

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра микро- и наноэлектроники

**Д. Б. Мигас, А. Г. Черных**

## **МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальностей 1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии  
и системы», 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы»,  
1-41 01 04 «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике»*

Минск БГУИР 2020

УДК 621.3.049.77(076)  
ББК 32.844.1я73  
М57

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра физики твердого тела  
Белорусского государственного университета  
(протокол №4 от 11.10.2019);

профессор кафедры микро- и нанотехники  
Белорусского национального технического университета  
доктор технических наук, профессор В. А. Сычик

**Мигас, Д. Б.**

М57 Межсоединения элементов интегральных микросхем : учеб.-метод.  
пособие / Д. Б. Мигас, А. Г. Черных. – Минск : БГУИР, 2020. – 70 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-564-9.

Приведена классификация многоуровневой системы межсоединений элементов интегральных микросхем. Рассмотрены и определены методы осаждения тонкоплёночных структур для металлизации ИМС. Освещены вопросы взаимодействия тонких слоев металлов с кремниевой подложкой и образования силицидов. Рассмотрены различные варианты формирования медных межсоединений и приводятся сведения о современных технологиях создания многоуровневых систем металлизации ИМС с медными межсоединениями.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Технология изготовления интегральных микросхем», «Технологические процессы микроэлектроники», «Компьютерное моделирование, расчет и проектирование изделий микро- и нанoeлектроники».

**УДК 621.3.049.77(076)**  
**ББК 32.844.1я73**

**ISBN 978-985-543-564-9**

© Мигас Д. Б., Черных А. Г., 2020  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИМС .....	6
1.1 Классификация и требования к системе металлизации.....	6
1.2 Однослойная металлизация на основе пленок алюминия .....	8
2 МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР.....	14
2.1 Термическое испарение в вакууме .....	14
2.2 Ионно-плазменное осаждение .....	18
2.3 Электрохимическое осаждение .....	25
2.4 Формирование диэлектрических слоев из газовой фазы.....	28
2.5 Технология плазменного травления .....	33
3 МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИМС.....	40
3.1 Многослойная многоуровневая металлизация на основе алюминия .....	40
3.2 Металлизация с медными межсоединениями.....	46
3.3 Планаризация рельефа .....	58
3.4 RC-задержка сигнала в межсоединениях ИМС .....	65
ЛИТЕРАТУРА.....	69

## ВВЕДЕНИЕ

Технологический маршрут изготовления кремниевых интегральных микросхем (ИМС) обычно делится на две части. Первая часть маршрута называется front end processing или front end of line (FEOL) и включает процессы изготовления активных приборов (транзисторов). Вторая часть носит название back end processing или back end of line (BEOL) и включает в себя процессы формирования межэлементных соединений и межуровневой разводки (система металлизации ИМС). Визуальное представление деления маршрута на процессы FEOL и BEOL показано на рисунке 1.

В последние годы достигнут большой прогресс в области транзисторных технологий, которые используют новые материалы, процессы и конструкции (*high-k* диэлектрики, напряженный кремний, новая архитектура и пр.), что позволило значительно улучшить параметры устройств. В то же время BEOL-процессы изменились не так значительно и становятся одним из лимитирующих процессов, ограничивающих производительность, надежность и стоимость интегральных схем высокой степени интеграции.

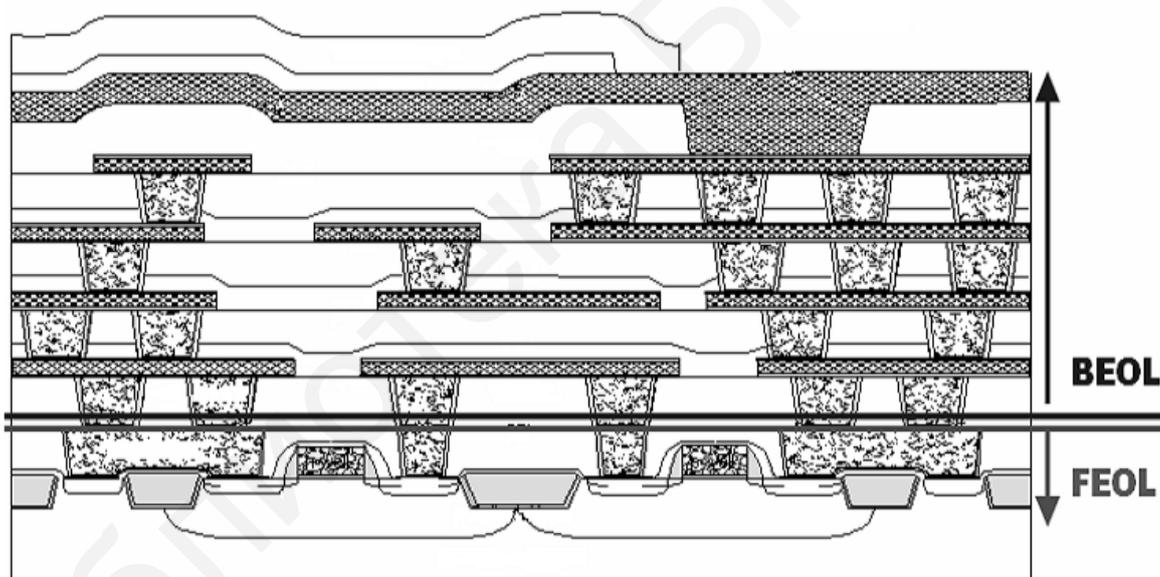


Рисунок 1 – Визуальное представление деления маршрута изготовления ИМС на процессы FEOL и BEOL

Современный полупроводниковый кристалл ИМС содержит более миллиарда транзисторных элементов, для коммутации которых необходимо более 10 км проводников, расположенных на 10 и более уровнях. Уменьшение размеров элементов ведет к росту  $RC$ -задержек в системе межсоединений ( $R$  – сопротивление,  $C$  – емкость проводников), тепловыделению, возникновению перекрестных помех и пр. Это потребовало совершить достаточно сложный переход от пары материалов: Al в качестве проводника и  $\text{SiO}_2$  в качестве изолирующего диэлектрика к Cu в качестве проводника с лучшей электропроводностью и диэлектрику с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k* диэлектрики, величина диэлектрической проницаемости  $k$  которых меньше, чем у

$\text{SiO}_2$ ,  $k < 3,9$ ). Однако в дальнейшем требуется решить сложные материаловедческие задачи: снижение величины диэлектрической проницаемости *low-k* диэлектриков, обеспечение малого сопротивления и стойкости к электромиграции металлических проводников, уменьшение толщины барьерных слоев, поиск новых эффективных схем интеграции. Поэтому важным является своевременное внедрение новых материалов и технологических приемов при формировании межсоединений транзисторных элементов ИМС.

В первом разделе данного учебно-методического пособия рассмотрены основные технические требования к системе межсоединений ИМС и одноуровневая металлизация, где в качестве проводящего слоя используются пленки алюминия. Производство ИМС с субмикронными проектными нормами предъявляет жесткие требования к технологическим процессам формирования проводящих и диэлектрических слоев в маршруте BEOL. Во втором разделе рассмотрены методы формирования тонкопленочных структур в системе металлизации ИМС. В третьем разделе представлена многоуровневая металлизация ИМС на основе пленок алюминия и меди, определены физические ограничения и пути совершенствования системы металлизации ИМС.

# 1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИМС

## 1.1 Классификация и требования к системе металлизации

В планарной структуре ИМС межсоединения между элементами формируют с помощью тонких металлических пленок, нанесенных на изолирующий слой  $\text{SiO}_2$ . Для осуществления такой коммутации в ИМС можно использовать пленки различных материалов: Au, Ag, Al, Cu, Ni, W, Cr, Ti, Ta, а также системы Ti–Au, Mo–Au, Ti–Pt–Au, W–Al и т. д. В системе металлизации ИМС можно выделить следующие основные элементы:

- проводниковые межсоединения;
- слои межуровневого диэлектрика;
- контактная система металлизации;
- слои пассивации.

В развитии процесса формирования межсоединений элементов микросхем можно выделить три основных этапа. На первом этапе металлизация ИМС однослойная, и основу ее составляет один материал – алюминий. На следующем этапе металлизация содержит различные материалы и становится многослойной, появляется деление ее слоев по функциональному назначению. Алюминий по-прежнему остается основой коммутирующей разводки. На третьем этапе происходит замена основного материала межсоединений – алюминия на медь, что влечет за собой усложнение структуры металлизации и существенные изменения в технологическом процессе формирования. Последние два этапа характеризуются также постепенным ростом числа уровней разводки. На рисунке 2 показана структура межэлементных соединений и межуровневой разводки ИМС после вытравливания диэлектрических слоев.

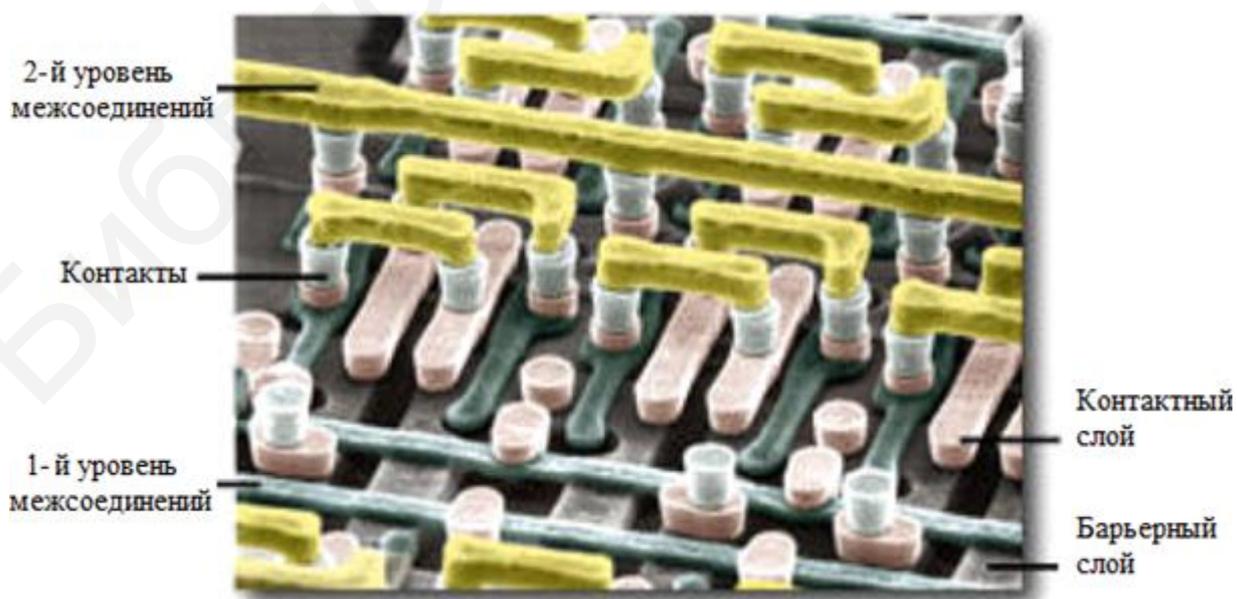


Рисунок 2 – Структура межэлементных соединений и межуровневой разводки ИМС

По функциональному признаку к основным слоям многоуровневой металлизации можно отнести контактные, диффузионно-барьерные и проводящие. В многоуровневой металлизации проводящие слои должны быть разделены диэлектриком.

*Контактный слой* – первый по отношению к полупроводнику (кремнию) слой, являющийся наиболее ответственным в системе металлизации в части создания приборов с заданными электрическими и надежностными характеристиками. К материалам контактных слоев предъявляется комплекс требований по обеспечению номинальных электрических и физико-технологических параметров, в том числе низкое удельное сопротивление, высокая термическая стабильность, простота формирования заданного рисунка, минимальное проникновение в зону *p-n*-перехода. С точки зрения возможности одновременного удовлетворения всем указанным требованиям в качестве материала контактных слоев наиболее приемлемы силициды переходных металлов (PtSi, TiSi<sub>2</sub>, CoSi<sub>2</sub> и NiSi).

*Проводящий слой* – последний по отношению к активной области полупроводникового прибора и очередности нанесения слой, призванный обеспечить высокую электропроводность, устойчивость к электромиграционным процессам при плотностях электрического тока  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup> и допускающий подсоединение внешних проволочных или объемных выводов к контактным площадкам известными методами. В условиях постоянного уменьшения размеров элементов ИМС выбор материала проводящего слоя ограничивается очень небольшим кругом прежде всего по электропроводности: алюминий (2,65 мкОм·см), золото (2,25 мкОм·см), медь (1,68 мкОм·см) и серебро (1,5 мкОм·см).

*Диффузионно-барьерный слой* – промежуточный слой между контактным и проводящим слоями, предназначенный для предотвращения нежелательного взаимодействия между материалами этих слоев. Известными материалами диффузионно-барьерных слоев являются тугоплавкие металлы (Ti, W), сплавы тугоплавких металлов (Ti–W, Ti–W–N, Ta–Si–N, Ti–Si–N), химические соединения тугоплавких металлов (нитриды, карбиды).

К системам металлизации ИМС предъявляются следующие требования:

- высокая проводимость;
- хорошая адгезия как к Si, так и к SiO<sub>2</sub>;
- способность к образованию качественного омического контакта с кремнием *n*- и *p*-типов;
- отсутствие вредных интерметаллических соединений или протекания реакций, разрушающих кремний в процессе обработки и эксплуатации системы;
- технологичность методов осаждения и нанесения рисунков;
- устойчивость к электродиффузии в металле;
- металлургическая совместимость со сплавами, которые применяются для присоединения внешних проводов к металлизированной схеме.

## 1.2 Однослойная металлизация на основе пленок алюминия

Алюминий используется в качестве проводящего металла для межсоединений ИМС. Широкое использование пленок алюминия для металлизации в интегральных схемах обусловлено: высокой электропроводностью, близкой к электропроводности объемного алюминия; легкостью испарения в вакууме и чистотой испаряемой пленки. Электрофизические свойства пленок алюминия зависят от целого ряда условий: чистота испаряемого материала, давление в вакуумной системе, скорость напыления, температура подложки и др. Алюминий имеет относительно низкую температуру испарения, и поэтому вероятность загрязнения напыленной пленки примесями из вакуумной камеры и испарителя должна быть небольшой по сравнению с металлами, имеющими более высокую температуру испарения.

Пленки алюминия, нанесенные на аморфную поверхность  $\text{SiO}_2$  термически окисленных пластин кремния, являются поликристаллическими с некоторой тенденцией к определенной ориентации кристаллитов (рисунок 3). После напыления пленки имеют зеркально-гладкую поверхность.

Алюминий имеет низкую величину удельного сопротивления при комнатной температуре, а значение этого параметра для его сплавов удовлетворяет требованию низкого сопротивления контакта. Алюминий и его сплавы обладают хорошей адгезией к термическому  $\text{SiO}_2$  и осажденным силикатным стеклам.

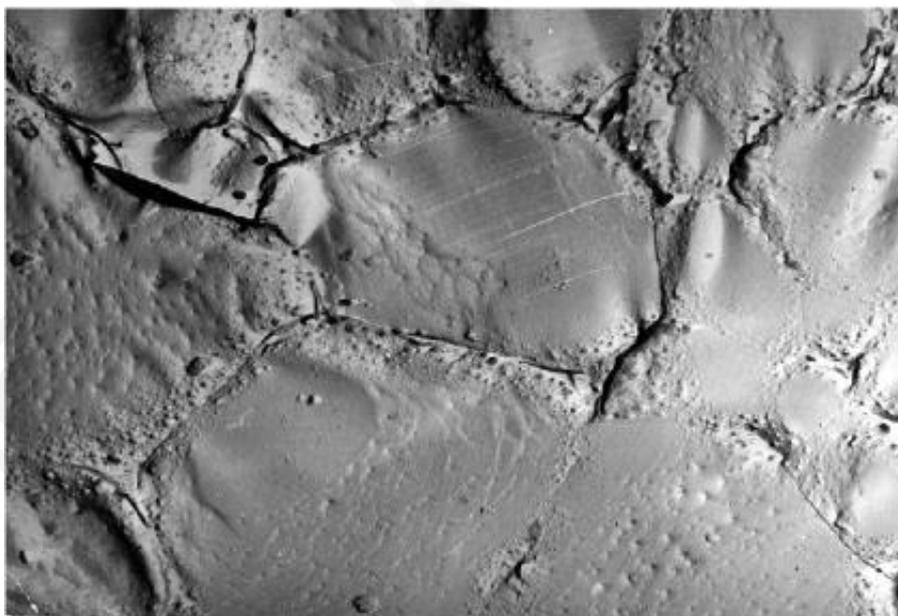


Рисунок 3 – Микрорельеф пленки алюминия

Несмотря на эти преимущества, использование алюминия при изготовлении ИМС, обладающих мелкими переходами, часто сталкивается с трудностями, связанными с электромиграцией и коррозией.



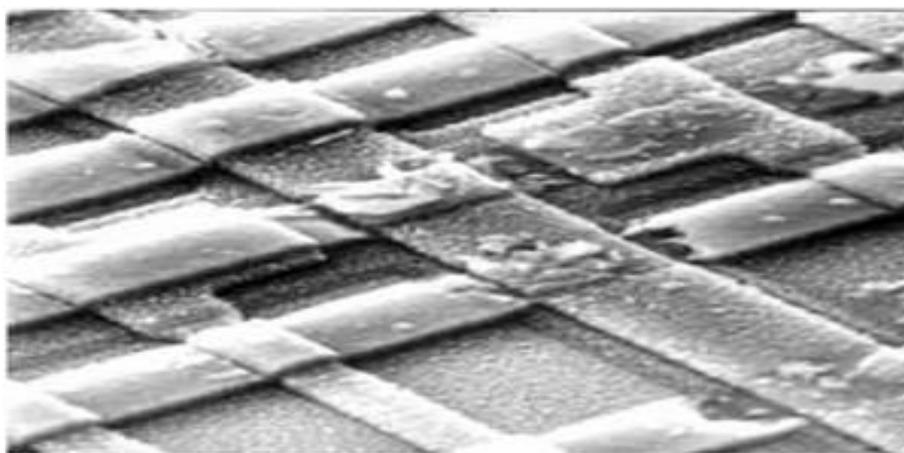


Рисунок 5 – Разрушение межсоединений в результате электромиграции

Чтобы уменьшить электромиграцию, в пленки алюминия вводят примесь Cu, Si в количествах, не превышающих 1–2 %. Примесь, располагаясь преимущественно по границам зерен, значительно уменьшает подвижность ионов алюминия вдоль этих границ (рисунок 6).

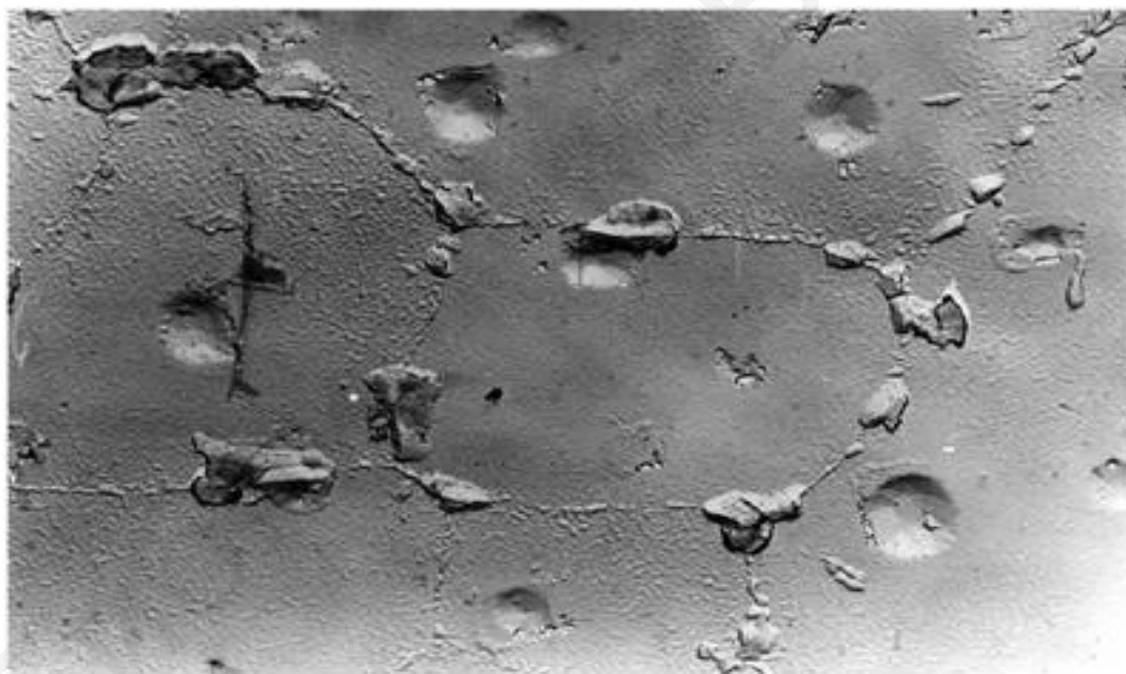


Рисунок 6 – Микрорельеф поверхности Si на границе раздела Si–Al (1 % Cu)

**Область контакта** между межсоединениями и активными областями ИМС должна обеспечивать заданные электрические параметры, механическую прочность и сохранять их в течение всего срока службы микросхемы. Для нормальной работы ИМС контакты к ним должны удовлетворять следующим требованиям:

- быть невыпрямляющими, т. е. сопротивление контакта не должно меняться при изменении направления протекающего тока;
- обладать линейными зависимостями сопротивления от величины протекающего тока;
- иметь минимальное сопротивление, в том числе в направлении, параллельном поверхности, особенно если вывод присоединен к незначительной по площади части контакта;
- обладать высокой теплопроводностью и иметь коэффициент теплового расширения, близкий к аналогичным коэффициентам кремния и материала вывода или корпуса;
- представлять металлургически стабильную систему с кремнием и материалом вывода;
- металл контакта должен обеспечивать достаточно хорошую адгезию к кремнию, а в случае распространенных контактов – и к диэлектрическому покрытию;
- не вступать в химическое взаимодействие с диэлектрическим покрытием;
- обеспечивать проведение фотолитографии;
- глубина диффузии металла контакта в кремний должна быть минимальной.

Для получения стабильного низкоомного контакта и улучшения адгезии алюминия к подложке проводят термообработку алюминия в атмосфере инертного газа в течение нескольких минут при  $T = 500\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ . Эта температура ниже температуры затвердевания системы Si–Al, поэтому жидкая фаза не образуется. Термообработка в процессе или после нанесения металла имеет целью растворить приповерхностный загрязненный слой кремния в контактном окне, что на практике всегда обеспечивает улучшение характеристик контакта. Другая причина, по которой нельзя избежать термообработки, заключается в том, что термообработка, в результате которой вероятно возникновение проплавлений, требуется также на последующих операциях технологического процесса, уже не связанных с формированием металлизации. При термообработке происходит растворение кремния в алюминии, и в результате этого приповерхностный слой кремния оказывается легирован алюминием, концентрация последнего составляет около  $5 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$  (рисунок 7).

