностью могут быть значительно легче изготовлены тонкопленочные конденсаторы, поскольку в этом случае верхний элек­трод, так же как и нижний, можно получать путем рас­пыления тантала, в то время как при использовании тантала обычной плотности попытки получить таким путем верхний электрод часто приводили к повреждению диэлектрического слоя. Кроме того, тантал с низкой плотностью позволяет изготовлять RС- схемы с распре­деленными параметрами и регулируемым номиналом резистора, в качестве которого может быть использован верхний электрод конденсатора.

Получаемая с помощью электролитического или плазменного анодирования пятиокись тантала (Та2О5) обладает низкими диэлектрическими потерями и может применяться как в качестве диэлектрика для конденса­тора, так и в качестве изолятора или защитного слоя для резистора. Кроме того, с помощью анодирования можно точно юстировать номиналы конденсаторов и ре­зисторов. Применение ионного травления, а также рас­творимость нитрида тантала, чистого тантала и его окислов в различных травителях обусловливают воз­можность использования самых различных методов для получения требуемой конфигурации микросхем.

Таким образом, на основе тантала можно обеспечить групповое изготовление пассивных элементов (резисто­ров, конденсаторов, соединительных проводников и кон­тактных площадок) как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами, которые по своей сложности не уступают элементам, изготовленным на основе других материалов, но при этом обладают значительно большой точностью, стабильностью и надежностью. Универсальность тантала и отсутствие необходимости использовать другие материалы свидетельствует о том, что на основе «танталовой технологии» может изготовляться подавляющее большинство пассивных элементов ИС.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для современного этапа развития интегральной электроники характерны тенденции дальнейшего повышения рабочих частот и уменьшения времени переключения, увеличения надежности, снижения затрат на материалы и процесс изготовления ИС.

Снижение стоимости ИС требует разработки качественно новых принципов их изготовления с использованием процессов, в основе которых лежат близкие по характеру физико-химические явления, что, с одной стороны, является предпосылкой для последующей интеграции однородных технологических операций производственного цикла и, с другой стороны, открывает принципиальные возможности управления всеми операциями от ЭВМ. Необходимость качественных изменений в технологии и технического перевооружения отрасли диктуется также переходом к следующему этапу развития микроэлектроники — функциональной электронике, в основе которой лежат оптические, магнитные, поверхностные и плазменные явления, фазовые переходы, электронно-фононные взаимодействия, эффекты накопления и переноса заряда и др.

Критерием «прогрессивности» технологического процесса наряду с улучшением параметров и характеристик самого изделия является высокая экономическая эффективность, определяемая рядом частных, взаимосвязанных критериев, обеспечивающих возможность построения комплектов полностью автоматизированного высокопроизводительного оборудования с длительным сроком эксплуатации.

Наиболее важными частными .критериями являются:

универсальность, т. е. возможность проведения всего (или подавляющего числа операций) производственного цикла с помощью одних и тех же технологических приемов;

непрерывность, являющаяся предпосылкой для последующей интеграции (объединения) целого ряда технологических операций производственного цикла, сочетаемая с возможностью использования одновременной групповой обработки значительного количества изделий или полуфабрикатов;

высокая скорость проведения всех основных операций технологического процесса или же возможность их интенсификации, например, в результате воздействия электрических и магнитных полей, лазерного излучения и др.;

воспроизводимость параметров на каждой операции и высокий процент выхода как полуфабрикатов, так и годных изделий;

технологичность конструкции изделия или полуфабриката, соответствующая требованиям автоматизированного производства (возможности автоматизированной загрузки, базирования, монтажа, сборки и др.), что должно найти свое отражение в простоте формы, а также ограниченности допусков на габаритные и базовые размеры;

формализация, т. е. возможность составления (на основе аналитических зависимостей параметров изделия от параметров технологического процесса) математического описания (алгоритма) каждой технологической операции и последующего управления всем технологическим процессом с помощью ЭВМ;

адаптивность (жизненность) процесса, т. е. способность длительного существования в условиях непрерывного появления и развития новых конкурентоспособных процессов и возможность быстрого перестраивания оборудования под изготовление новых видов изделий без существенных капитальных затрат.

Большинству из перечисленных критериев удовлетворяют процессы, использующие электронные и ионные явления, происходящие в вакууме и разреженных газах, с помощью которых можно производить:

ионное распыление металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников с целью получения пленок различной толщины и состава, межсоединений, емкостных структур, межслойной изоляции, межслойной разводки;

ионное травление металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков с целью удаления отдельных локализованных участков при получении конфигурации ИС;

плазменное анодирование с целью получения окисных пленок;

полимеризацию органических пленок в местах, облученных электронами, с целью получения органических изоляционных слоев;

очистку и полировку поверхности подложек;

выращивание монокристаллов;

испарение материалов (в том числе тугоплавких) и перекристаллизацию пленок;

микрофрезерование пленок;

микросварку и микропайку с целью подсоединения выводов ИС, а также герметизацию корпусов;

бесконтактные методы контроля параметров ИС.

Общность физико-химических явлений, на которых базируются перечисленные процессы показывает принципиальную возможность их последующей интеграции с целью создания новой технологической базы высокопроизводительного автоматизированного производства интегральных схем и приборов функциональной электроники.

**Список литературы.**

1. “ Получение тонкопленочных элементов микросхем ” Б.С. Данилов
2. “Зарубежная электронная техника” Н.А. Акуленко
3. “Электронная промышленность” А.С. Грибов