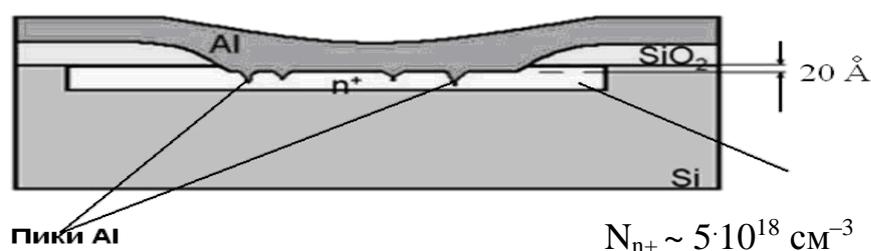


Рисунок 7 – Дефекты омического контакта после термообработки пленок алюминия

Поскольку алюминий является акцептором по отношению к кремнию, то при создании омических контактов к кремнию *n*-типа может возникнуть *p-n*-переход, и тогда контакт окажется не омическим, а выпрямляющим. Действительно, если концентрация доноров в *n*-слое меньше  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , то атомы алюминия создадут в нем приповерхностный *p*-слой. Чтобы это исключить, область *n*-слоя вблизи контакта сильно легируют, превращая ее в  $n^+$ -слой с концентрацией доноров  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  и более. Тогда концентрация алюминия оказывается недостаточной для образования *p*-слоя, и *p-n*-переход не образовывается.

Если *n*-слой с самого начала сильно легирован (например, эмиттерный слой транзистора), то дополнительное легирование не требуется. Не возникает проблем и при контакте алюминия с *p*-слоями, так как растворение в них алюминия приводит к образованию приповерхностных  $p^+$ -слоев, что способствует повреждению качества омического контакта.

Часто при термообработке алюминия отдельные участки кремния с повышенной поверхностной энергией растворяются в алюминии быстрее, что приводит к образованию локальных ямок, заполняемых впоследствии алюминием (рисунок 8). Глубина и плотность образующихся ямок зависят от режимов термообработки. Наличие таких ямок может приводить к закорачиванию *n-p*-эмиттерных переходов, когда глубина их залегания небольшая.

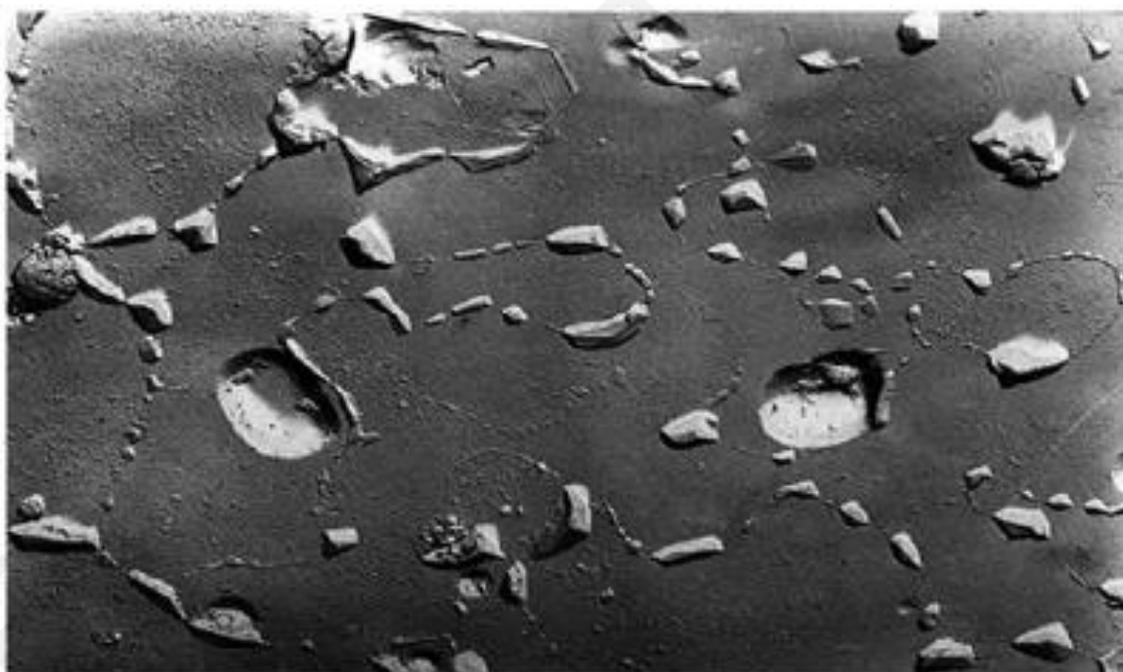


Рисунок 8 – Ямки травления алюминия на границе раздела Si–Al в области омического контакта

Для получения малопроникающих контактов в алюминий вводят около 2 % кремния. Присутствие кремния в пленках алюминия сдерживает процесс растворения кремния при термообработке и уменьшает вероятность образования глубоких локальных ямок.

В результате применения однослойной металлизации на основе пленок алюминия сформировался комплекс параметров, по которым выдвигаются требования к системе металлизации ИМС. Основными среди них являются:

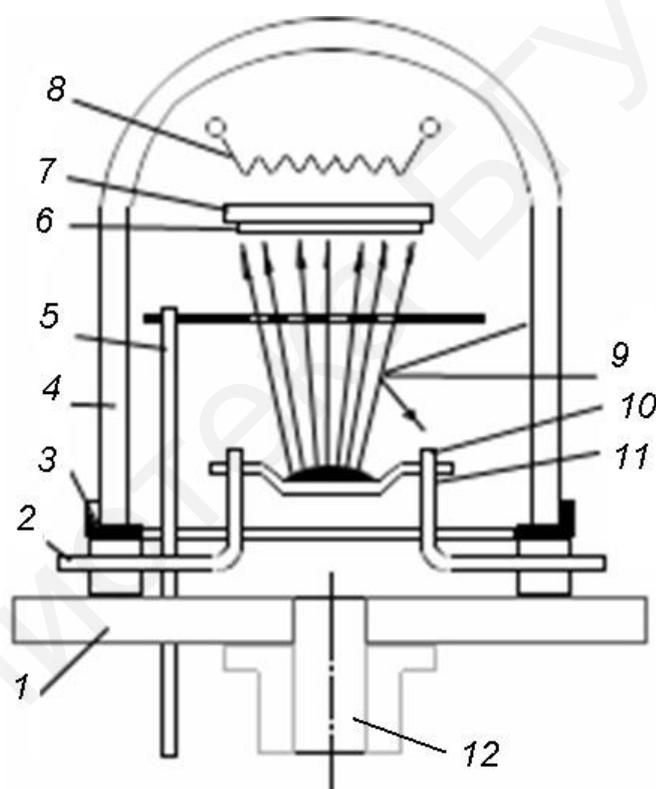
- удельное контактное сопротивление контакта к  $p^+$ - и  $n^+$ -типам кремния;
- удельное сопротивление межсоединений и величина задержки сигнала  $RC$ -цепью;
- склонность к электромиграции;
- термическая стабильность.

При наличии одного из самых низких удельных сопротивлений недостатками однослойной алюминиевой металлизации являются достаточно высокая склонность к электромиграции и сильно различающиеся значения контактного сопротивления к  $p^+$ - и  $n^+$ -типам кремния. Удовлетворение требований по всему комплексу параметров возможно только при использовании материалов с различными специфическими свойствами и разделении функций этих материалов в составе системы металлизации.

## 2 МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

### 2.1 Термическое испарение в вакууме

Одним из наиболее универсальных методов получения пленочных структур самого различного назначения является метод термовакуумного напыления, который заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Этот метод давно и успешно используется в различных областях микроэлектроники, в том числе для создания пленочных элементов в системе металлизации ИМС. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках. Типичная схема установки показана на рисунке 9.



- 1 – базовая плита; 2 – токопровод; 3 – герметизация колпака; 4 – колпак;  
5 – подвижный экран; 6 – подложка; 7 – держатель подложки; 8 – подогреватель;  
9 – соударение с молекулой остаточного газа; 10 – испаряемое вещество;  
11 – испаритель (тигель, лодочка); 12 – присоединение к вакуумному насосу

Рисунок 9 – Схема установки термовакуумного напыления

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель 11, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к подложке 6, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри камеры, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Сущность процесса состоит в переводе осаждаемого материала с помощью нагрева в парогазовую фазу. Образующийся при этом парогазовый поток в высоком вакууме распространяется прямолинейно, так как отсутствует соударение с молекулами остаточного газа – длина свободного пробега молекул в остаточном газе на порядок превышает расстояние от источника до подложки; газ попадает на подложку, поверхность которой холоднее источника пара, при этом происходит конденсация и образование пленки. Давление остаточных газов составляет  $10^{-8}$ – $10^{-4}$  Па. Адгезионную прочность и структурную стабильность обеспечивают чистота и подогрев подложки до 300–600 °С.

Этот метод имеет разновидности, которые различают главным образом по способу нагрева испаренного вещества (резистивное, высокочастотное, электронно-лучевое).

Процесс испарения и качество получаемых пленок в значительной мере определяются типом и конструкцией испарителей. Существующие испарители можно разбить на две группы: с прямым и косвенным нагревом.

В испарителях с прямым нагревом ток пропускается непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения имеет основное достоинство – получение особо чистых пленок, отсутствие загрязнения примесями нагревателя.

Испарители с косвенным нагревом подразделяются на следующие типы:

- резистивные – тепло выделяется при пропускании тока через нагреватель;
- индукционные – испаряемый материал нагревается вихревыми токами;
- электронно-лучевые – для испарения материала используется энергия электронного луча;
- дуговые – для испарения вещества используется дуговой разряд.

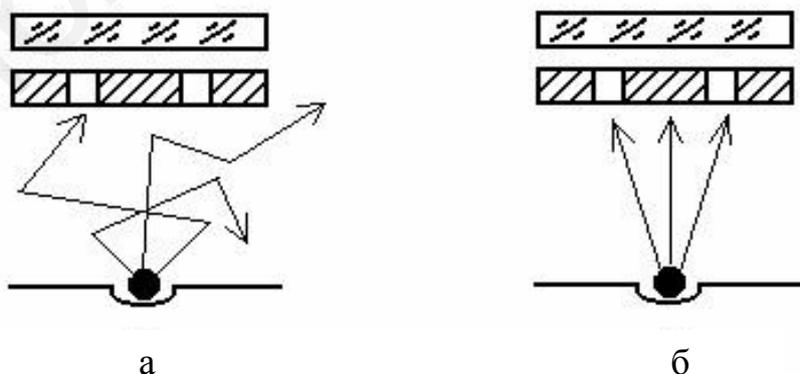
В качестве материалов нагревателей применяются тугоплавкие металлы: W, Mo, Ta. В зависимости от вида испаряемого материала испарителям придается форму лодочек или неглубоких тиглей. Для испарения порошкообразных материалов применяют испарители в виде лодочек с сетчатой крышкой, которая предотвращает разбрасывание материала вследствие образования повышенного давления пара в месте контакта испаряемого материала и нагревателя. Для нанесения пленок Ti, Ni, Fe такие испарители малопригодны, так как эти металлы вступают в химическое взаимодействие с материалом испарителя. Следует, однако, помнить, что некоторые металлы (например, Al) образуют с материалом испарителя сплавы с низкой температурой испарения. В связи с этим для испарителей таких металлов следует подбирать определенное соотношение сечений материала испарителя и испаряемого вещества. Например, для Al непригодны испарители в виде тонкой вольфрамовой ленты, так как он, образуя эвтектический сплав, «растворяет» ленту. Для Al применяются испарители в виде множества вольфрамовых проволочек, обладающие значительно большей смачивающей поверхностью.

При индукционном нагреве испаряемый материал помещают в тигель, изготовленный из тугоплавких материалов: графита, оксидов алюминия или циркония, нитридов алюминия или бора. Недостаток этого испарителя – нестабильность скорости испарения, так как эффективность нагрева металла высокочастотным полем понижается по мере уменьшения его объема в процессе испарения.

Электронно-лучевые испарители осуществляют нагрев испаряемого вещества электронной бомбардировкой. Этот способ очень эффективен при условии попадания электронов непосредственно на вещество, подлежащее испарению. Наиболее высокая температура создается в ближайших к поверхности слоях испаряемого материала. Этот метод применяется для испарения тугоплавких материалов. При этом испаряемый материал можно использовать в любом виде (порошок, проволока, фольга).

Таким образом, для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

**Формирование молекулярного потока.** Для формирования молекулярного потока условия в пролетном пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаряемого вещества без столкновений с молекулами остаточных газов достигали подложки. Условия существования молекулярного потока показаны на рисунке 10. При частых столкновениях скорость осаждения пленок незначительная (рисунок 10, а). Направленное движение молекул вещества к подложке (соответственно уменьшенное столкновение испаряемого вещества с молекулами остаточных газов) может быть создано за счет достаточно высокого вакуума (рисунок 10, б). Для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление остаточного газа порядка  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па.



а – в условиях низкого вакуума; б – в условиях высокого вакуума  
Рисунок 10 – Схема движения молекул при осаждении пленок

**Испарение вещества.** Переход твердых тел или жидкостей в газообразное состояние называется испарением и может быть рассмотрен на основе положений термодинамики и кинетической теории газа. Особое значение имеет условие термодинамического равновесия, при котором два состояния вещества, например, конденсированная фаза (жидкость, твердое вещество) и ее пар, существуют при одной и той же температуре в контакте друг с другом без каких-либо изменений во времени. Это означает, что количество испаренного вещества должно быть равно количеству сконденсированного вещества за все время, пока поддерживается равновесие (состояние насыщения). При этих условиях твердые тела и жидкости характеризуются определенным давлением насыщенных паров, которое зависит только от температуры для данного вещества. Чем выше температура, тем больше давление насыщенного пара и больше скорость испарения.

При рассмотрении процесса испарения можно воспользоваться условием термодинамического равновесия, при котором количество испаренных из исходного вещества молекул равно количеству вновь сконденсированных молекул из парового пространства.

**Конденсация вещества на подложке.** Молекула вещества, двигаясь от испарителя к подложке со скоростью  $\sim 500$  м/с, при столкновении с подложкой отдает ей часть своей энергии. Доля энергии, передаваемая подложке, тем меньше, чем выше температура подложки. Сохранив при этом некоторый остаток энергии, молекула способна перемещаться по поверхности подложки, при этом теряя свой избыток энергии и стремясь к тепловому равновесию с подложкой. Наступает состояние физической адсорбции, т. е. преобладают силы Ван-дер-Ваальса. В процессе миграции возможны следующие варианты:

- встретив на пути потенциальную яму, молекула теряет избыток энергии и фиксируется на подложке, становясь центром кристаллизации;
- встретив на пути потенциальный барьер и обладая достаточным избытком энергии, молекула покидает подложку (вторичное испарение, реиспарение);
- встретив на пути движения другую мигрирующую молекулу (или группу), молекула вступает с ней в сильную связь. При достаточно крупном объединении молекул такая группа полностью теряет способность мигрировать на подложке, становясь центром кристаллизации.

Вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку. С этого момента подложка уже не имеет решающего значения. Повышение температуры подложки при прочих неизменных условиях увеличивает энергию адсорбированных молекул. В результате повышается вероятность десорбции отдельных молекул. При достаточно высокой температуре подложки (называемой критической) вероятность реиспарения становится равной единице и конденсация не происходит. В процессе напыления температуру подложки устанавливают обычно не выше 300–350 °С. Ограничением для повышения температуры могут

являться термостойкость материала подложки, заметная разность температурных коэффициентов линейного расширения подложки и пленки.

Для получения пленки, обладающей хорошей адгезией к подложке, необходимо провести: тщательную очистку поверхности, нагрев подложки с целью испарения адсорбированных газов. Заметное повышение адгезии наблюдается при образовании осадка на поверхности раздела пленка – подложка.

Метод термовакuumного напыления характеризуется простотой и высокими скоростями осаждения, но не обеспечивает достаточной воспроизводимости свойств пленок, в особенности при осаждении веществ сложного состава. Кроме того, в процессе испарения материалов с низкой теплопроводностью может происходить вылет крупных частиц, что является причиной появления поверхностных дефектов и нарушения непрерывности пленочного покрытия.

## 2.2 Ионно-плазменное осаждение

Методы осаждения тонких пленок с использованием низкотемпературной плазмы и ионного луча дают возможность получать пленки различных материалов, которые практически невозможно произвести термовакuumным методом. При ионно-плазменном нанесении осаждаемый на подложку материал получают путем распыления твердотельной мишени энергетическими ионами. Важным отличием ионно-плазменного нанесения от термовакuumного является высокая энергия распыленных частиц (3–5 эВ) по сравнению с испаренными (0,15 эВ), что позволяет осаждающимся частицам частично внедряться в подложку, обеспечивая высокую адгезию пленки к подложке.

Ионно-плазменный процесс нанесения пленок можно разделить на три основных этапа: распыление материала мишени, перенос распыленного материала в пространстве мишень – подложка, осаждение материала на подложке.

**Распыление материала мишени.** Бомбардировка твердотельной мишени энергетическими ионами вызывает распыление материала мишени, если энергия бомбардирующего иона превышает некоторое пороговое значение. При распылении происходит передача кинетической энергии бомбардирующего иона атомам твердого тела и последующий вылет через поверхность тех частиц, энергия которых достаточна для преодоления поверхностных сил со стороны твердого тела. Важными характеристиками распыления являются зависимости коэффициента распыления от энергии бомбардирующих ионов и угла их падения относительно нормали к поверхности. Зависимость коэффициента распыления от энергии иона полностью определяется зависимостью от энергии сечения упругого торможения.

Температура мишени практически не влияет на распыление при температурах, далеких от точки плавления. Однако сильный разогрев приповерхностной области распыляемой мишени за счет ионной бомбардировки, особенно при отсутствии достаточного теплоотвода, способствует усилению диффузионных процессов. Вследствие интенсивного дефектообразования при ионной бомбардировке коэффициент диффузии примесей в распыляемой мишени будет

существенно выше, чем при обычной термической диффузии. В случае многокомпонентной мишени это может привести к изменению состава на поверхности. Поэтому необходимо поддерживать относительно низкую температуру распыляемой мишени.

В качестве рабочего газа – источника ионов, бомбардирующих мишень, обычно используют аргон. Присутствие в аргоне примесей, таких как кислород, двуокись углерода, пары воды и вакуумного масла, приводит к значительному снижению скорости распыления вследствие образования на поверхности мишени пленок химических соединений, особенно окислов.

При рассмотрении этапа распыления необходимо знать плотность тока и истинную энергию ионов, бомбардирующих распыляемую мишень. При давлениях рабочего газа более  $10^{-1}$  Па велика вероятность столкновений ионов с атомами газа, в результате которых возможна перезарядка ионов аргона. Ионы, потерявшие заряд, бомбардируют мишень как нейтральные частицы, сохранившие приобретенную ранее кинетическую энергию, а вновь образующиеся ионы обладают более низкой энергией, так как разгоняются меньшей разностью потенциалов. Возникает дисперсия потока ионов по энергиям. Скорость распыления мишени является в этом случае сложной функцией энергии и распределения по энергиям бомбардирующих ионов. Процесс ионно-лучевого распыления осуществляется в «чистых» вакуумных условиях, поэтому на этапе распыления среда в меньшей степени влияет на энергию бомбардирующих ионов и состояние поверхности мишени.

**Перенос распыленного материала в пространстве мишень – подложка.** Движение распыленных частиц материала в пространстве мишень – подложка определяется вероятностью рассеяния частиц на атомах рабочего газа, т. е. зависит от давления и расстояния мишень – подложка.

При малых давлениях и малых расстояниях перенос распыленных частиц происходит практически по прямой, поскольку при таких условиях вероятность рассеяния частиц очень мала. При высоких давлениях часть распыленных частиц в результате многократных столкновений с атомами газа и рассеяния на большие углы будет иметь нулевую скорость по направлению к подложке. Исчезает направленность движения распыленных частиц.

В пространстве мишень – подложка создается градиент плотности распыленных частиц, вызывающий диффузию частиц по направлению к подложке. Если скорость распыленных атомов больше тепловой, то диффузия имеет характер ускоренной диффузии. Поскольку при столкновении с атомами газа распыленные частицы теряют энергию, то при высоких давлениях на этапе переноса может теряться одно из основных преимуществ ионно-плазменного нанесения – высокая энергия частиц, осаждающихся на подложке. Перенос с минимальным рассеянием распыленных частиц безусловно обеспечивается при ионно-лучевом нанесении. Этап переноса оказывает минимальное влияние на характеристику процесса ионно-плазменного нанесения.

**Осаждение материала на поверхности подложки.** Когда частицы распыленного материала достигают поверхности подложки, то в результате соударения частиц с поверхностью происходит обмен энергией, вследствие чего частицы могут или упруго отразиться от поверхности, или адсорбироваться на ней. Вероятность адсорбции обычно характеризуют коэффициентом конденсации, равным отношению числа адсорбированных частиц к числу падающих частиц на поверхность. Число адсорбированных единичных атомов связано с потоком атомов на поверхность и зависит от времени осаждения и времени жизни адсорбированного атома на поверхности.

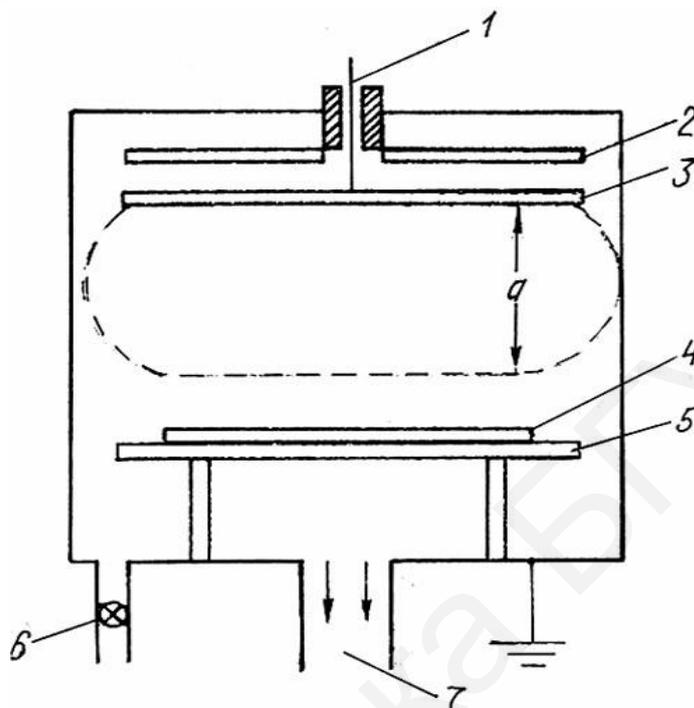
Соударения атомов, мигрирующих в адсорбционном слое, приводят к образованию группы атомов – кластеров. На начальной стадии рост таких кластеров сопровождается увеличением свободной энергии, т. е. протекает с преодолением активационного барьера. По достижении некоторого критического размера кластера возникает кристаллический зародыш. Зародышем называют минимальное количество новой фазы, способной к самостоятельному существованию и находящейся в равновесии с пересыщенной исходной фазой. Рост зародыша сопровождается убыванием свободной энергии. При появлении зародыша метастабильная фаза начинает переходить в стабильную.

Режимы роста тонких пленок обычно разделяются на послойный, островковый и промежуточный. *Послойный режим* реализуется в том случае, если атомы осаждаемого вещества связаны с подложкой более сильно, чем друг с другом. Моноатомные слои заполняются в этом режиме по очереди, т. е. двумерные зародыши следующего слоя образуются на верхней части зародышей предыдущего слоя после его заполнения. *Островковый режим* реализуется в противоположном случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны между собой сильнее, чем с подложкой. В островковом режиме маленькие зародыши образуются прямо на поверхности подложки и затем растут, превращаясь в большие островки конденсированной фазы. Затем, сливаясь, эти островки образуют после заполнения каналов между ними сплошную пленку. В *промежуточном режиме* вначале реализуется послойный рост, затем, после заполнения одного-двух слоев, начинается островковый режим роста.

Разновидности процесса ионно-плазменного нанесения пленок отличаются техническими средствами, обеспечивающими создание плазмы и бомбардировку распыляемой мишени. В установках для нанесения тонких пленок для металлизации ИМС используют диодные устройства ионно-плазменного нанесения на постоянном токе, триодные устройства ионно-плазменного нанесения, устройства высокочастотного распыления и магнетронные распылительные системы.

**Диодные устройства ионного распыления на постоянном токе** используются только для распыления мишеней из материалов с достаточно высокой электропроводностью. Ионное распыление производят в тлеющем разряде инертного газа с помощью диодной системы (катодное распыление), где мишень из распыляемого материала является катодом, а держатель подложки – заземленным анодом (рисунок 11).

Для тлеющего разряда характерно наличие двух резко различающихся областей: небольшой по протяженности катодной области, в которой сосредоточено падение потенциала значительной величины, называемое катодным падением потенциала, и области столба разряда, представляющего собой плазму с хорошей электропроводностью, а потому сравнительно малым перепадом потенциала на нем.



1 – высоковольтный ввод; 2 – экран катода; 3 – катод; 4 – подложка;  
 5 – анод; 6 – натекающий для рабочего газа; 7 – патрубок к откачной системе;  
 а – протяженность катодной области разряда  
 Рисунок 11 – Схема устройства катодного распыления диодного типа

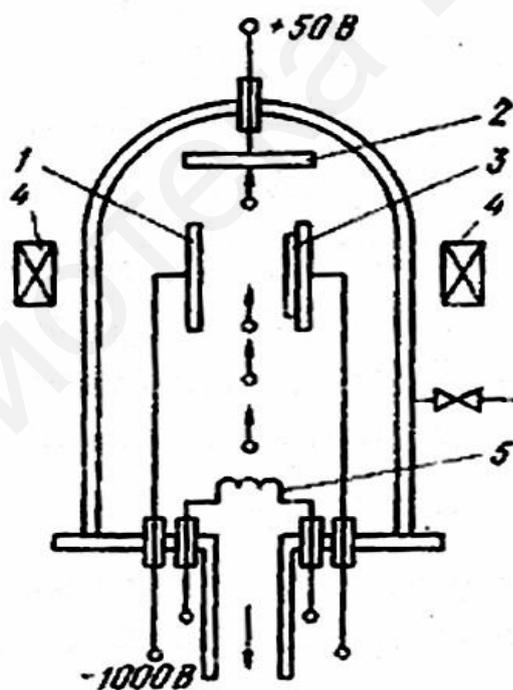
Катодная область состоит из следующих участков: 1 – первое катодное темное пространство; 2 – первое катодное свечение; 3 – второе темное катодное пространство; 4 – катодное тлеющее свечение; 5 – фарадеево темное пространство. Для поддержания тлеющего разряда необходимы лишь его катодные участки (1–4), обеспечивающие ионизацию газа. Столб разряда и фарадеево темное пространство играют пассивную роль проводника с хорошей электропроводностью, соединяющего катодную область с анодом. Характерным для тлеющего разряда является то, что при уменьшении расстояния между анодом и катодом уменьшается лишь протяженность столба разряда, пока он не исчезает совсем. Катодные участки разряда при этом не изменяются.

В качестве рабочего газа обычно используют аргон. В процессе ионного распыления в диодной системе катод выполняет две функции: является источником электронов для поддержания тлеющего разряда и источником распыляемого материала. Рабочее напряжение в такой системе 1–3 кВ, давление до ~10 Па. Высокое напряжение и относительно высокое давление являются

причиной основных недостатков диодной системы. Высокое напряжение определяет интенсивный нагрев подложки и пленки в результате бомбардировки высокоэнергетическими вторичными электронами и образование радиационных дефектов в формируемых структурах, а относительно высокое давление в системе повышает вероятность загрязнения пленки.

**В триодных устройствах ионно-плазменного нанесения** распыляемая мишень, на которую подается отрицательный потенциал, является третьим электродом, а не катодом, т. е. триодная система содержит три независимо управляемых электрода: катод, анод и распыляемую мишень (рисунок 12). Подложка располагается напротив мишени.

Ионы инертного газа, участвующие в разряде между анодом и катодом, вытягиваются из плазмы, увлекаются сильным ускоряющим электрическим полем к мишени и бомбардируют ее. Это позволяет широко варьировать режим бомбардировки мишени изменением ускоряющего напряжения. На мишень можно подавать как постоянное отрицательное напряжение для распыления проводящих материалов, так и ВЧ-напряжение для распыления диэлектриков. Удержание плазмы в ограниченном пространстве вакуумной камеры осуществляется с помощью магнитного поля.



1 – мишень из распыляемого материала; 2 – анод; 3 – подложка; 4 – магниты;  
5 – термокатод

Рисунок 12 – Схема триодного устройства ионно-плазменного нанесения

**Диодная высокочастотная распылительная система** содержит два электрода: заземленный анод и мишень (катод), на которую подают напряжение от ВЧ-генератора.

ВЧ-распыление значительно расширяет возможности тонкопленочной технологии, позволяя получать высококачественные пленки не только металлов, сплавов и полупроводников, но и диэлектриков путем распыления мишеней из диэлектрических материалов. ВЧ-распыление диэлектрической мишени происходит благодаря возникновению на ней отрицательного смещения. Механизм возникновения отрицательного смещения связан с тем, что при подаче ВЧ-напряжения на помещенную в плазму мишень на ее поверхность начинают попеременно поступать электронный и ионный токи. В первый момент после подачи ВЧ-напряжения его постоянная составляющая на поверхности диэлектрической мишени равна нулю. В этом случае электронный ток в положительный полупериод ВЧ-напряжения значительно превосходит ионный ток в отрицательный полупериод, что объясняется значительно большей подвижностью электронов по сравнению с ионами. Таким образом, на поверхности мишени накапливается отрицательный заряд и, следовательно, растет отрицательное напряжение смещения до тех пор, пока средние значения электронного и ионного токов не сравняются.

Отрицательное смещение определяет энергию ионов и, следовательно, эффективность распыления мишени. Поэтому необходимо, чтобы положительный заряд на поверхности мишени, приобретенный за счет ионного тока, не был большим, поскольку это вызывает уменьшение отрицательного смещения. Действие положительного заряда компенсирует электронный ток на мишень, восстанавливая напряжение отрицательного смещения. Очевидно, что чем длительнее период ВЧ-колебаний, тем больший положительный заряд приобретает мишень и тем сильнее уменьшается отрицательное смещение. Для устранения этого явления период ВЧ-колебаний должен быть достаточно малым.

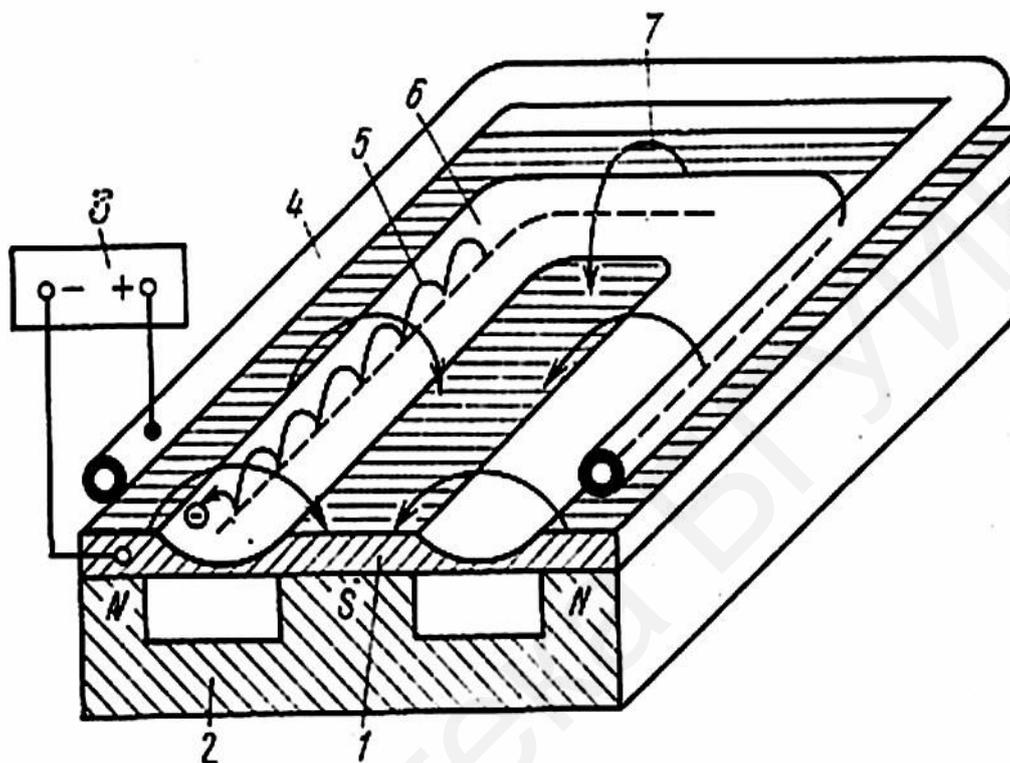
**Магнетронные распылительные системы** получили свое название от СВЧ-приборов – магнетронов, хотя, кроме наличия скрещенных электрического и магнитного полей, ничего общего с ними не имеют.

Магнетронные распылительные системы относятся к системам распыления диодного типа. Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система (рисунок 13). Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и в рабочем газе возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

Электроны, эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям вблизи поверхности мишени. Электроны

оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны – поверхностью мишени, отталкивающей электроны. В этой ловушке электроны циклируют до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию.



1 – катод-мишень; 2 – магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод;  
5 – траектория движения электрона; 6 – зона распыления;  
7 – силовая линия магнитного поля

Рисунок 13 – Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью

Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение атомов рабочего газа, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, следовательно, и скорости осаждения пленки.

Следует отметить, что плазма разряда существует только в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля.

Основные рабочие характеристики магнетронной распылительной системы:

- напряжение на электродах;
- ток разряда;
- плотность тока на мишени;

- удельная мощность;
- величина индукции магнитного поля;
- рабочее давление.

Высокая степень ионизации и высокая плотность ионного тока в магнетронной распылительной системе позволяют работать при более низком напряжении и более низком давлении по сравнению с диодными распылительными системами на постоянном токе. Важнейшим параметром, во многом определяющим характер разряда в магнетронной распылительной системе, являются геометрия и величина магнитного поля.

Высокая плотность ионного тока (на два порядка выше, чем в обычных диодных распылительных системах) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени, резко увеличивают скорость распыления в магнетронной распылительной системе. Необходимая скорость осаждения пленки с достаточной точностью может поддерживаться за счет постоянства таких параметров процесса, как ток разряда или подводимая мощность. Увеличение скорости распыления с одновременным снижением давления рабочего газа позволяет существенно снизить степень загрязнения пленок газовыми включениями. В магнетронной распылительной системе обеспечивается сравнительно низкая температура подложки, поскольку высокоэнергетические вторичные электроны с мишени, которые являются основным источником нагрева подложки, захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку. Источниками нагрева подложки в этих системах служат энергия конденсации распыленных атомов, кинетическая энергия осаждаемых атомов, энергия отраженных от мишени нейтрализованных ионов, а также излучение плазмы.

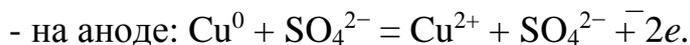
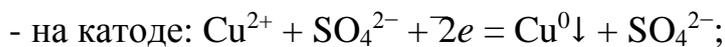
Преимущества магнетронной распылительной системы перед распылительными системами без магнитного поля: высокая скорость осаждения пленок; высокая чистота пленок; более низкое радиационное и тепловое воздействие на подложку и осаждаемую пленку. Основным достоинством магнетронной распылительной системы является универсальность: можно осуществлять распыление на постоянном токе, ВЧ-распыление, а также процессы реактивного ионно-плазменного нанесения пленок.

### **2.3 Электрохимическое осаждение**

В основу метода электрохимического осаждения положены реакции, протекающие в водных растворах солей металлов в условиях приложенного электрического поля. В результате взаимодействия продуктов реакции с подложкой образуется пленка. При формировании металлизации ИМС электрохимическое осаждение применяется при создании тонкопленочного слоя меди.

При электроосаждении меди из раствора медного купороса в качестве анода используется медная пластина (рисунок 14). С приложением к электродам разности потенциалов происходит разложение электролита на ионы. Под действием электрического тока, протекающего через раствор, находящиеся в растворе ионы металла, двигаясь к аноду, захватывают на нем электроны и,

осаждаясь, превращаются в нейтральные атомы. Под действием тока ионы меди, достигая катода, отбирают два электрона, образуя нейтральные атомы, а на аноде атом меди отдает два электрона и переходит в раствор в виде положительного иона. Процесс описывается следующими уравнениями:



Осаждение атомов металла начинается на дефектах структуры подложки, после этого они перемещаются вдоль поверхности к изломам, образуя пленку. Таким образом, пленка развивается островками, которые разрастаются во всех направлениях. Если вблизи зародыша концентрация электролита понижена (что имеет место в большинстве случаев), то условия благоприятны для роста пленки по нормали к поверхности.

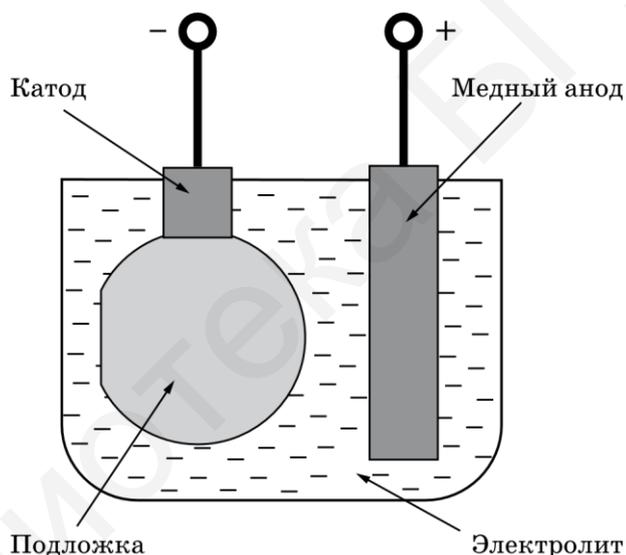


Рисунок 14 – Схема метода электрохимического осаждения

Свойства осажденных пленок зависят от состава электролита, плотности тока, температуры, интенсивности перемешивания электролита, скорости дрейфа ионов металла, формы и состояния поверхности подложки. Толщина пленки контролируется по значению тока и времени осаждения.

Кроме меди методом электроосаждения можно получить пленки различных металлов: никеля, золота, серебра и др.

К электрохимическим методам относят анодное окисление – взаимодействие химически активных металлов с ионами кислорода, выделяющимися у анода при электролизе с образованием оксидной пленки. Процесс анодного окисления, или анодирование, имеет много общего с электролитическим осаждением. Аппаратурное оформление этих методов практически

одинаково, однако в данном случае пленки образуются на аноде, которым является подложка.

В процессе анодирования происходит электролитическая реакция соединения кислорода с металлом в приповерхностных слоях подложки. При этом металл анода не растворяется, как в случае электроосаждения, а при взаимодействии с кислородом образует плотно сцепленную с подложкой оксидную пленку. Механизм роста пленки заключается в переносе ионов кислорода через растущий оксидный слой под воздействием электрического поля, возникающего в пленке в случае приложения к электродам напряжения от внешнего источника. Скорость роста оксидной пленки зависит от природы электролита, условий проведения процесса – электрического режима и температуры. Толщина оксидной пленки при анодировании пропорциональна количеству электричества, прошедшего через ванну.

В технологии изготовления ИМС путем анодирования получают оксидные пленки из тантала и алюминия. При этом сначала на подложку вакуумным методом наносится пленка исходного металла, которая впоследствии подвергается локальному анодированию. Процесс получения оксидных пленок анодированием состоит из первоначальной формовки при постоянной плотности тока и окончательной формовки при постоянном напряжении. Такое ведение процесса обусловлено тем, что с ростом толщины пленки ее возрастающее сопротивление приводит к снижению силы тока.

Особенностью получения анодированных пленок является их рост в условиях приложенного электрического поля, напряженность которого достигает  $10^7$  В/см. Такие пленки характеризуются высокой электрической прочностью, поэтому их используют в качестве изолирующих и диэлектрических слоев.

Вакуумное нанесение пленок тантала и алюминия с последующим анодированием позволяет создавать высококачественные изолирующие слои при многослойной разводке. Основным преимуществом при этом является получение различных пленочных структур из одинаковых исходных материалов.

Покрытия, получаемые электрохимически и химически из водных растворов, имеют особенности, не свойственные пирометаллургическим металлам. Такие характеристики покрытий, как электропроводность, твердость, внутренние напряжения, магнитные и другие свойства не совпадают с характеристиками металлов, получаемых кристаллизацией из расплавов.

Во время электролиза при получении металлических покрытий одновременно действует множество факторов и выяснить влияние каждого из них на особенности формирующихся покрытий затруднительно. При определенных условиях одни факторы могут значительно изменить какую-либо характеристику покрытия, действие других может остаться малозаметным. Тем не менее электрохимическое осаждение находит применение при формировании пленочных структур в системе многослойной многоуровневой металлизации ИМС.

## 2.4 Формирование диэлектрических слоев из газовой фазы

Диэлектрические слои являются неотъемлемой частью многослойной многоуровневой системы металлизации современных интегральной микросхем. Методы формирования пленочных структур, рассмотренные в разделах 2.1–2.3, предусматривают в основном изготовление металлических слоев. Изготовление диэлектрических слоев в многослойной многоуровневой системе металлизации имеет свою специфику. При формировании диэлектрических слоев системы металлизации должны быть решены следующие проблемы:

- обеспечено заполнение диэлектриком узких зазоров в топологическом рельефе без образования полостей и возникновения избыточных локальных механических напряжений;

- получена локально планаризованная поверхность диэлектрика в областях с близким расположением проводников металлизации, а также обеспечено отсутствие отрицательного угла наклона боковых стенок слоя диэлектрика и «эффекта телесного угла» для диэлектрика, осажденного на одиночных проводниках;

- обеспечена совместимость с процессами глобальной планаризации;

- выбраны для использования такие материалы и методы осаждения слоев диэлектрика, которые позволяют исключить необходимость термообработки для уплотнения осажденного при низкой температуре слоя диэлектрика;

- проведен контроль величины и уровня механических напряжений в формируемых слоях диэлектриков (для обеспечения минимальной деформации подложек и надежности металлизации);

- сформированы достаточно толстые (до 1,5–2,0 мкм) слои диэлектрика без образования трещин и отслаивания, в том числе при термоциклировании (необходимость формирования диэлектрических слоев с повышенной толщиной диктуется необходимостью снижения  $RC$ -составляющей задержки сигнала; кроме того, толстые диэлектрические слои используются в качестве жертвенных вспомогательных, удаляемых при глобальной планаризации топологического рельефа методом химико-механической полировки).

Для выполнения вышеизложенных требований в технологии металлизации ИМС используются диэлектрики на основе кремния, углерода и их комбинации, а также на основе окислов металлов. При формировании структур межслойного, межуровневого и пассивирующего диэлектриков в ИМС используются по отдельности или в сочетании друг с другом различные методы химического осаждения диэлектрических слоев из газовой фазы и процессы химического нанесения растворов – осаждения диэлектрических слоев из жидкой фазы.

**Методы химического осаждения диэлектриков из газовой фазы** включают термоактивируемое осаждение при атмосферном, субатмосферном и пониженном давлении, а также различные варианты плазмохимического (плаз-

моактивированного) осаждения. Химическое осаждение диэлектриков из газовой фазы может выполняться как с непрерывной подачей реагентов, так и в режимах с дискретной подачей реагентов. В последнем случае реализуются процессы атомно-слоевого химического осаждения и импульсного химического осаждения слоев из газовой фазы.

Формирование слоев в процессах химического осаждения из газовой фазы осуществляется в результате многомаршрутных и многостадийных гетерогенных химических реакций на границе раздела газ (пар, газоразрядная плазма) – твердое тело (подложка, пластина).

В механизме процессов химического осаждения из газовой фазы с непрерывной подачей реагентов выделяют следующие основные стадии:

- доставка исходных реагентов в реактор (реакционную камеру установки);
- доставка исходных реагентов в реакторе к граничному слою газовой фазы у поверхности подложки;
- доставка исходных реагентов через граничный слой к реакционной зоне (зоне осаждения) у поверхности подложки;
- превращение исходных реагентов в промежуточные продукты в зоне осаждения;
- доставка исходных реагентов и промежуточных продуктов на поверхность подложки;
- адсорбция реагентов и промежуточных продуктов на поверхность подложки;
- десорбция реагентов и промежуточных продуктов с поверхности подложки;
- реакции с участием адсорбированных реагентов и промежуточных продуктов на поверхности с образованием структурных единиц осаждаемого слоя материала и побочных конечных продуктов в виде газов;
- поверхностная миграция (поверхностная диффузия) структурных единиц осаждаемого слоя материала и побочных конечных продуктов;
- встраивание структурных единиц в поверхностный слой растущего материала на активных центрах поверхности;
- десорбция газообразных конечных побочных продуктов реакции с поверхности;
- отвод конечных побочных продуктов реакции из зоны осаждения через граничный слой в свободный ламинарный поток;
- отвод конечных побочных продуктов реакции из реактора.

Процессы химического осаждения из газовой фазы с дискретной подачей реагентов основаны на дискретных самоостанавливающихся химических реакциях молекул одного периодически подаваемого реагента с адсорбированным на поверхности подложки слоем другого периодически подаваемого реагента. Цикл осаждения включает подачу к поверхности осаждения первого реагента, откачку реактора или продувку его инертным газом, подачу к поверхности осаждения второго реагента и откачку реактора или продувку его инертным га-

зом. Типичные скорости осаждения составляют 0,01–1,0 нм/цикл при длительности цикла от 1 до 60 с.

Одной из проблем процессов химического осаждения диэлектриков из газовой фазы является подавление генерации мелкодисперсных частиц, которая может осуществляться из-за возникновения газофазных реакций в объеме реактора. Для подавления газофазных реакций необходимо: использовать реакторы с «холодной стенкой», уменьшить рабочее давление в реакторе, провести разбавление реагентов инертным газом.

**Химическое осаждение диэлектриков из газовой фазы в тлеющем разряде.** Синтез диэлектрических пленок на основе химических соединений под действием высокочастотного или СВЧ тлеющих разрядов (плазмохимическое осаждение) является одним из наиболее перспективных химико-технологических процессов. Преимущество процессов плазмохимического осаждения прежде всего состоит в том, что они позволяют наносить пленки, не нагревая подложку выше 50–300 °С. Разложение исходной газовой смеси, находящейся при температуре, близкой к комнатной, в разряде происходит под действием электронов с энергией 1–10 эВ и температурой в 10–10<sup>3</sup> раз выше температуры окружающего газа.

Под действием энергетических электронов плазмы происходит диссоциация молекул исходных реагентов с образованием химически активных свободных атомов и радикалов, ионов и электронов. Поверхность подложки подвергается бомбардировке ионами с энергией, определяемой величиной потенциала автосмещения, и электронами, энергия которых контролируется амплитудой ВЧ-напряжения, приложенного к разрядному промежутку. Ионная бомбардировка поверхности подложки проявляется в двух аспектах: создание активных центров адсорбции и распыление материала. Образование пленок происходит в результате сложного взаимодействия возбужденных молекул, ионов, свободных атомов и радикалов с нейтральными молекулами и атомами. Свойства, состав и структура получаемых пленок в значительной степени зависят от многих параметров: давления и состава парогазовых смесей, частоты возбуждения и мощности разряда, температуры подложек, конструкций реакторов, удельной мощности ионного потока на поверхность осаждения, скорости потока исходных реагентов через объем реактора и др.

Достоинство метода плазмохимического осаждения – возможность получения на подложках диэлектрических пленок с различными химическими и электрофизическими свойствами путем использования парогазовых смесей различных составов.

Исходными реагентами для получения диэлектрических кремнийсодержащих пленок являются гидриды кремния, бора, фосфора, тетрафторид кремния, фторуглероды CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, элементоорганические, кремнийорганические и кремнийэлементоорганические соединения, аммиак, азот и его окислы, кислород, водород. Кроме того, используются аргон, гелий и газы для очистки реакционных камер – C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>. В частности, для получения диэлектриков с низким значением диэлектрической проницаемости преимущественно используются

кремнийорганические соединения с кольцевой структурой, такие как тетраметилтетрациклосилоксан, тетраэтилтетрациклосилоксан и другие циклические метилсилоксаны. Однако могут быть применены и другие кремнийорганические соединения, содержащие Si, C, O и H. Эти вещества могут быть выбраны из группы метилсиланов, таких как триметилсилан или тетраметилсилан. Кислородсодержащие газы выбираются из группы, включающей кислород, монооксид углерода, диоксид углерода, пары воды, озон и их смеси.

Исходными реагентами для получения диэлектрических пленок на основе углерода являются метан ( $\text{CH}_4$ ), этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ),  $\text{CF}_4$ ,  $\text{C}_2\text{F}_6$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{CHF}_3$  с аргоном и водородом, углеводороды и фторуглеводороды с кольцевой структурой, такие как бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), дифторбензол ( $\text{C}_6\text{F}_4\text{H}_2$ ), и гексафторбензол ( $\text{C}_6\text{F}_6$ ),  $\text{C}_3\text{F}_6\text{O}$  и др. Пленки углерода и фторированного углерода, осажденные из реагентов с кольцевой структурой, термически более стабильны, чем пленки, осажденные из реагентов с молекулами линейного типа. Температура осаждения этих пленок обычно ниже  $420^\circ\text{C}$ , чтобы предотвратить нежелательную диффузию между металлами (Al, Cu) и пленками. Свойства углеродных пленок, такие как термическая стабильность, внутренние напряжения, диэлектрическая проницаемость, определяются условиями осаждения (тип исходного реагента, ВЧ-смещение, плотность мощности). Введение небольшого количества кремния в углеродные пленки увеличивает их стабильность, адгезию к поверхности осаждения, но одновременно увеличивает диэлектрическую проницаемость.

**Химическое осаждение диэлектриков из газовой фазы в плазме высокой плотности.** Для создания высокоплотной плазмы служат реакторы с ВЧ индукционным и СВЧ разрядными источниками плазмы. Плазма в таких реакторах генерируется в разрядной камере, из которой она диффузно в магнитном поле или без магнитного поля распространяется в реакционную камеру, где на ВЧ-электроде устанавливается обрабатываемая пластина. На электрод подается ВЧ-напряжение от отдельного ВЧ-генератора. При подаче ВЧ-напряжения на поверхности электрода и, следовательно, на поверхности пластины формируется отрицательный потенциал самосмещения, который определяет энергию падающих ионов. Плотность ионного потока определяется ВЧ- или СВЧ-мощностью, вкладываемой в плазму, а энергия ионов – ВЧ-мощностью, подаваемой на электрод. Процессы химического осаждения диэлектриков из газовой фазы в плазме высокой плотности обычно выполняются при давлениях парогазовых смесей 0,5–50 мторр, при мощности для создания плазмы 100–5000 Вт. Напряжение автосмещения находится на уровне 10–100 В. Плотность плазмы в реакторах составляет  $10^{11}$ – $10^{13}$   $\text{см}^{-3}$ .

Профиль пленки, осажденной методом химического осаждения диэлектриков из газовой фазы в плазме высокой плотности, является результатом следующих одновременно протекающих процессов:

- доставки на поверхность осаждения нейтральных (химически активных) частиц, активируемых ионной бомбардировкой положительными ионами поверхностных химических реакций синтеза материала;

- распыления осаждаемого материала ионами (аргона, кислорода и т. д.);
- переосаждения распыленного материала на противоположные стенки топологического рельефа обрабатываемой структуры.

При использовании высокоплотной плазмы в режиме заполнения узких зазоров плотность мощности ионного потока на подложку достигает значения  $4 \text{ Вт/см}^2$ . При такой высокой плотности мощности происходит быстрый разогрев подложки до температур более  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для предотвращения деградации нижележащих структур (диэлектриков с низкой диэлектрической постоянной), а также взаимодействия алюминиевой металлизации с кремнийсодержащими осаждаемыми слоями необходим эффективный теплоотвод. Такой теплоотвод осуществляется с использованием электростатического прижима подложки к держателю и ввода гелия между подложкой и держателем. Введение электростатического прижима в конструкции реакторов позволяет поддерживать температуру подложки, не превышающую  $400\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При осаждении диэлектрических слоев в плазме высокой плотности скорость процесса «чистого» осаждения определяется, главным образом, концентрацией химически активных частиц в области плазменного разряда (т. е. в конечном итоге величиной ВЧ- либо СВЧ-мощности, вводимой в реакционную камеру для возбуждения и поддержания плазменного разряда), а скорость процесса «обратного» распыления поверхности растущего слоя – плотностью потока падающих на подложку ионов (главным образом, ионов инертных газов, таких как  $\text{Ar}^+$ ) и величиной их кинетической энергии, которая, в свою очередь, определяется величиной потенциала смещения.

Следует отметить, что ни одна из альтернативных разновидностей процесса низкотемпературного плазмохимического осаждения диэлектрических слоев не в состоянии обеспечить необходимое качество заполнения осаждаемым материалом малоразмерных зазоров между элементами топологического рельефа. К числу дополнительных преимуществ процесса осаждения диэлектрических слоев в плазме высокой плотности необходимо отнести высокое качество осаждаемого материала (с точки зрения его стехиометрии, плотности пор, содержания посторонних примесей – водорода, гидроксильных групп, атомов металлов, зарядовых характеристик и т. п.) и превосходящее качество слоев, получаемых при использовании других разновидностей процесса плазмохимического осаждения.

Метод осаждения в плазме высокой плотности обеспечивает получение различных типов диэлектрических слоев:  $\text{SiO}_2$ , фосфоросиликатное стекло (ФС), борофосфоросиликатное стекло (БФС),  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ , BN, кремний-боронитридные, кремнийборооксинитридные диэлектрики с низким значением диэлектрической постоянной  $k$ . Метод осаждения диэлектриков в плазме высокой плотности в наибольшей степени удовлетворяет требованиям технологии многослойной многоуровневой металлизации ИМС.

## 2.5 Технология плазменного травления

Повышение уровня интеграции элементов и постоянное совершенствование системы металлизации ИМС стимулирует увеличение разрешающей способности процессов травления слоев с использованием низкотемпературной плазмы. В частности, при производстве схем сверхвысокой степени интеграции к процессам травления предъявляются беспрецедентные требования по однородности. Помимо этого, при массовом производстве необходимо достигнуть высоких скоростей процессов травления и одновременно повысить избирательность их воздействия. Характерным требованием для формирования элементов схем плазменными методами при топологических нормах менее 0,13 мкм является достижение высокой анизотропии травления при одновременном незначительном воздействии на нижележащий слой.

**Особенности процесса плазменного травления.** Под процессом травления понимают удаление поверхностных атомов или молекул материала в низкотемпературной газовой плазме. В неизотермической плазме низкого давления происходят возбуждение и ионизация молекул рабочего газа, а также диссоциация молекул на свободные атомы и радикалы. Любая из этих частиц – возбужденная молекула, ион, свободный атом или радикал – может выполнять роль химически активной частицей, участвующей в реакции. Поскольку энергия электронов значительно превышает энергию тяжелых частиц, скорости процессов диссоциации и ионизации, имеющих большие пороговые энергии, определяются главным образом электронным ударом.

В общем случае механизм плазменного травления можно представить следующим образом:

- доставка молекул газа в зону разряда;
- превращение молекул газа в ионы и химически активные частицы под воздействием электронного удара;
- доставка ионов и химически активных частиц к поверхности материала, подвергаемого травлению;
- адсорбция ионов и химически активных частиц на поверхности материала;
- химические реакции химически активных частиц и физическое взаимодействие ионов с поверхностными атомами и молекулами;
- десорбция продуктов реакции с поверхности материала;
- отвод продуктов реакции из реактора.

По физико-химическому механизму взаимодействия частиц низкотемпературной газовой плазмы с поверхностью обрабатываемого материала процессы травления можно разделить на три группы:

1) ионное травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются только в результате физического распыления; распыление осуществля-

ется энергетическими ионами газов, химически не реагирующими с обрабатываемым материалом (обычно ионами инертных газов);

2) плазмохимическое травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате химических реакций; химические реакции происходят между химически активными частицами и поверхностными атомами с образованием летучих продуктов;

3) реактивно-ионное травление, при котором поверхностные слои материалов удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химических реакций между химически активными частицами и атомами материалов.

Поскольку большинство плазменных процессов травления различных функциональных слоев ИМС происходит с участием химически активных частиц, то к рабочим газам, используемым в процессах травления, предъявляются особые требования. Необходимость травления широкого спектра материалов вызвала появление большого числа рабочих газов, как однокомпонентных, так и многокомпонентных. В основном для плазменного травления материалов используются галогеносодержащие соединения, а также их смеси с кислородом, водородом и инертными газами.

**Основные технологические параметры плазменного травления.** При формировании различных элементов в системе металлизации ИМС к процессам плазменного травления предъявляются высокие требования по обеспечению следующих значений технологических параметров процесса:

- селективности (избирательности) травления функциональных слоев по отношению к маскирующему покрытию и нижележащим слоям;
- анизотропии травления;
- равномерности травления;
- скорости травления.

В общем случае селективность травления одного материала относительно другого характеризуется отношением скоростей травления этих материалов при одинаковых условиях. Для переноса изображения нужно, чтобы материал функционального слоя травился быстрее маскирующего покрытия. В этом случае селективность травления рассчитывается исходя из равномерности скоростей травления слоя и маски. Селективность травления функционального слоя к подслою необходима для предотвращения нежелательного удаления ранее сформированных пленок на подложке. Селективность существенно зависит от состава рабочего газа, давления, плотности мощности разряда, расхода газа, а также характера протекающей гетерогенной реакции (химической или ионно-стимулированной).

Под анизотропией понимают преимущественное удаление материала функционального слоя в направлении, перпендикулярном его поверхности. Анизотропия, как и селективность, существенно зависит от состава рабочего газа, давления, плотности мощности разряда, а также характера протекающей гетерогенной реакции.

Равномерность процессов плазменного травления в общем случае зависит от распределения по поверхности обрабатываемого материала, с одной стороны, нейтральных химически активных частиц, вступающих в химические реакции, с другой стороны – ионов, электронов и фотонов, производящих физическое распыление и стимулирующих химические реакции. Неравномерность травления материала вызвана главным образом неоднородностью плазмы вследствие резкого изменения потенциала на краю пластин. В связи с этим важное значение для достижения равномерности плазменного травления имеет распределение газового потока и давление, а также конструктивные особенности электродов, экранов и используемые материалы данных конструкций.

Скорость травления зависит от конструктивных особенностей плазмохимических реакторов и плотности ионного потока. Характерным требованием для формирования элементов ИМС является достижение значительных скоростей травления (порядка 0,5 мкм/мин).

**Плазменное травление функциональных слоев** при формировании многослойной многоуровневой металлизации. Наиболее характерные функциональные слои для плазменного травления: диэлектрики с высоким аспектным соотношением и вертикальным профилем, комплексные пленки поликристаллического кремния и силицидов тугоплавких металлов, пленки алюминия и его сплавов.

*Диэлектрики с высоким аспектным соотношением и вертикальным профилем.* При формировании многоуровневой металлизации ИМС наблюдается увеличение применений диэлектрических элементов микроструктур с большим аспектным соотношением и вертикальным профилем. Одним из наиболее перспективных типов применений является формирование маскирующего слоя («твердой» маски), используемого для травления канавок с дальнейшим заполнением металлом. В этом случае резист наносится поверх «пирога»  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ , который используется в качестве «твердой маски» для травления глубоких канавок в кремнии. Толщина окисла задается исходя из его скорости травления при травлении канавки. Поскольку главной задачей является минимизация литографических размеров, то аспектное соотношение в этом случае может достигать более чем 6:1.

Основная задача, стоящая на этом уровне, – реализация литографии в глубоком ультрафиолетовом диапазоне по субнанометровым топологическим нормам. При работе на больших топологических нормах (более 0,13 мкм) структуры могут травиться с большими процессными допусками, поскольку используются более толстые слои фоторезиста. Проблемы появляются при работе на малых топологических нормах, когда толщина фоторезиста снижается, а его чувствительность к процессам плазменного травления увеличивается. При топологической норме 0,13 мкм толщина фоторезиста менее 0,4 мкм. Это приводит к образованию на фоторезисте фасок, которые могут передаваться на изображение маски. Кроме того, при определенных условиях изменение морфологии фоторезиста может вызвать маскирование подложки, ведущее к появлению проблем надежности. Следовательно, процесс травления должен быть

разработан так, чтобы избежать изменений характеристик фоторезиста при одновременном обеспечении достаточной энергии процесса, необходимой для образования летучих продуктов травления окисла кремния. Одновременно необходимо обеспечить точное воспроизведение топологических размеров.

Повышение селективности к резисту может быть достигнуто использованием более селективных газовых смесей (например, смесей, основанных на  $C_4F_8$ ). Эти газовые смеси, часто используемые при травлении контактов, могут привести к большему риску остановки травления из-за дополнительного осаждения полимера. Газы, удаляющие полимеры, такие, например, как кислород, могут добавляться в смесь для управляемости скоростью осаждения полимера на подложку. Однако слишком большая добавка кислорода приводит к эрозии фоторезиста. Аналогично увеличение мощности или понижение давления может увеличить поток ионов на подложку, что позволяет избежать прекращения травления. Однако данный прием также может привести к увеличению повреждений в фоторезисте. Борьба с остановкой травления и образованием микротрещин при использовании реакторов с емкостной связью очень затруднительна. Это происходит потому, что ионный поток, энергия ионов и химия плазмы связаны так, что трудно одновременно добиться высокой скорости, низкого уровня повреждений на фоторезисте, высокой однородности травления и хорошего воспроизведения критических размеров. В связи с этим целесообразно использовать реакторы высокоплотной плазмы, которые обеспечивают большую гибкость в таких сложных процессах, как формирование «твердой» маски. Процессы плазменного травления окисла в реакторах высокоплотной плазмы могут обеспечивать большую стойкость фоторезиста. Благодаря высокой плотности плазмы в таких реакторах значительно большее количество полимера осаждается на пластину при более высоких значениях температуры.

*Плазменное травление диоксида кремния и нитрида кремния.* Благодаря большой энергии связи при травлении окисла кремния требуются системы, основанные на фторсодержащих газовых смесях и сильной ионной бомбардировке обрабатываемой поверхности. Вертикальные профили травления достигаются благодаря пассивации боковых стенок за счет введения в плазму углеродсодержащих компонентов. Сильная ионная бомбардировка необходима для удаления полимера с горизонтальных поверхностей, а также для внедрения активных частиц внутрь поверхности окисла для последующего образования летучего  $SiF_x$ . При травлении диэлектриков необходимо оптимизировать соотношение скоростей процессов полимеризации и реактивно-ионного травления, чтобы одновременно обеспечить как вертикальный профиль травления, так и остановку процесса травления на нижележащем слое. В то время как размер окон твердой маски приближается к 0,18 мкм и менее, аспектное соотношение возрастает до 6:1 и более. Поток радикалов и ионов на нижнюю поверхность этих структур уменьшается из-за столкновений с боковыми стенками структуры и другими частицами. Продукты травления ( $Si_xF_yO_z$  и  $C_xF_y$ ) не могут свободно диффундировать из таких структур, что приводит к интенсивной поли-

меризации в области дна структуры, а это в свою очередь создает конический профиль травления и плохую передачу размеров маски. Другим аспектом данной проблемы является задержка реактивно-ионного травления, которая, как описано ранее, вызывается зависимостью глубины травления от размеров структуры.

При плазменном травлении контактных (переходных) окон в диоксиде кремния необходимо не только точно воспроизвести размеры окна, но и остановиться на поверхности нижележащего слоя, например, нитрида кремния, который действует как стоп-слой, изолирующий нижележащие проводники, или поликремния. В противном случае могут либо не до конца вскрыться контактные окна в диэлектрике, либо протравиться нижележащие проводники. Как в одном, так и в другом случае схема становится неработоспособной. Поэтому при проведении данной операции селективность к нижележащему материалу играет первостепенную роль и процесс травления (газовые смеси, тип реактора и т. д.) выбирается так, чтобы обеспечить достаточную полимеризацию для защиты нижележащих слоев.

Традиционные комбинации газов для травления диэлектриков (например  $\text{CHF}_3/\text{CF}_4$ ) использовались для обеспечения селективности травления окисла по отношению к нижележащему кремнию. В производстве современных устройств микро- и нанoeлектроники специализированные газовые составы, требуемые для остановки травления окисла на нитриде или нитрида на окисле, стали играть все более важную роль. В целом селективность может быть достигнута путем использования газовой смеси, образующей полимер на нижележащем слое или не образующей с нижележащим слоем летучих соединений. Процесс, основанный на осаждении полимера, должен быть тщательно настроен, чтобы избежать нежелательных воздействий в области точки окончания травления, где скорость осаждения полимера превышает скорость его удаления.

Селективность к нитриду кремния и особенно к нитриду, лежащему на рельефе, является ключевой проблемой при выборе подходящих газовых смесей и систем для травления окисла. При травлении окисла используются газовые смеси, основанные на фторуглеродах и обеспечивающие селективное осаждение защитного полимерного слоя.

*Плазменное травление алюминия и его сплавов.* Для формирования алюминиевой металлизации ИМС в основном используется метод реактивного ионно-плазменного травления. Как рассматривалось ранее, в основе этого процесса лежат гетерогенные химические реакции между химически активными частицами, генерируемыми электронными ударами в плазме разряда из молекул рабочего газа, и поверхностными атомами материала с образованием летучих при температуре и давлении процесса продуктов. Эти реакции стимулируются излучением плазмы, электронной и ионной бомбардировками. В связи с тем, что стимулирующее действие иона много больше, чем электрона и кванта излучения, обычно рассматривается только влияние ионной бомбардировки.

При массовом производстве технологические характеристики процесса реактивного ионно-плазменного травления определяют производительность операции травления, точность передачи технологического рисунка с маскирующего покрытия на функциональный слой, уровни загрязнения обрабатываемой поверхности и радиационного повреждения обрабатываемой структуры.

К процессу травления алюминия и его сплавов сформулированы следующие требования, удовлетворение которых необходимо для формирования элементов ИМС:

- показатель анизотропии  $>20$ ;
- селективность к фоторезистивной маске  $>5,0$ ;
- селективность к подслою  $>5,0$ ;
- температура поверхности пластины,  $K <398$ ;
- неравномерность скорости травления по пластине  $\leq 5,0$ ;
- неравномерность критического размера по пластине  $\leq 5,0$ ;
- плотность привносимой дефектности при размере дефекта больше  $0,2 \text{ мкм} \leq 0,1 \text{ дефект/см}^3$ ;
- скорость травления  $\geq 1000 \text{ нм/мин}$ .

Процесс травления алюминия и его сплавов проводят в хлорсодержащей плазме, и он отличается от процессов травления других материалов. Алюминий – химически активный металл и инертность, наблюдаемая на практике, связана с присутствием на его поверхности тонкого (менее 10 нм) слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Окись алюминия химически инертна и травится только в результате физического распыления, ионно-возбуждаемых химических реакций или воздействия высокой температуры (более 1473 К). Скорость и равномерность образования пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхности алюминия и скорость ее травления в хлорсодержащей плазме сильно зависят от способа и режима нанесения алюминиевой пленки (содержания кислорода в пленке, размера зерна), времени хранения пластин между операциями нанесения и травления, а также парциального давления кислорода  $P(\text{O}_2)$  и паров воды  $P(\text{H}_2\text{O})$  в реакционной камере. При повышении  $P(\text{O}_2)$  с  $10^{-4}$  до  $6 \cdot 10^{-4}$  Па скорость распыления алюминия ионами аргона падает в 11 раз. Окись алюминия перестает травиться в плазме четыреххлористого углерода при  $P(\text{H}_2\text{O}) > 0,5$  Па. Невоспроизводимость травления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  будет с большим увеличением передаваться на травление слоя алюминия, так как селективность травления ( $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) для большинства рабочих газов лежит в диапазоне от 10 до 100. Кроме того, эта невозможность может усилиться за счет разбросов свойств пленок алюминия в процессах их нанесения и хранения пластин.

Указанные проблемы травления еще больше осложняются для алюминиевых сплавов. Так, при травлении сплавов  $\text{Al-Si}$  в хлорсодержащей плазме кремний травится с меньшей скоростью, чем алюминий, и поэтому накапливается по границам зерен. В результате после травления алюминия на поверхности подслоя остаются островки поликремния и для их удаления нужен перетрав (30–50 %) в хлорсодержащей среде или кратковременная обработка во

фторсодержащей плазмах. В первом случае уменьшается селективность травления сплава к фоторезистивной маске, а во втором – воспроизводимость процесса травления за счет смены газа.

При травлении сплавов Al–Si–Cu и Al–Cu в хлорсодержащей плазме медь, входящая в состав сплава, не образует летучих хлоридов и может удаляться только в результате интенсивного физического распыления. Поэтому алюминиевые сплавы, содержащие медь, не могут обрабатываться плазменным травлением в планарных реакторах, а требуют обязательного применения систем с реактивным ионно-плазменным или реактивным ионно-лучевым травлением. Присутствие меди также усугубляет проблему коррозии алюминиевой металлизации после травления.

Необходимым условием для осуществления травления материала с использованием химически активных частиц является образование «летучих» и стабильных при температуре поверхности материала в процессе травления (температуре процесса) продуктов реакции. Термин «летучие» означает, что при температуре процесса давление паров образующихся продуктов реакции должно быть достаточно высоким, чтобы эти продукты испарялись с поверхности материала. Алюминий в диапазоне температур от 313 до 423 К образует следующие «летучие» соединения:  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{AlBr}_3$ ,  $\text{AlI}_3$ ,  $\text{AlH}_3$ ,  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ . То есть для травления алюминия могут быть использованы хлор-, бром-, иод-, водород- и метансодержащая плазмы. Однако присутствие на поверхности алюминия пленки окисла ограничивает применение водородсодержащей плазмы, так как коэффициент физического распыления ионов водорода очень низок и не позволяет эффективно удалять слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Взрывоопасность метана и низкая химическая стойкость элементов газовой арматуры и насосных масел к соединениям брома и йода привели к тому, что в настоящее время для травления алюминия и его сплавов в производственных условиях используются только хлорсодержащие соединения, основными из которых являются:

- четыреххлористый углерод  $\text{CCl}_4$  и его смеси с инертными газами He, Ar, Xe, азотом, хлором, метаном и аммиаком;
- треххлористый бор  $\text{BCl}_3$  и его смеси с  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{Cl}_2$ , четырехфтористым углеродом  $\text{CF}_4$ , треххлористым фосфором  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{O}_2$  и трихлорметаном  $\text{CHCl}_3$ ;
- четыреххлористый кремний  $\text{SiCl}_4$  и его смеси с инертными газами,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{O}_2$ ;
- смесь хлора и водорода.

При рассмотрении многослойной металлизации ИМС методы формирования металлических и диэлектрических пленок обычно классифицируют как методы PVD (физическое осаждение из газовой фазы) и методы CVD (химическое осаждение из газовой фазы).

## 3 МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИМС

### 3.1 Многослойная многоуровневая металлизация на основе алюминия

Как было рассмотрено в подразделе 1.2, основным недостатком однослойной металлизации на основе пленок алюминия является контактная система Al–Si. Решением данной проблемы стало применение многослойных систем.

Слои многослойной системы металлизации можно классифицировать на основные, которые определяют теплоэлектрическое функционирование ИМС в процессе эксплуатации, и вспомогательные технологические, которые необходимы на этапе формирования системы металлизации. К основным слоям относятся контактный, диффузионно-барьерный, один или несколько уровней алюминиевых межсоединений, другими словами, проводящих слоев, разделенных межуровневым диэлектриком. Характеристика основных слоев представлена в подразделе 1.1. К вспомогательным технологическим слоям можно отнести: адгезионный, раскисляющий, антиотражающий, стоп-слой, смачивающий и слой межуровневого диэлектрика. В технологическом процессе некоторые виды вспомогательных слоев могут расходоваться или удаляться.

*Адгезионный слой* обеспечивает высокую адгезию, т. е. сцепление металлических слоев с диэлектрическими поверхностями ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , фосфорно-силикатное стекло, полиимид и др.) и другими контактирующими элементами системы металлизации ИМС. В качестве материала адгезионного слоя используются металлы с высоким сродством к кислороду или высокой теплотой образования оксидов ( $\Delta H_f \leq -150$  ккал/моль). Известными для этих целей металлами являются титан, ванадий, хром. Наличие адгезионного слоя необходимо, когда используются слои благородных металлов (Pt, Pd, Ir и др.), которые не склонны к образованию оксидов. При этом один адгезионный слой нужен для обеспечения его адгезии к диэлектрическому материалу, и в этом случае он остается составной частью системы металлизации при эксплуатации ИМС. Другой адгезионный слой должен быть над слоем благородного металла для обеспечения высокой адгезии фоторезиста к благородному металлу на этапе фотолитографического формирования топологического рисунка, и в этом случае адгезионный слой может удаляться после проведения данной операции.

*Раскисляющий слой* – это тонкий слой химически активного по отношению к кислороду металла (Ti, Zr, Hf, Ta, Mo), в задачу которого входит очистка поверхности полупроводника от кислорода и других примесей, что обеспечивает, например, получение качественных контактных слоев силицидов с гладкой межфазной границей силицид – кремний при взаимодействии силицидообразующего металла и кремния. В процессе указанного взаимодействия раскисляю-

ший слой расходуется и продукты его впоследствии химически удаляются вместе с остатками непрореагировавшего силицидообразующего металла.

*Антиотражающий слой* – слой с низким коэффициентом отражения, что необходимо на операции фотолитографии при совмещении рисунка фотошаблона с ранее созданным на подложке топологическим рисунком ИМС. Антиотражающий слой может удаляться после проведения этой операции.

*Стоп-слой* – тонкий слой, который необходим для остановки процесса сухого травления. Например, этот слой нужен при одновременном вскрытии контактных колодцев к областям затвора и стока/истока МДП-транзисторов, чтобы предотвратить травление затвора, поскольку толщина изолирующего слоя, в котором вскрываются окна, над затвором существенно меньше, чем над областями стока/истока, а селективность процесса сухого травления недостаточна.

*Смачивающий слой* – тонкий слой, который способствует беспустотному, однородному заполнению проводящим материалом канавок (траншей) и контактных окон (колодцев) в межуровневом диэлектрике и повышает термическую стабильность, электромиграционную стойкость проводящего слоя.

*Слой межуровневого диэлектрика* – слой, который расположен между проводящими слоями и назначение которого состоит в электрической изоляции двух соседних уровней межсоединений. Основное требование к материалу этого слоя – низкое значение диэлектрической проницаемости, чтобы иметь небольшую величину задержки сигнала  $RC$ -цепью.

**Использование силицидов металлов.** Проблемы создания контактов и межсоединений к сверхтонким структурам ИМС можно решать не только с помощью металлических пленок. Наряду с алюминием и тугоплавкими металлами (Mo, W) широко используются силициды тугоплавких металлов  $TiSi_2$ ,  $TaSi_2$ ,  $WSi_2$ ,  $MoSi_2$ , а также их сочетания с легированным поликристаллическим кремнием. Особенно целесообразно применение  $TiSi_2$ , обладающего наименьшим удельным сопротивлением. Силициды металлов могут быть получены либо при осаждении металла на кремний с последующим отжигом, либо при одновременном распылении (сораспылении) кремния и тугоплавкого металла, например, с использованием магнетронного распыления.

При напылении металла и последующем его вжигании в кремний образующиеся силициды могут иметь три модификации:  $Me_2Si$  с температурой образования примерно  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $MeSi$  (моносилицид) с температурой образования  $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$  и  $MeSi_2$  (дисицид) с наибольшей (более  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) температурой образования. Не все силициды металлов имеют все три модификации, например, Pd, Pt образуют два первых соединения, а Ti и Ta – только два последних. Две первые модификации силицидов металлов растут по параболическому закону: квадрат толщины пленки, умноженный на 2, пропорционален времени вжигания  $t$ . В этом случае атомы металла диффундируют в кремний по междоузлиям,

что приводит к ослаблению ковалентной связи в полупроводнике в случае большой концентрации металлических атомов. Ослабление ковалентных связей можно рассматривать как переход к связям, подобным металлическим.

Одновременно идет и диффузия кремния в металл, но она гораздо слабее. При малой растворимости тугоплавких металлов в кремнии для образования растворов замещения необходимо создать большую концентрацию вакансий в кремнии. Поскольку энергия образования вакансии достаточно велика, то при низких температурах (менее 400–500 °С) это маловероятно. При более высокой температуре (выше 600 С°) отрыв атома кремния может происходить на его поверхности на границе с металлом в энергетически слабых точках, например, на ступеньках, за счет увеличения энергии атомов под влиянием тепловых колебаний.

Рост силицида ограничивается поступлением атомов кремния, скоростью разрыва связей Si–Si, т. е. реакцией с металлом на границе раздела. Поэтому рост силицида идет по линейному закону и в диффузионном потоке преобладают атомы кремния. Рост силицидов на поликристаллическом кремнии происходит аналогично росту на монокристалле. В присутствии кислорода или паров воды скорость роста силицида уменьшается. Многие тугоплавкие металлы образуют как силициды, так и окислы (Ti, Ta, V). При нанесении металла на окисел кремния проявляются сильные адгезионные связи, которые, взаимодействуя с окислом кремния, улучшают адгезию Me–SiO<sub>2</sub>. При высокой температуре в результате этого взаимодействия образуются силициды металла. Силициды, полученные напылением, имеют более регулярный состав, однако их удельное сопротивление может быть выше, чем у полученных вжиганием в кремний. Возможно, это связано с большим размером кристаллитов у последнего и, следовательно, с большей подвижностью носителей заряда.

Применение силицидов металлов в качестве материалов омических контактов к тонким (менее 0,1 мкм) слоям кремния – одно из важных направлений технологии ИМС. Особенно перспективно использование для этих целей TiSi<sub>2</sub>. Помимо наименьшего удельного сопротивления силицид титана при взаимодействии с кислородом и окислом кремния образует окисел титана TiO<sub>2</sub>, который является полупроводником с шириной запрещенной зоны около 2 эВ. Таким образом, окисел титана не препятствует протеканию тока в контакте и незначительно увеличивает его сопротивление.

Примером применения силицида металла в системе межсоединений ИМС стала двухслойная структура, в которой в качестве контактного слоя к полупроводнику стал использоваться силицид переходного металла, а токоведущие межсоединения были алюминиевыми. Однако достаточно быстро выяснилось, что термическая стабильность такой структуры недостаточна и ограничивается 500 °С. Причиной этого является реакция между алюминием и силицидом, которая приводит к образованию интерметаллидов алюминия с металлом силици-

да и свободного кремния, выпадающего в виде второй фазы в алюминии. Кроме того, также наблюдается проникновение алюминия в кремниевую подложку. Использование алюминия, легированного кремнием, вместо чистого алюминия не замедляло существенно взаимодействие алюминий – кремний. После этого в составе системы металлизации появился тонкий диффузионно-барьерный слой, и достаточно длительное время система металлизации имела структуру, которая показана на рисунке 15.

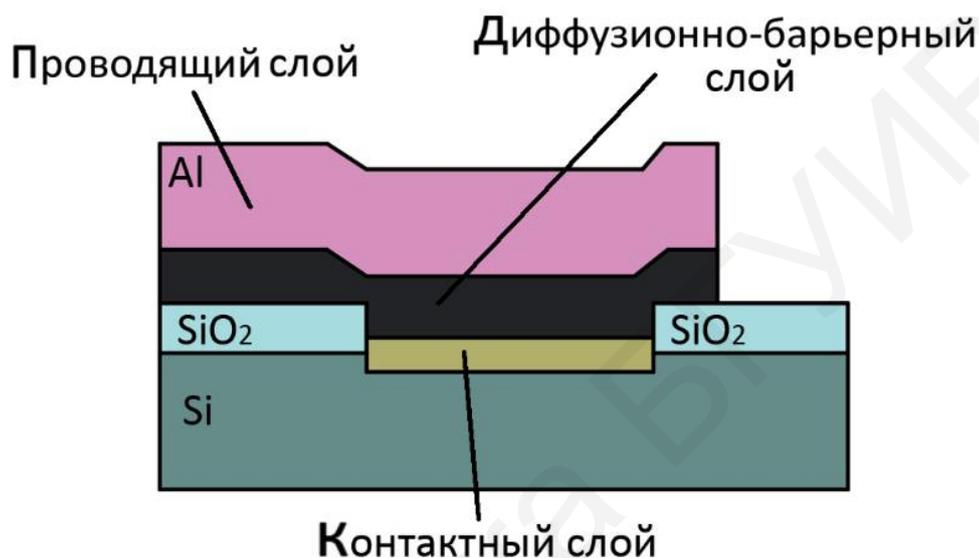


Рисунок 15 – Структура многослойной металлизации с проводящим слоем на основе алюминия

Переход размеров элементов в субмикронную область привел к появлению двух проблем. Первая – это невозможность осуществить токоведущую разводку в рамках одного слоя, что повлекло создание многоуровневой системы межсоединений и, как следствие, возникновение дополнительных проблем, связанных с осуществлением фотолитографии. Вторая проблема была обусловлена изменением размеров контактного окна. Результатом такого изменения стало превращение контактного окна в колодец, который необходимо полностью заполнить проводящим материалом, формируя, по существу, вертикальный проводник. Выяснилось, что ставшие уже традиционными для микроэлектроники методы физического осаждения из газовой фазы (PVD), и в частности метод магнетронного распыления, оказались непригодными для заполнения таких контактных окон. Из-за узости и большой глубины скорость осаждения на стенках и дне окон оказывается ниже, чем на поверхности диэлектрика, и заполнение происходит с возникновением пустот, как это показано на рисунке 16. Таким образом, уменьшение размеров элементов достаточно существенно усложнило как саму систему металлизации, так и технологию ее формирования.

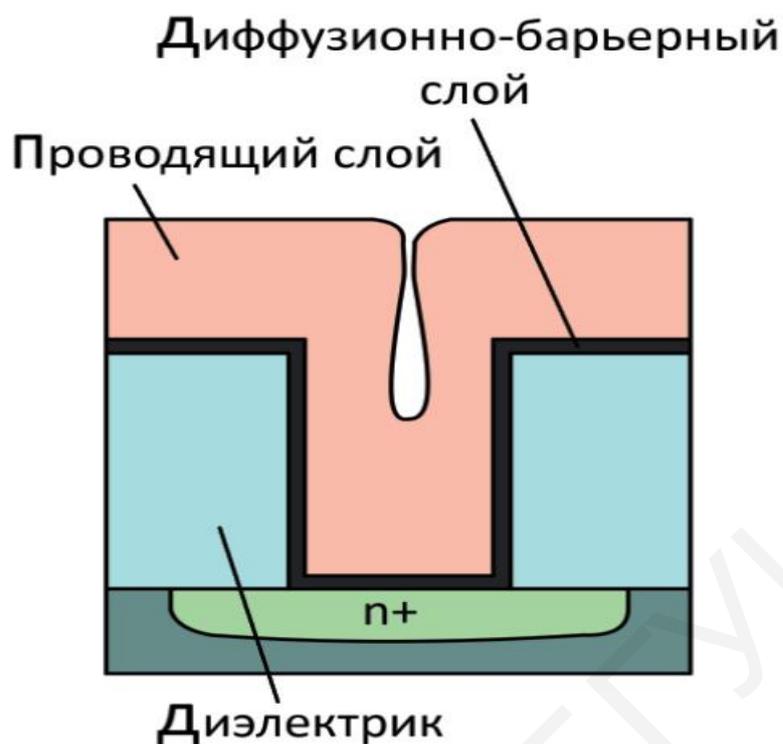


Рисунок 16 – Образование пустот при формировании проводящего слоя методом физического осаждения из газовой фазы

Примерную последовательность и некоторые особенности технологии формирования многоуровневой многослойной системы металлизации с алюминиевыми межсоединениями демонстрирует рисунок 17.

Первыми на подложке с уже изготовленными полупроводниковыми приборами селективно формируются контактный слой силицида и полицидный затвор по самосовмещенной технологии (рисунок 17, а, б). Поскольку существует большой перепад высоты между полицидным затвором и областями контактов стока/истока, далее осаждается толстый межслойный диэлектрик (рисунок 17, в), и методом химико-механической полировки проводится глобальная планаризация рельефа, что необходимо для последующего успешного осуществления литографического процесса и вскрытия контактных колодцев к силицидному и полицидному слоям стока, истока и затвора. После этого методом PVD конформно осаждается тонкий диффузионно-барьерный слой (рисунок 17, г).

Далее необходимо заполнить контактные колодцы металлом, лучше всего алюминием. Однако применение алюминия для этой цели оказалось проблемным из-за трудности беспустотного заполнения. Традиционно алюминий всегда осаждался методами PVD, и в частности магнетронным распылением. Как уже отмечалось ранее, эти методы не позволяют избежать возникновения пустот. Для заполнения контактных колодцев был использован вольфрам, который осаждается поверх диффузионно-барьерного слоя методом химического осаждения.

ждения из газовой фазы (CVD) (рисунок 17, д). Особенностью метода CVD является возможность беспустотного заполнения узких глубоких полостей.

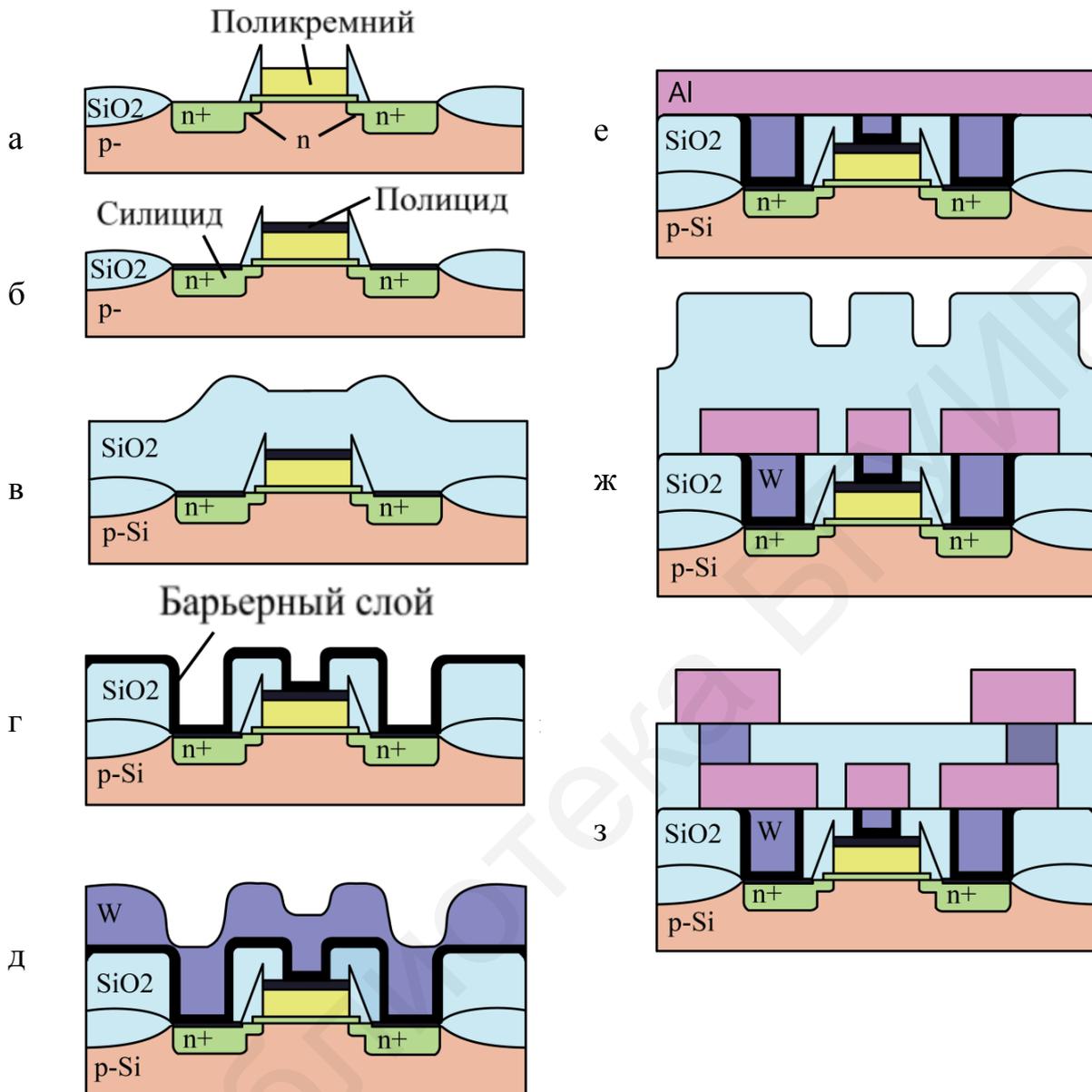


Рисунок 17 – Схема формирования многоуровневой многослойной системы металлизации с межсоединениями на основе алюминия

После осаждения слоя вольфрама проводится глобальная планаризация рельефа, в процессе которой не только обеспечивается плоская поверхность, но и удаляются с нее участки диффузионно-барьерного слоя, оставляя электрически изолированные друг от друга вольфрамовые пробки, окруженные тонким диффузионно-барьерным слоем. На эту структуру наносится проводящий слой, основу которого составляет алюминий (рисунок 17, е). Важно отметить, что межсоединения на основе алюминия (рисунок 17, ж) формируются путем пря-

мой фотолитографии по осажденному проводящему слою и последующего сухого травления проводящего слоя в хлорсодержащей плазме. Таким образом, формируется первый уровень межсоединений. Следующим этапом является формирование второго уровня межсоединений, для чего последовательно осуществляются нанесение слоя межуровневого диэлектрика (рисунок 17, ж), планаризация рельефа, фотолитография и вскрытие контактных окон в слое диэлектрика к первому уровню межсоединений, нанесение слоя вольфрама и формирование вольфрамовой пробки путем планаризации рельефа, нанесение второго проводящего слоя, фотолитография и сухое травление проводящего слоя (рисунок 17, з). Последующие уровни межсоединений формируются аналогичным образом.

Многослойная многоуровневая система металлизации с межсоединениями на основе алюминия применялась в субмикронных технологиях кремниевых ИМС до 0,13 мкм технологии, начиная с которой в качестве межсоединений стала использоваться медь. Были две основные причины, вызвавшие необходимость этой замены. Обе эти причины были обусловлены уменьшением технологических размеров. Первая – это обострение до предела проблемы надежности системы металлизации и в рамках ее, прежде всего, проблемы электромиграции в алюминиевых межсоединениях из-за роста плотностей тока с уменьшением сечения проводников. Вторая – это проблема увеличения длины межсоединений при уменьшении их сечения и, как следствие, проблема роста сопротивления проводников, вызывающего увеличение показателя паразитной  $RC$ -задержки сигнала. Более того, вторая проблема усугубляется первой, поскольку традиционный способ борьбы с электромиграцией – примесные добавки (кремния, титана, меди и др.) в алюминий в пределах твердого раствора, что всегда повышает удельное сопротивление материала, следовательно, дополнительно увеличивает  $RC$ -задержку. В этом случае наиболее перспективным альтернативным решением является использование меди в качестве материала межсоединений ИМС.

### **3.2 Металлизация с медными межсоединениями**

Медь – ключевой материал в следующем поколении металлизации ИМС. Основным преимуществом меди по сравнению с алюминием является более низкое электрическое сопротивление, стойкость к электромиграции, увеличение скорости переключения элементов ИМС. С уменьшением элементов ИМС до субмикронных размеров скорость переключения становится все более и более ограниченной задержкой времени  $RC$ -межсоединений. В этом смысле медь является материалом с большими возможностями для многоуровневой металлизации ИМС, так как та же самая скорость может быть сохранена при использовании медной линии более узкой или тонкой, чем алюминиевая.

Медная металлизация уже признана ведущими фирмами, производящими ИМС, как процесс, способный обеспечить изготовление ИМС с многоуровневой системой межсоединений с шириной линии менее 0,13 мкм. Однако существует ряд проблем широкого применения медной металлизации.

Одним из препятствий для использования меди в линиях межсоединений ИМС является процесс формирования топологического рисунка. При комнатной температуре медь не образует летучих соединений с плазмой на основе Cl и F. Таким образом, сухое плазменное травление медных пленок затруднено. А химическое травление меди может сопровождаться ее коррозией, так как отсутствие самопассивации делает тонкие медные пленки склонными к окислению во время обработки.

Другая проблема состоит в том, что медь является хорошим диффузантом в Si и SiO<sub>2</sub> и легко реагирует с силицидами. Медь быстро диффундирует в кремний и может формировать центры с высокоэнергетическими уровнями в запрещенной зоне кремния. Эти высокоэнергетические уровни обеспечивают механизм избыточных неосновных носителей, рекомбинирующих с основными носителями. Следовательно, медь будет вызывать генерационно-рекомбинационные токи утечки в *p-n*-переходах и подвергать опасности надежность МОП-транзисторов.

Это препятствие может быть преодолено путем использования диффузионных барьеров и пассивирующих слоев при создании медной металлизации. Для выполнения данной задачи наиболее подходящими материалами являются тугоплавкие металлы и твердые растворы на их основе. Это связано с тем, что температура плавления данной группы металлов превосходит температуру плавления меди, и тугоплавкие металлы обычно неспособны образовывать твердые растворы с медью. С другой стороны, высокая проводимость данных материалов ограничивает влияние диффузионного барьера на процесс распространения электрического сигнала. Снижение влияния барьерного слоя на работу проводящих линий достигается, как правило, за счет уменьшения его сопротивления, что обычно сопровождается ухудшением свойств барьерного слоя. В связи с этим оптимизация состава диффузионного барьера является комплексной задачей, требующей учета ряда факторов, к которым следует также отнести зависимость барьерных свойств от толщины слоя. Это особенно актуально в связи с возрастающей степенью интеграции и уменьшением поперечного сечения контактных окон и токоведущих дорожек, так как в этом случае требуется учитывать возможности методов осаждения барьерных слоев.

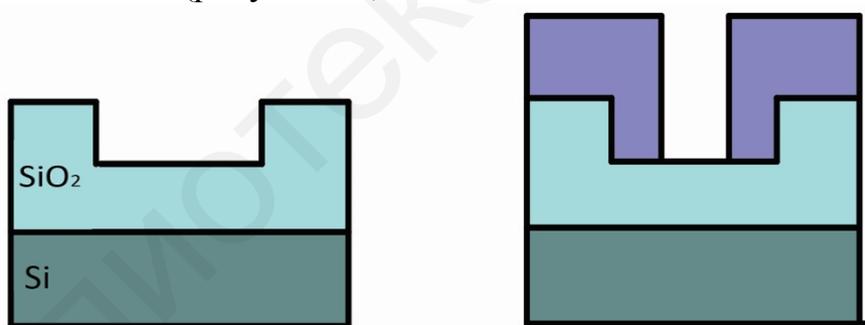
**Формирование медных межсоединений методом двойной гравировки.** Препятствия при формировании медных межсоединений, о которых сказано выше, сдерживали применение данного металла в массовом производстве. Положение изменилось тогда, когда корпорация IBM и компания Motorola объявили о том, что каждая из них, независимо друг от друга, разработали технологию производства кристаллов ИМС с шестью уровнями разводки. Препятствия были преодолены с помощью двухстадийного процесса двойной гравировки (dual-damascene process).

Так называемый метод двойной гравировки включает формирование шин межсоединений путем первоначального травления канавок или каналов в планарном диэлектрическом слое и последующее заполнение этих канавок металлом.

В данном методе задействован второй уровень, в котором помимо формирования канавок травится и заполняется ряд отверстий (т. е. контактов к активным областям или к металлу). После заполнения металлом канавок и отверстий пластина планаризируется с помощью химико-механической полировки (ХМП).

Основным достоинством процесса гравировки является исключение необходимости травления металла. Оно приобретает все большее значение по мере перехода полупроводниковой промышленности от алюминия к меди, поскольку травление меди связано с чрезмерно большими трудностями. Второе достоинство процесса гравировки состоит в исключении необходимости заполнения зазоров в диэлектрике между шинами разводки. Третье достоинство процесса гравировки заключается в том, что он дает возможность обойти некоторые проблемы, связанные с неточностью совмещения фотолитографических слоев, позволяя получать более высокую плотность межсоединений.

Для формирования структуры металлизации с двойной гравировкой можно использовать три технологических маршрута: с первичным формированием канавок (рисунок 18), с первичным формированием контактов (рисунок 19), с использованием стоп-слоя (рисунок 20).

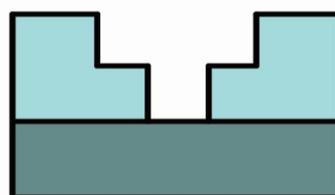


Осаждение  $\text{SiO}_2$ , фотолитография «канавки», травление канавок

Фотолитография «контакты», (проявление фоторезиста)

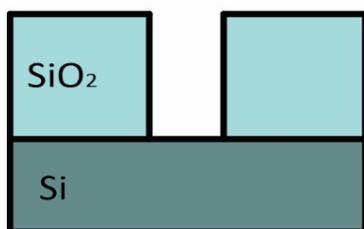


Травление контактов

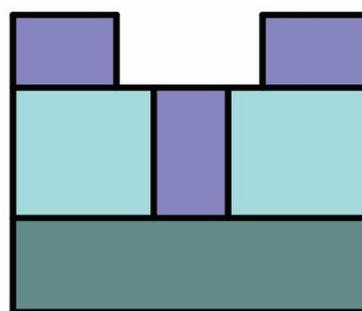


Удаление фоторезиста

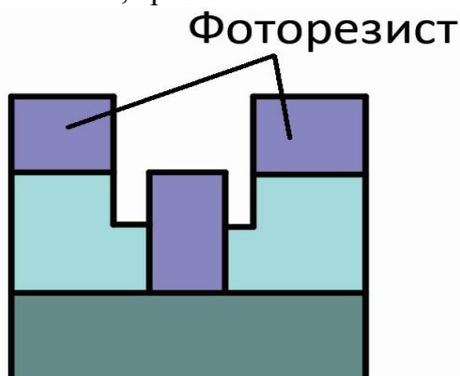
Рисунок 18 – Последовательность процесса двойной гравировки с первичным формированием канавок



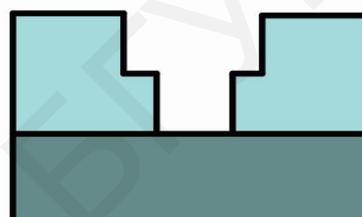
Осаждение  $\text{SiO}_2$ , фотолитография «контакты», травление



Фотолитография «канавки», проявление фоторезиста



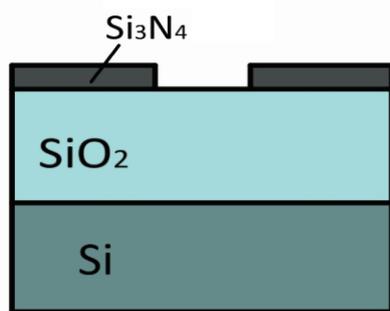
Травление канавок



Удаление фоторезиста

Рисунок 19 – Последовательность процесса двойной гравировки с первичным формированием контактов

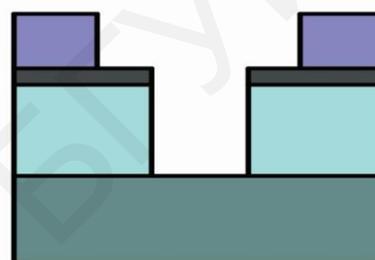
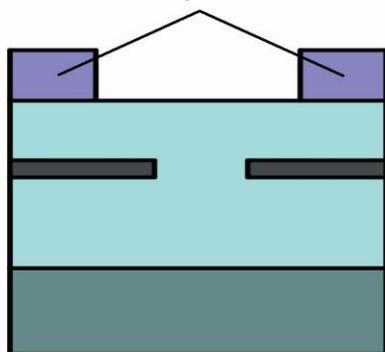
Отличительной чертой технологического варианта двойной гравировки с использованием стоп-слоя является применение очень тонкого слоя нитрида кремния, который действует в качестве жесткой маски. Нитрид кремния осаждается сверху на диэлектрик, в котором формируется топологический рисунок для создания отверстий межуровневых контактов. Затем осаждается второй уровень диэлектрика сверху нитрида кремния. После этого формируется топологический рисунок канавок и травится в верхнем уровне диэлектрика до стоп-слоя нитрида кремния. Однако травление продолжается далее через отверстие в нитриде, формируя тем самым межуровневые отверстия. На последней стадии канавки и межуровневые контакты заполняются металлом. Заметим, что на рисунке 20 показана канавка намного шире межуровневого отверстия, но в действительности они имеют практически одинаковый размер. Основным преимуществом данного технологического маршрута формирования межсоединений является то, что в нем присутствует всего одна операция травления и одна операция заполнения углублений металлом. Данный технологический вариант наиболее приемлем для формирования многоуровневой металлизации на основе пленок меди.



Осаждение  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}$ , фотолитография «контакты», травление  $\text{SiN}$

Осаждение второго слоя  $\text{SiO}_2$

Фоторезист



Фотолитография «канавки»

Травление  $\text{SiO}_2$

Рисунок 20 – Последовательность процесса двойной гравировки с использованием стоп-слоя

**Методы осаждения пленок меди.** Как указывалось в подразделе 3.1, одной из проблем многоуровневой металлизации является недостаточное заполнение металлом контактных областей. Существует несколько приемов, позволяющих без пустот заполнить медью канавки и контактные колодцы в диэлектрике, например, химическое осаждение меди из газовой фазы, химическое и электрохимическое осаждение из растворов. Привлекательность методов химического и электрохимического осаждения из растворов состоит, во-первых, в низкой температуре процесса, а во-вторых, в простоте оборудования.

*Метод электрохимического осаждения* металлов рассмотрен в подразделе 2.3. Для того чтобы осадить слой меди на поверхность подложки методом электрохимического осаждения, необходимо погрузить подложку в электролит, содержащий ионы меди, и подключить источник постоянного тока таким образом, чтобы подложка была катодом, как показано на рисунке 21. Однако для того чтобы осуществить осаждение на поверхность подложки, которая сама является полупроводниковой, а поверхность ее покрыта диэлектриком, прежде необходимо осадить на поверхность затравочный слой. Функцией этого слоя является проведение тока от контакта на краю подложки ко всем точкам на подложке, где желательно осаждение.

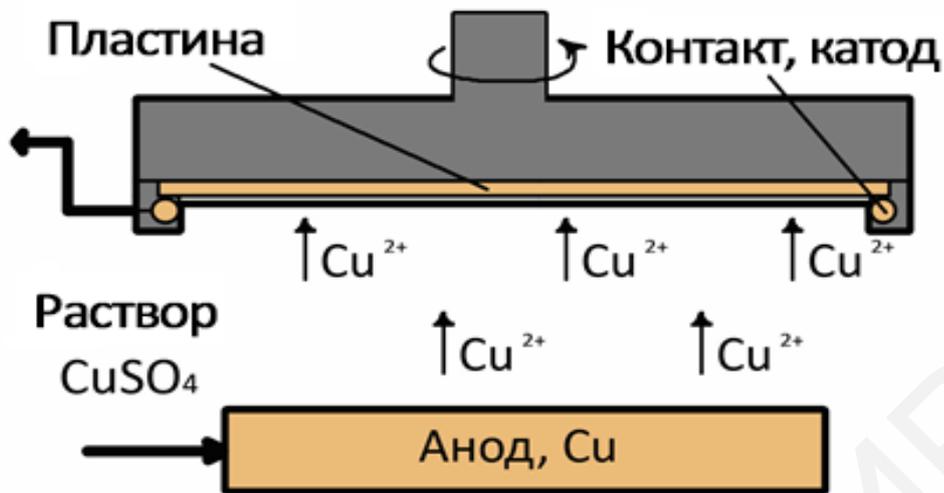
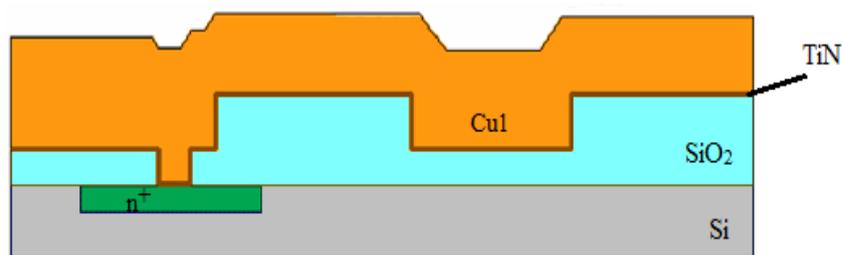


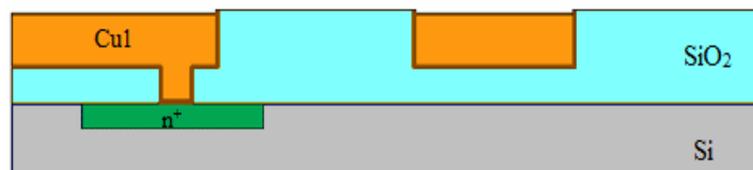
Рисунок 21 – Схема процесса электрохимического осаждения меди

Технология двойной гравировки предполагает формирование контактов и канавок в диэлектрике путем двойного сухого травления. Последующее осаждение диффузионно-барьерных слоев и затравочного слоя на диэлектрический материал можно отнести к процессу электрохимического осаждения. В то же время эти слои являются функциональной частью структуры ИМС, поэтому не удаляются и должны оставаться на своем месте. Лишний металл удаляется на стадии планаризации с использованием химико-механической полировки. Таким образом, процесс электрохимического осаждения идеально подходит для создания структур межсоединений, так как позволяет осаждать металл одновременно в межуровневые контактные области и в вышележащие канавки по технологии двойной гравировки. На рисунке 22 показана последовательность формирования двухуровневой металлизации на основе пленок меди, осажденной электрохимическим методом.

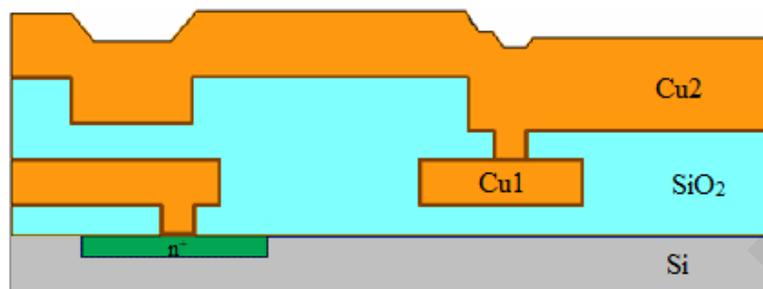
*Метод химического осаждения меди* из ионных растворов на каталитические поверхности без внешних электродов и приложения электрического напряжения можно использовать в технологическом процессе изготовления многоуровневой металлизации ИМС. Есть два важных достоинства химического осаждения по сравнению с электрохимическим: первое – отсутствие необходимости затравочного слоя при химическом осаждении, второе – возможная высокая селективность процесса. Процесс химического осаждения имеет электрохимический механизм, основу которого составляют две одновременно идущие каталитические реакции: окислительная – анодное окисление восстанавливающего реагента, восстановительная – катодное восстановление ионов металла. Наиболее широко используемым восстановителем ионов меди для химического осаждения меди является формальдегид. Существуют два основных подхода к изготовлению субмикронных межсоединений по технологии двойной гравировки с использованием метода химического осаждения меди: селективный и неселективный процессы.



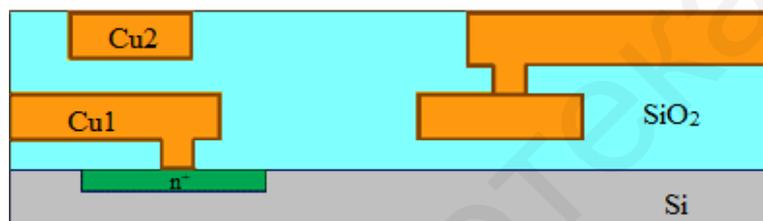
Осаждение  $\text{SiO}_2$ , двойная гравировка по  $\text{SiO}_2$ , осаждение  $\text{TiN}$ ,  $\text{Cu}$  для первого уровня металлизации



Химико-механическая полировка для выявления первого слоя металлизации



Упаковка первого уровня металлизации барьерным слоем, осаждение межуровневого  $\text{SiO}_2$ , двойная гравировка по  $\text{SiO}_2$ , осаждение  $\text{TiN}$ ,  $\text{Cu}$  для второго уровня металлизации



Химико-механическая полировка, упаковка второго уровня металлизации барьерным слоем

Рисунок 22 – Последовательность формирования двухуровневой металлизации на основе пленок меди, осажденной электрохимическим методом

По основным технологическим стадиям изготовления неселективный процесс является одинаковым с технологией двойной гравировки, основанной на методе электрохимического осаждения, и по этой причине не имеет каких-либо очевидных преимуществ перед электрохимическим осаждением за исключением возможности получения мелкозернистой структуры медного слоя.

В селективном процессе фоторезистивная маска для травления канавок может быть использована при осаждении диффузионно-барьерных слоев и каталитического слоя (рисунок 23, а, б). Удаление фоторезиста обеспечивает селективное расположение диффузионно-барьерных слоев и каталитического слоя только внутри канавок и контактов (рисунок 23, в). Это приводит к тому, что в процессе химического гетерогенного восстановления из раствора медь осаждается селективно только на каталитической поверхности, заполняя канавки и контакты (рисунок 23, г). Идеальным случаем было бы прецизионное за-

полнение канавки, как показывает рисунок 23, д. Возможно, такого рода технологические решения будут найдены. Но даже в случае, демонстрируемом на рисунке 23, г, с плоской поверхности необходимо убрать только излишки меди. С помощью химико-механической полировки проще удалить один материал, чем несколько материалов, обладающих различными механическими свойствами. Таким образом, после заполнения медью канавок химическим осаждением проводится операция планаризации, результатом которой является структура, показанная на рисунке 23, д.

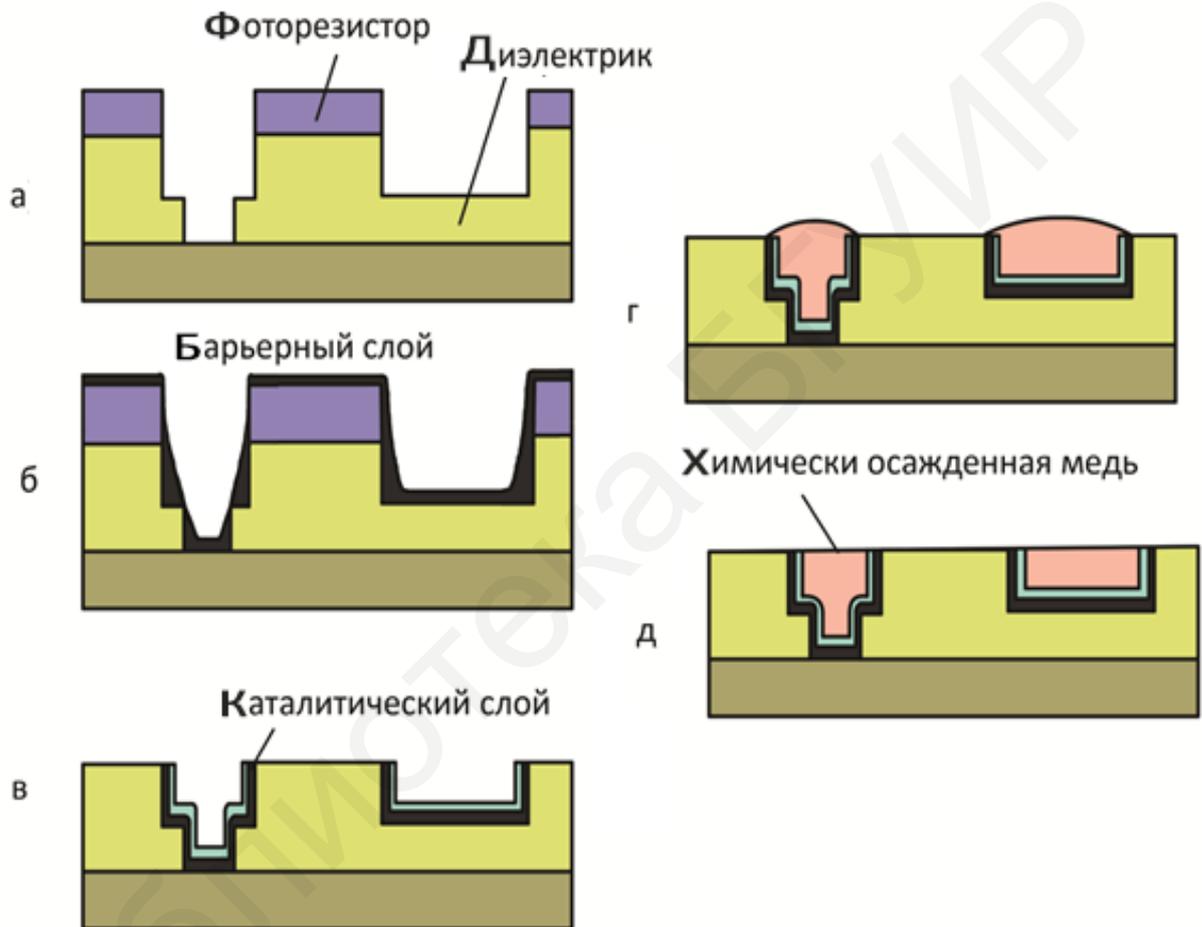
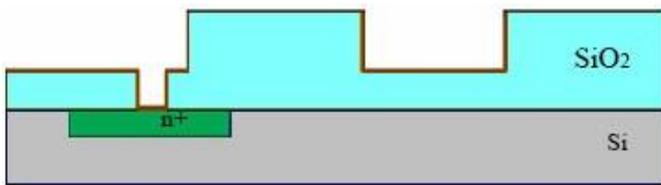


Рисунок 23 – Селективный процесс химического осаждения меди для формирования межсоединений в рамках технологии двойной гравировки

На рисунке 24 показана последовательность формирования двухуровневой металлизации на основе пленок меди, полученных методом химического осаждения.

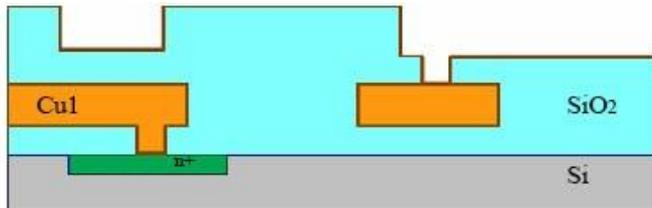
*Технологический процесс формирования медной металлизации.* На рисунке 25 представлен технологический маршрут формирования двухуровневой медной металлизации с использованием двойной гравировки и стоп-слоя. Первый уровень многослойной многоуровневой системы металлизации с медными межсоединениями полностью соответствует первому уровню многослойной алюминиевой металлизации, показанной на рисунке 17, а–е.



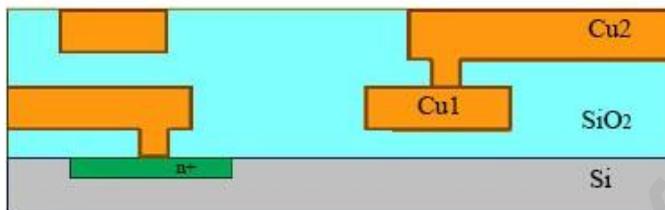
Осаждение  $\text{SiO}_2$ , двойная гравировка по  $\text{SiO}_2$ , формирование барьерного слоя и слоя-затравки для первого слоя металлизации



Осаждение меди для первого уровня металлизации



Упаковка первого уровня металлизации барьерным слоем, осаждение межуровневого  $\text{SiO}_2$ , формирование барьерного слоя и слоя-затравки для первого уровня металлизации



Осаждение меди для второго уровня металлизации, упаковка второго уровня металлизации барьерным слоем

Рисунок 24 – Последовательность формирования двухуровневой металлизации на основе пленок меди, полученных методом химического осаждения

Несмотря на то что в отличие от алюминия для меди существуют по меньшей мере три различных метода заполнения полостей с высоким аспектным соотношением, на первом, прилежащем к полупроводнику уровне разводки контактные колодцы так же, как и в случае алюминиевой металлизации, заполняются вольфрамом (рисунок 25, а, б). Это усложнение технологии является одной из мер по препятствию попадания меди в полупроводник. Принципиальное отличие технологии медной металлизации от алюминиевой состоит в способе формирования самих проводников. Если в алюминиевой металлизации проводники формируются, как указывалось ранее, путем прямой фотолитографии по проводящему слою, то в медной металлизации вначале осаждается слой внутриуровневого диэлектрика. В этом слое с помощью фотолитографии и процесса сухого травления создаются канавки, рисунок которых соответствует будущим медным проводникам. Далее последовательно наносятся тонкий диффузионно-барьерный слой методом конформного осаждения (рисунок 25, в) и слой меди, который заполняет указанные канавки (рисунок 25, г).

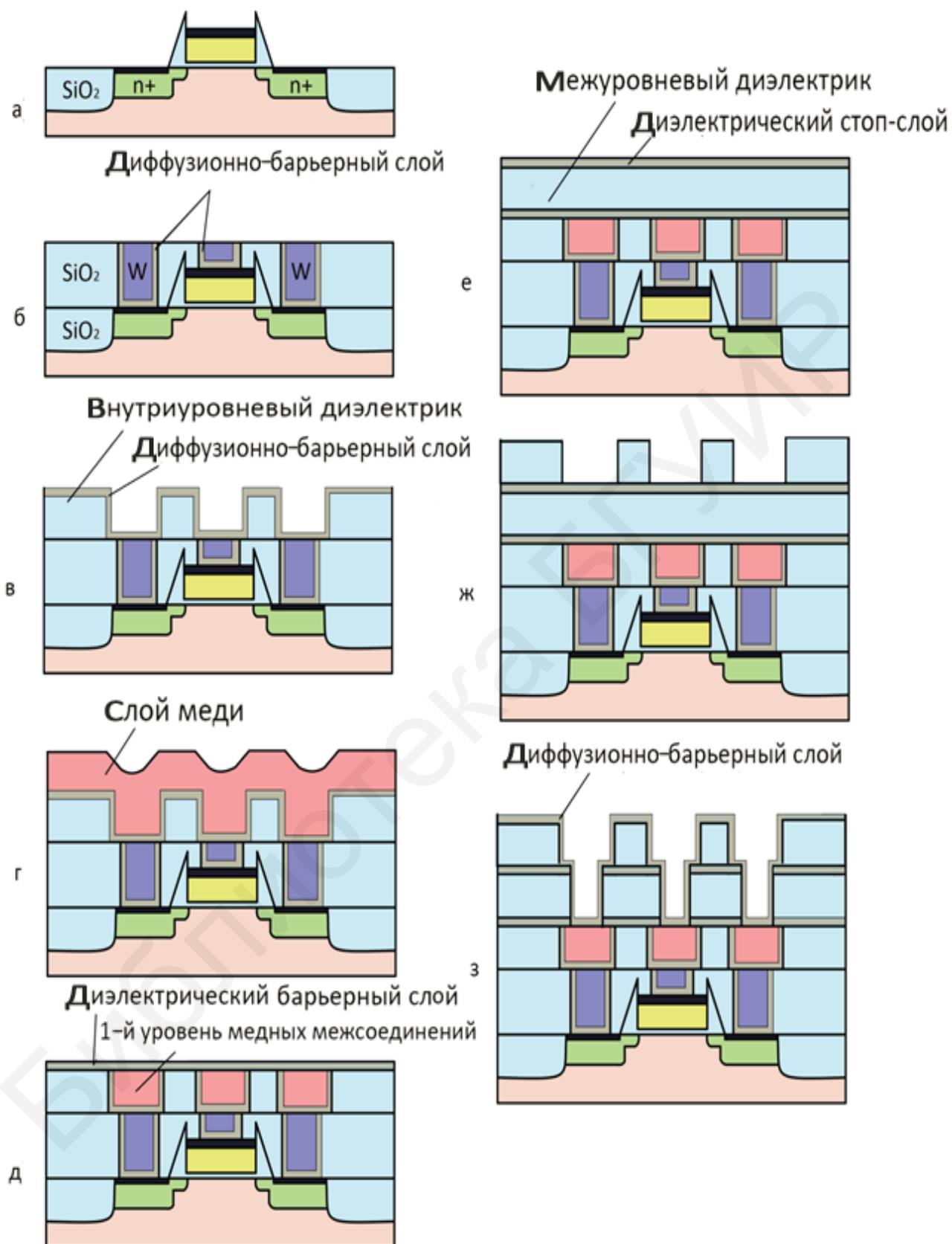


Рисунок 25 – Типичный технологический маршрут медной металлизации

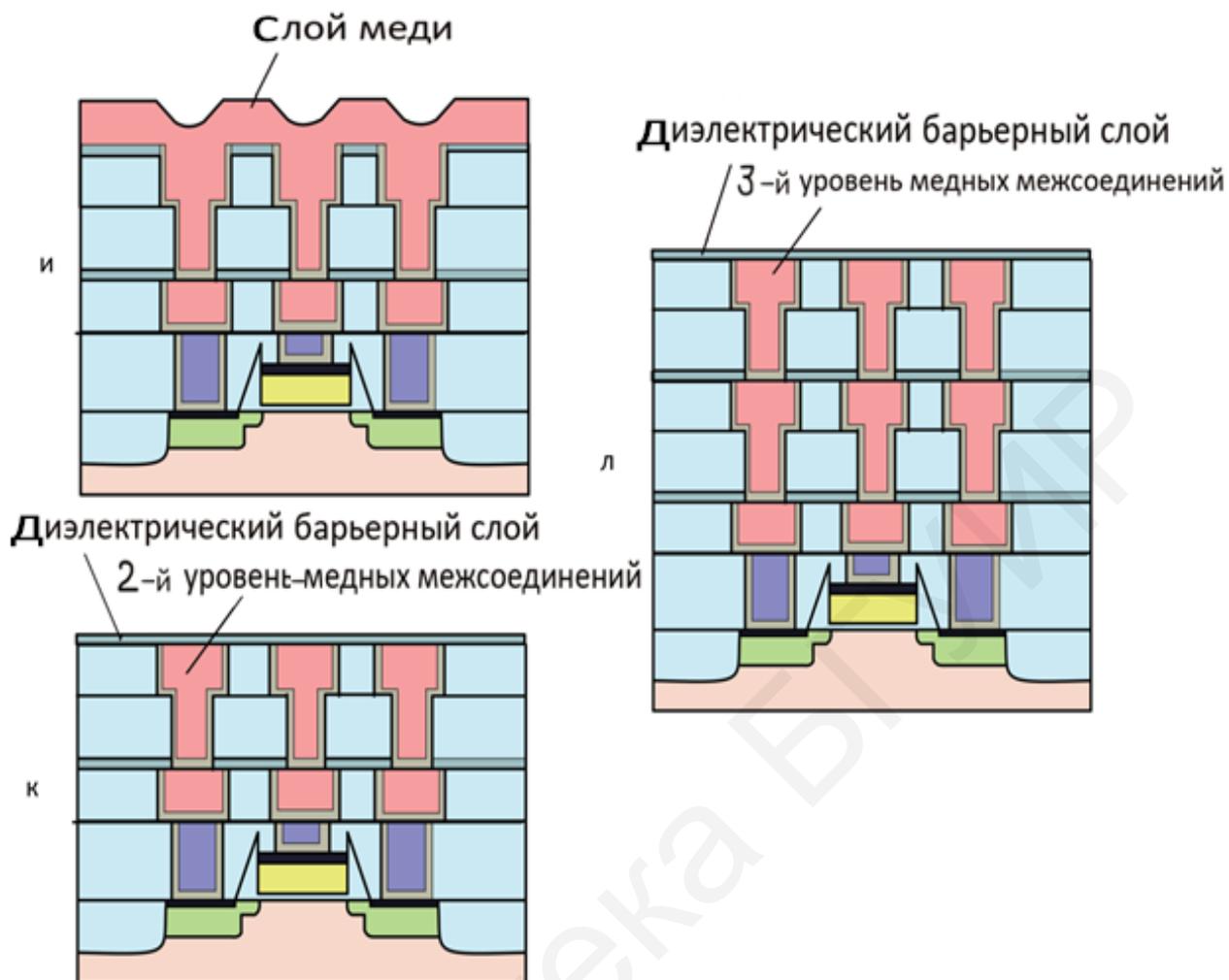


Рисунок 25, лист 2

После этого проводится операция планаризации, в процессе которой медь и диффузионно-барьерный слой удаляются с открытой поверхности диэлектрика и остаются только внутри канавок (рисунок 25, д), в результате чего возникают медные проводники, со всех сторон, кроме верха, окруженные изолирующим диэлектриком.

В отличие от алюминиевого, медный проводник со всех сторон обязательно должен быть окружен диффузионно-барьерным слоем. Это необходимо для предотвращения диффузии меди в диэлектрик и далее в полупроводник. Как можно видеть на рисунке 25, г, технологически легко окружить медный проводник путем конформного осаждения проводящего диффузионно-барьерного слоя на дно и боковые стенки канавок и контактных колодцев. Однако и верх медных межсоединений также необходимо защитить диффузионно-барьерным слоем, но это трудно сделать с помощью традиционных проводящих диффузионно-барьерных слоев, не закоротив межсоединения между собой. Наиболее простым вариантом решения отмеченной проблемы является нанесе-

ние тонкого диэлектрического диффузионно-барьерного слоя по всей поверхности (рисунок 25, д). Главным для этого слоя являются его диффузионно-барьерные свойства по отношению к меди. Диэлектрическая проницаемость этого материала может быть достаточно высокой по сравнению с межуровневым или внутриуровневым диэлектриком, поскольку толщина данного слоя мала и не вносит заметного вклада в паразитную емкость и, как следствие, в *RC*-задержку сигнала.

Следующим является этап создания второго уровня межсоединений. Для этого наносится слой межуровневого диэлектрика, стоп-слой (рисунок 25, е) и внутриуровневый диэлектрик, в котором посредством фотолитографии и сухого травления формируются канавки (рисунок 25, ж). Далее с помощью фотолитографии и сухого травления вскрываются контактные окна-колодцы, осаждается конформный диффузионно-барьерный слой (рисунок 25, з) и медный проводящий слой, заполняющий канавки и контактные колодцы (рисунок 25, и). Операция планаризации (химико-механическая полировка) и осаждение диэлектрического диффузионно-барьерного слоя завершают процесс формирования второго уровня медных межсоединений (рисунок 25, к).

Располагаемые выше уровни межсоединений (рисунок 25, л) имеют такую же структуру, поэтому описанный комплекс операций для формирования второго уровня повторяется в зависимости от количества уровней металлизации.

На рисунке 26 показано сечение КМОП-структуры с пятиуровневой металлизацией, изготовленной на основе пленок меди.

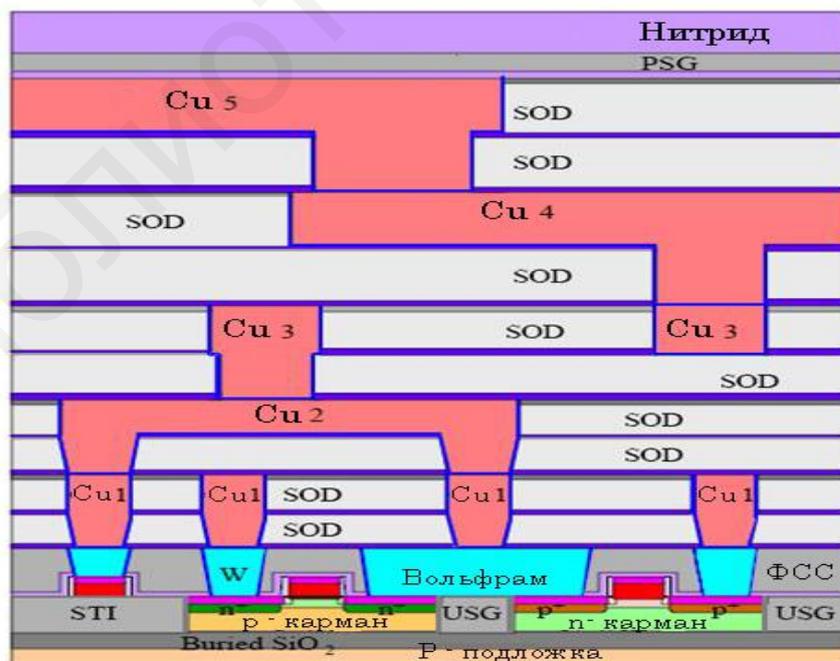


Рисунок 26 – Сечение КМОП-структуры с металлизацией, изготовленной на основе пленок меди

Медь, обладающая меньшим удельным сопротивлением, чем алюминий, не является единственным материалом среди тех, на которые предстоит перейти в будущем полупроводниковой промышленности. Кроме того, чтобы дополнительно уменьшить временные задержки и увеличить скорость работы кристаллов ИМС, осуществляют переход на диэлектрики с низкой диэлектрической постоянной ( $k$ ).

### 3.3 Планаризация рельефа

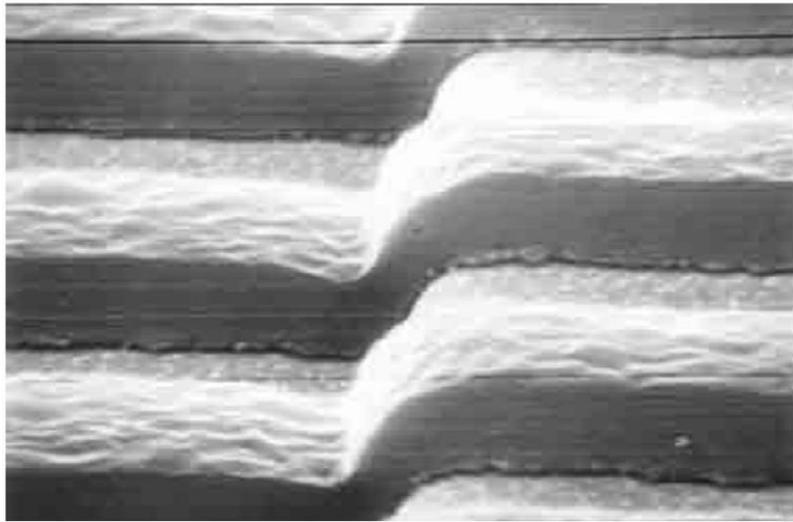
Одной из проблем при создании многоуровневой металлизации ИМС является планаризация межуровневого диэлектрика. С ростом степени интеграции ИМС резко повышаются требования к планарности поверхности полупроводниковых структур на всех стадиях технологического маршрута изготовления микросхем. Это связано с тем, что на рельефной поверхности затруднено проведение литографических процессов с требуемой точностью воспроизведения геометрических размеров формируемых рисунков, так как глубина фокуса современных проекционных систем близка к возможной высоте рельефа на полупроводниковой структуре или даже меньше ее. Рост количества слоев межуровневой разводки приводит к тому, что если не предпринимать специальных мер, то, начиная со второго слоя, становится проблематичным проводить литографический процесс и формировать следующий слой разводки. На рисунке 27 показано удовлетворительное и неудовлетворительное заполнение рельефа поверхности кристалла после формирования первого уровня металлизации.

Для преодоления данной проблемы была разработана специальная процедура – планаризация рельефа. Планаризация – это процесс, используемый при изготовлении ИМС и предназначенный для уменьшения перепада высоты между низшими и высшими точками рельефа на полупроводниковой пластине вплоть до получения полностью плоской поверхности по всей ее площади.

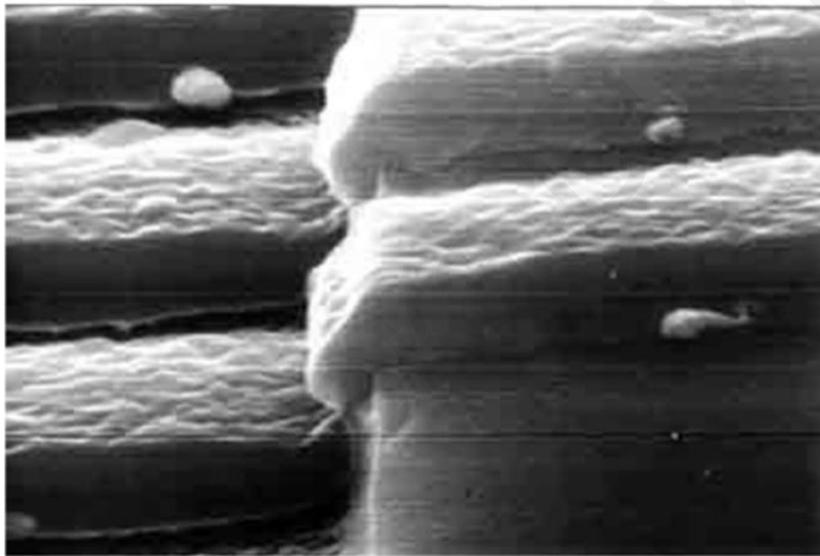
Известно достаточно большое количество методов планаризации рельефа, наиболее популярными из них являются:

- планаризация оплавлением бор-фосфорно-силикатного стекла;
- планаризация травлением жертвенного слоя (обычно резиста);
- планаризация селективным химическим осаждением вольфрама из газовой фазы;
- планаризация с помощью химико-механической полировки.

Применение в качестве межслоевого диэлектрика пленки легкоплавкого бор-фосфорно-силикатного стекла позволяет планаризовать поверхность полупроводниковой структуры посредством ее термообработки, выполняемой после осаждения пленки на развитый рельеф. Нагрев приводит к размягчению стекла, его вязкому течению и выравниванию рельефа. Пример планаризации с помощью оплавления бор-фосфорно-силикатного стекла приведен на рисунке 28.



а

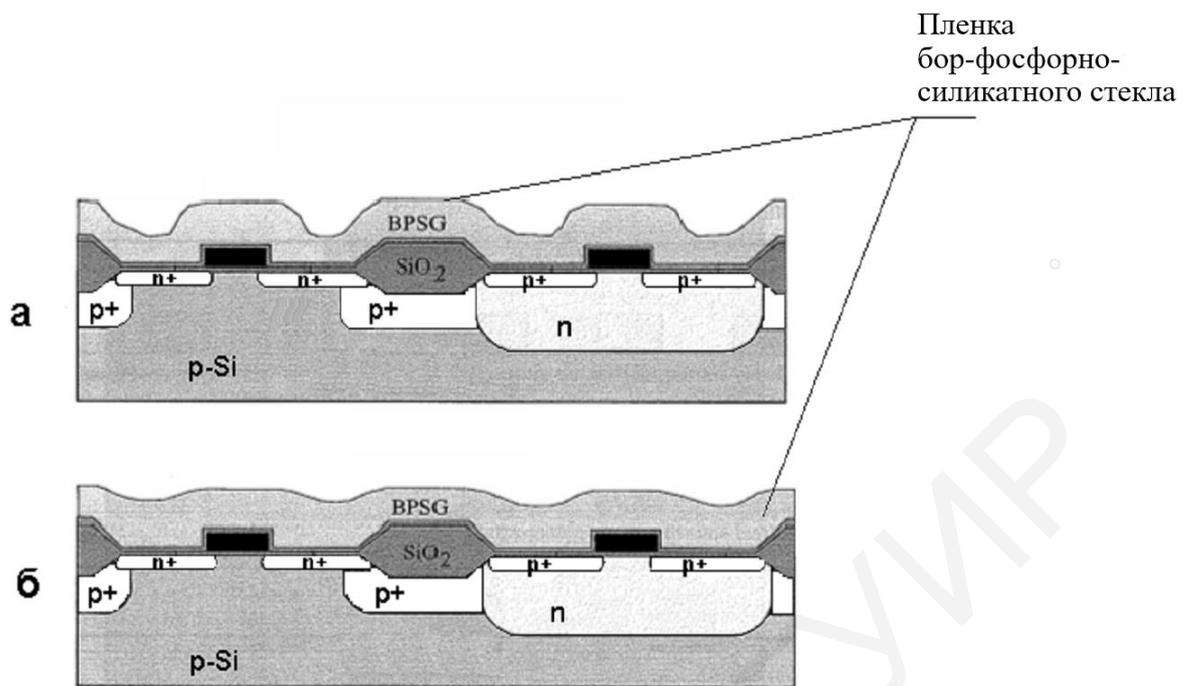


б

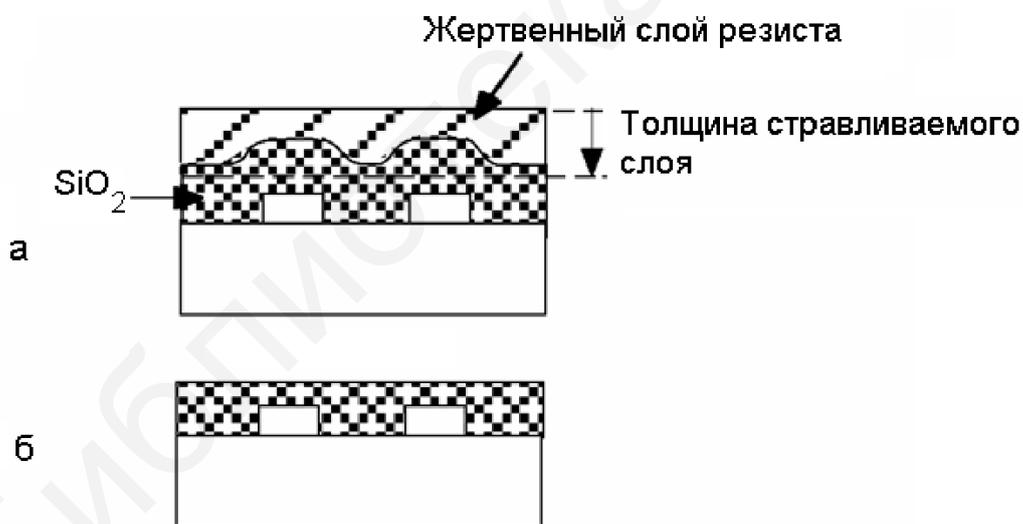
а – удовлетворительное заполнение рельефа поверхности кристалла;  
б – неудовлетворительное заполнение рельефа поверхности кристалла

Рисунок 27 – Рельеф поверхности кристалла после формирования первого уровня металлизации

Планаризация травлением жертвенного слоя резиста представлена на рисунке 29. Особенность метода заключается в том, что сглаживание рельефа достигается за счет равенства скоростей травления резиста и межуровневого диэлектрика. На кристалл наносится слой резиста такой толщины, чтобы его поверхность получалась практически ровной и покрывала все выступы рельефа, затем поверхность структуры подвергается травлению вплоть до полного удаления резиста из наиболее «низких» мест. После нанесения резиста его толщина по площади пластины различна, в результате травление лежащих под резистом «высоких» областей начинается раньше, чем травление «низких», что и ведет к планаризации рельефа.



а – до планаризации; б – после планаризации  
 Рисунок 28 – Планаризация полупроводниковой структуры с помощью оплавления слоя бор-фосфорно-силикатного стекла



а – до планаризации; б – после планаризации  
 Рисунок 29 – Планаризация полупроводниковой структуры травлением жертвенного слоя резиста

Важным элементом при формировании металлизации является планаризация областей контактов. На рисунке 30 показаны дефекты в области контактов алюминий – кремний поликристаллический. Одним из распространенных методов планаризации областей контактов является метод селективного химического осаждения вольфрама из газовой фазы (рисунок 31).

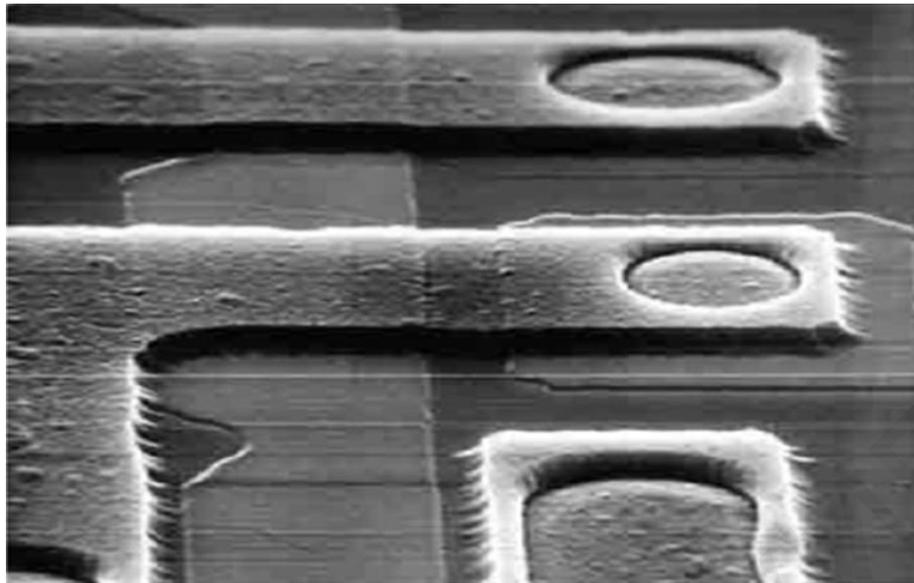
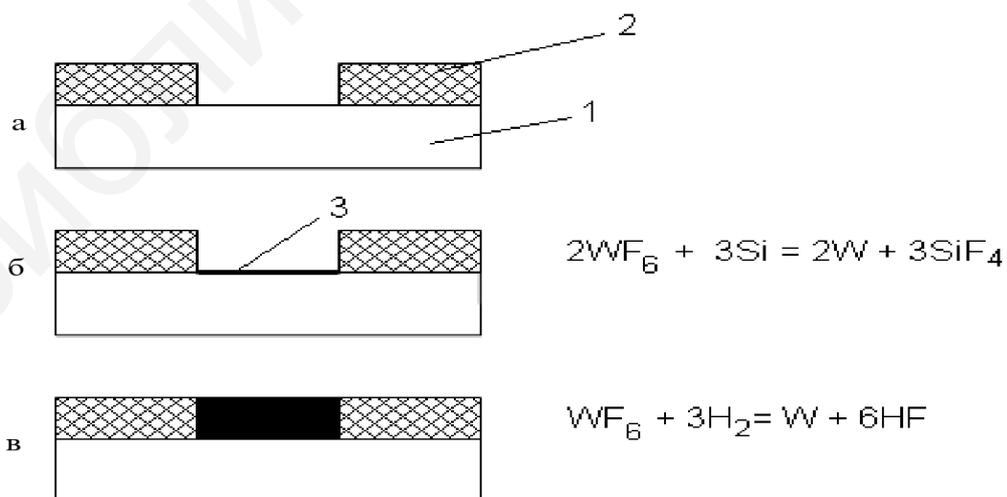


Рисунок 30 – Дефекты в области контактов алюминий – кремний поликристаллический

Метод является универсальным и применяется как при формировании межуровневых слоев металлизации, так и при создании контактов к полупроводниковым структурам на начальном этапе металлизации ИМС. Суть метода заключается в том, что сглаживание рельефа достигается путем предварительного заполнения контактных окон вольфрамом, химически осажденным из газовой фазы. На первом этапе в пленке окиси кремния вскрываются окна до поверхности кремния. Затем в контактные окна осаждается вольфрам и в результате происходит селективное заравнивание окон. Рассмотренный метод планаризации используется в основном при изготовлении ИМС с двумя-тремя уровнями металлизации.



а – до планаризации; б – начальная стадия осаждения W; в – после планаризации  
Рисунок 31 – Планаризация полупроводниковой структуры селективным химическим осаждением вольфрама из газовой фазы ( $\text{WF}_6$ ), производимая в окна  $\text{SiO}_2$

При изготовлении современных ИМС для планаризации используется метод химико-механической полировки (chemical-mechanical polishing, CMP). Химико-механическая полировка – это процесс удаления материала с исходной рельефной поверхности полупроводниковой структуры, выполняемый при одновременном воздействии как абразива, так и химических реагентов и приводящий к утончению полируемого слоя и получению плоской поверхности.

Сущность метода заключается в следующем. Поверхность подложки со сформированным рельефом под определенным давлением прижимается к полировальнику (полировальной подушке), закрепленному на вращающемся столе (рисунок 32), при этом на поверхность полировальника подается суспензия, содержащая абразивные частицы и различные химические компоненты; таким образом, суспензия подается в зазор между поверхностью пластины и поверхностью полировальной подушки.

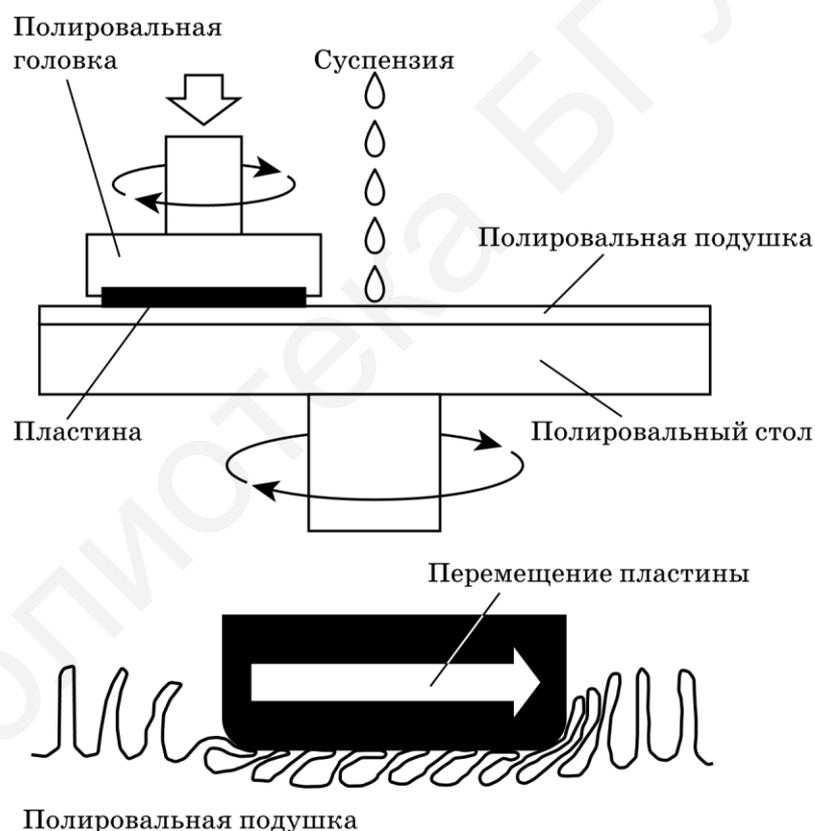


Рисунок 32 – Схема осуществления метода химико-механического полирования

Держатель обрабатываемой пластины также вращается (как правило, принудительно). Полировальная подушка изготавливается чаще всего из полиуретана, поверхность которого способствует удержанию абразивных частиц суспензии на пластине в процессе полирования. В устройствах полирования

ротационного типа полировальная головка, удерживающая пластину, смещена относительно центра полировального стола. В устройствах линейного типа полировальная подушка выполняется в виде бесконечной ленты, закрепленной на замкнутом носителе («ремне»), давление на пластину осуществляется гидродинамическим способом (рисунок 33).

ХМП производится для пленок межуровневых диэлектриков, для слоев металлов межуровневой и межэлементной разводки, создаваемых по методу двойной гравировки при формировании металлизации на основе пленок меди. Высота рельефа, которая получается при конформном осаждении тонкой пленки на поверхность предыдущего слоя с уже сформированным рельефом, зависит от геометрических размеров окон в сформированном слое.

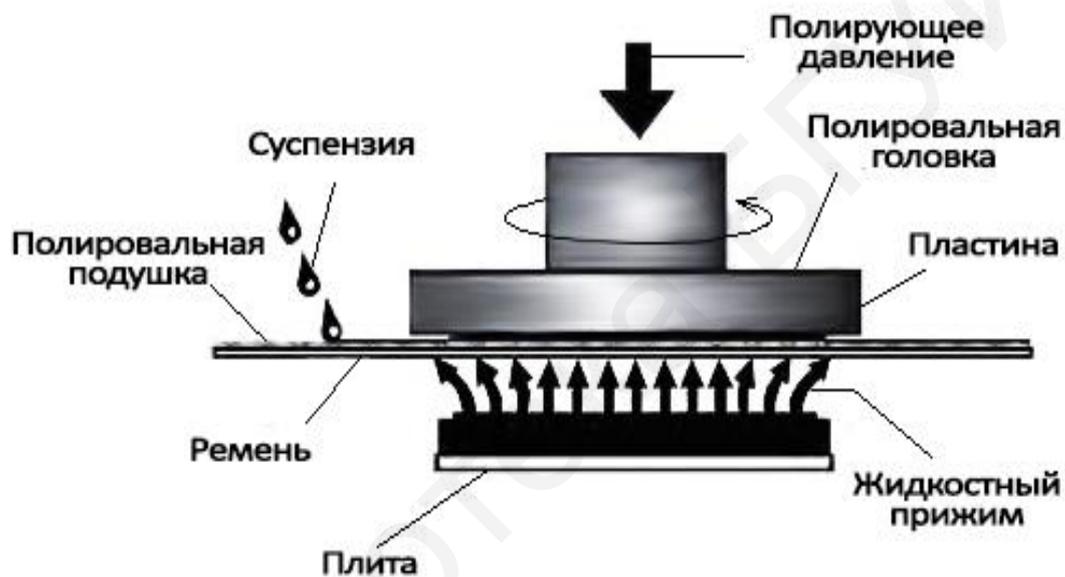
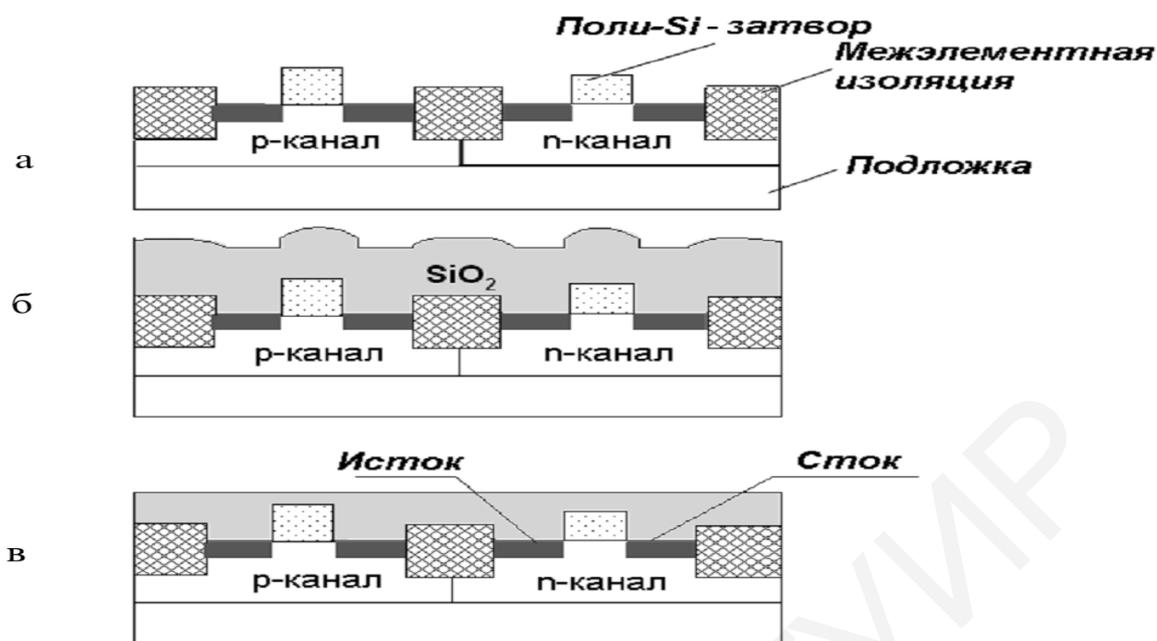


Рисунок 33 – Схема осуществления метода химико-механического полирования на основе устройства линейного типа

В тех местах, где размер окон в плоскости подложки много больше толщины пленки, при нанесении последующего слоя получаемый рельеф практически повторяет исходный. Однако в тех местах, где размер окна меньше или сравним с толщиной пленки, высота рельефа после нанесения последующего слоя становится меньше ее исходной величины. В результате топография рельефа до и после осаждения слоя может достаточно сильно отличаться. Идеальную топографию поверхности (плоская поверхность по всей площади пластины) можно получить только с помощью химико-механической полировки.

На рисунке 34 показан пример планаризации слоя межуровневого диэлектрика, осажденного на поверхность полупроводниковой кремниевой структуры.



- а – структура со сформированными транзисторами;  
 б – структура с осажденным слоем межуровневого диэлектрика;  
 в – планаризированная структура

Рисунок 34 – Планаризация слоя межуровневого диэлектрика, осажденного на поверхность полупроводниковой кремниевой структуры

Технология химико-механической планаризации включает в себя последовательность нескольких операций. Первой выполняется непосредственно сама полировка, затем проводится отмывка отполированной пластины от остатков суспензии и продуктов полировки и после этого производится контроль качества выполнения операции планаризации и операции очистки поверхности. При ХМП одновременно протекают два процесса: химическая реакция между активным реагентом, содержащимся в суспензии, и материалом планаризируемого слоя, а также механическое удаление продуктов реакции и материала планаризируемого слоя абразивными частицами, взвешенными в суспензии. Наличие в суспензии химически активных реагентов приводит к «размягчению» приповерхностного слоя, в результате чего облегчается его механическое удаление абразивом и увеличиваются скорость и качество полировки.

Состав суспензии и количество процессов ХМП, используемых для планаризации одного слоя, зависят от материала полируемого слоя, а также от толщины слоя, который необходимо удалить, и степени шероховатости поверхности, которую необходимо получить по окончании процесса. Количество процессов ХМП, используемых при изготовлении ИМС, растет с увеличением количества слоев межуровневой разводки.

На современном этапе развития микроэлектроники метод химико-механической планаризации является единственным, в наибольшей степени удовлетворяющим требованиям производства ИМС с проектными нормами менее 180 нм.

### 3.4 *RC*-задержка сигнала в межсоединениях ИМС

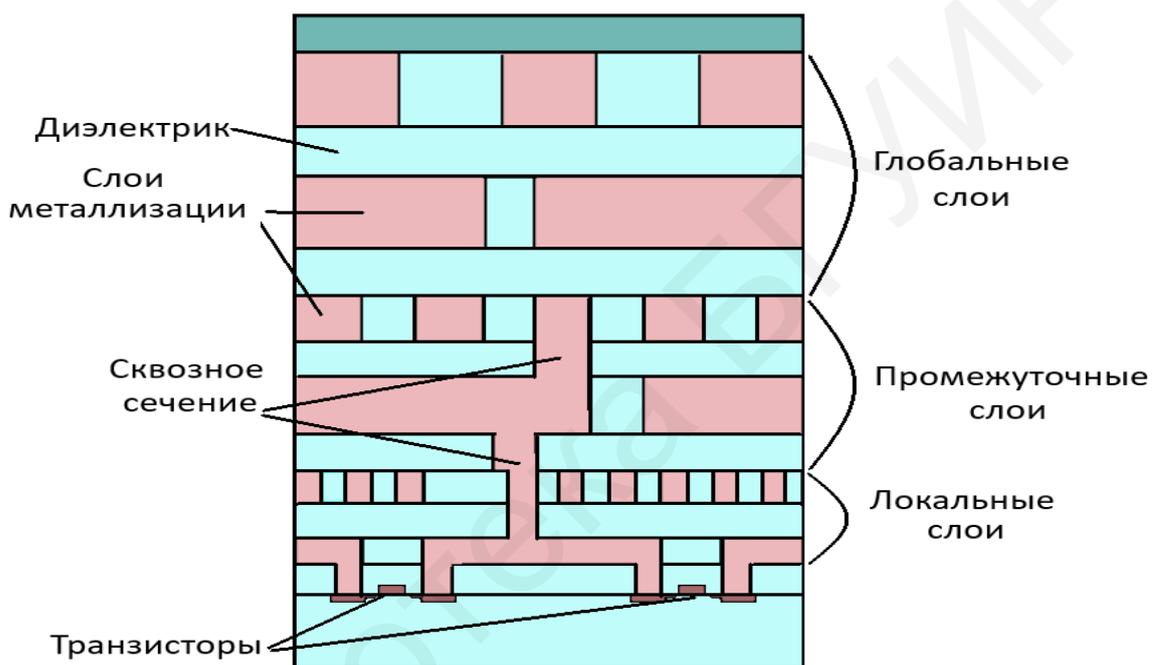
Проблема межсоединений как в настоящее время, так и в перспективе, является одной из самых острых. Межсоединения вводят паразитные сопротивления и емкости. Уменьшение размеров элементов ведет к росту *RC*-задержек в системе межсоединений и тепловыделений, а также к возникновению перекрестных помех и пр. Их роль возрастает при миниатюризации активных областей. Поэтому временные задержки распространения сигнала в современных схемах определяются не столько активными транзисторами, сколько линиями межсоединений.

Уменьшение размеров структуры элементов ИМС улучшает почти все характеристики схем, как функциональные, так и экономические. Этот вывод дал толчок продолжающейся по сегодняшний день технологической гонке на основе идей масштабной миниатюризации. Основная идея масштабирования – уменьшение геометрических размеров приборов с сохранением некоторых функциональных и параметрических инвариантов. В частности, необходимо, чтобы при масштабировании не изменялись электрические вольт-амперные характеристики (*ВАХ*) транзисторов. Для этого следует оставлять постоянными некоторые параметрические инварианты. Один из возможных таких инвариантов – электрические поля в транзисторе. Для того чтобы электрические поля внутри приборов оставались приблизительно постоянными, необходимо уменьшать напряжения питания. В целом масштабирование активных областей элементов ИМС обеспечивает увеличение быстродействия схем, в то же время уменьшение размера межсоединений ведет к большим задержкам, обусловленным быстрым уменьшением сечения проводника. Для борьбы с *RC*-задержкой используются различные достижения, полученные на основе использования геометрических структур и материалов.

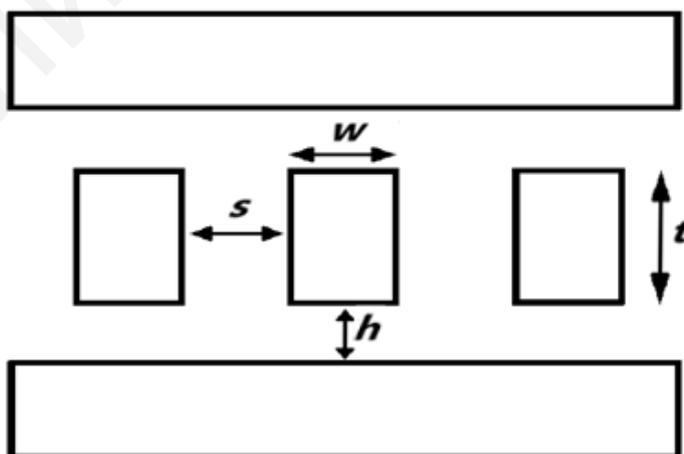
**Сопротивление металлических линии.** Переход на медные межсоединения позволил в значительной степени уменьшить сопротивление металлических линии. Однако дальнейшее масштабирование ИМС создает ряд проблем. Уменьшение ширины металлической линии до значений менее 0,1 мкм сопровождается экспоненциальным увеличением сопротивления. В случае более узких линий материал барьерного слоя, имеющий более высокую величину удельного сопротивления, отнимает большую часть площади сечения проводника. Меньшая ширина проводящих линий дает в результате меньший размер зерен, которые, находясь в узкой канавке, не могут перекристаллизоваться в зерна большего размера, что, таким образом, увеличивает показатели удельного сопротивления. Кроме того, разброс критических размеров толщины барьерного материала и ширины канавки (ширины проводящей линии) приводит к еще большему разбросу значений сопротивления.

На рисунке 35 показана многоуровневая структура межсоединений на кристалле ИМС. Межсоединения могут быть разделены на две основные категории в зависимости от размеров соединяемых блоков: локальные слои, которые связывают транзисторы и малые схемные блоки (длина 10–300 мкм), и гло-

бальные слои, которые связывают большие функциональные блоки в микропроцессоре (длина более 300 мкм). Типовые применения глобальных межсоединений включают шину данных, распределение тактовой частоты, шины источника питания. В процессе масштабирования площадь поперечного сечения металлических проводников, которая представляет собой произведение ширины ( $w$ ) и толщины ( $t$ ), уменьшается. Как следствие, металлические проводники становятся уже и выше, что приводит к увеличению аспектного отношения ( $t/w$ ), как показано на рисунке 35, б. Этот подход облегчает проблему задержки в межсоединениях, однако вызывает более сильную емкостную связь между соседними шинами.



а



б

а – расположение слоев в межсоединениях;

б – поперечное сечение металлических проводников

Рисунок 35 – Многоуровневая структура межсоединений на кристалле ИМС

**Емкость в межсоединениях ИМС.** Согласно упрощенным представлениям модель емкости в многоуровневых ИМС складывается из емкости параллельных слоев межсоединений  $C_{L-G}$  (относительно нижележащих токопроводящих слоев или относительно «земли») и краевой емкости  $C_{L-L}$ . Схематическое представление данных емкостей в многоуровневой структуре ИМС представлено на рисунке 36.

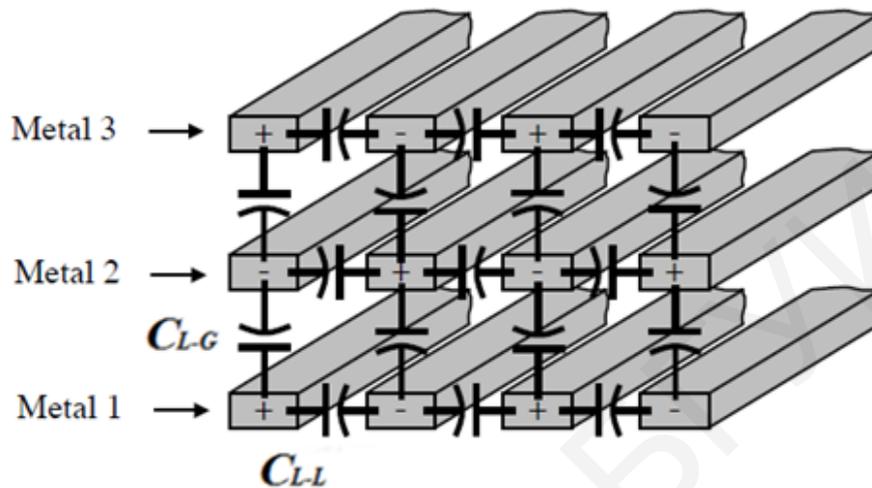


Рисунок 36 – Схематическое представление емкостей в многоуровневой структуре

Так как емкость между слоем металлизации и «землей» ( $C_{L-G}$ ) приблизительно пропорциональна ширине проводника, а его сопротивление масштабируется вместе с изменением площади сечения, то чем больше их аспектное отношение, тем меньше  $RC$ -задержка при уменьшении шага линий. Эта тенденция особенно благоприятна в случае глобальных межсоединений, в то время как относительно более низкое аспектное отношение является приемлемым для локальных межсоединений, величина задержки прохождения сигнала в которых в меньшей степени зависит от их длины. Следует отметить, что с высоким аспектным отношением связаны две проблемы. Во-первых, металлизировать глубокую длинную канавку достаточно сложно. В результате изготовление соединений и сквозных отверстий с аспектным отношением более четырех становится ненадежным. Во-вторых, при более высоком аспектном отношении увеличение толщины проводника ведет к более высокой емкостной связи ( $C_{L-L}$ ) со смежными проводниками и, следовательно, к увеличению  $RC$ -задержки и помех из-за взаимодействия сигналов. Эти два нежелательных эффекта ограничивают практичность метода масштабирования для будущих технологических поколений.

Как было показано в данном подразделе, масштабирование межсоединений является узким звеном в задаче увеличения быстродействия схем, и для получения значительных результатов в этом направлении используют два основных достижения: переход от алюминия к меди в качестве материала металлизации и внедрение диэлектриков с низким значением диэлектрической

проницаемости ( $k$ ) для замены диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Данные подходы не только обеспечивают эффективное снижение резистивно-емкостных паразитных явлений на единицу площади, но также улучшают надежность элементов ИМС с точки зрения электромиграции.

Исходя из требований уменьшения паразитной емкости проводников в многослойную структуру межсоединений на технологическом уровне 130 нм были внедрены изолирующие слои с низким значением диэлектрической проницаемости. Несмотря на то что  $\text{SiO}_2$  как изолятор имеет много естественных преимуществ применительно к кремниевой технологии, его высокое значение относительной диэлектрической проницаемости, равной 3,9, дает в результате высокие значения потребляемой мощности и  $RC$ -задержки в глобальных межсоединениях. Кроме того, высокая  $RC$ -задержка требует большего количества повторителей для глобальных соединений, для того чтобы удовлетворить временным ограничениям, что далее приводит к увеличению стоимости используемой площади и потребляемой мощности. Эта проблема решается за счет использования современных материалов с низким значением  $k$ .

В настоящее время существует много доступных материалов с низким значением  $k$ , которые можно разделить на несколько групп: кремнийсодержащие и материалы, которые не содержат кремний. Были затрачены серьезные усилия на поиски подходящих диэлектриков, таких как FSG ( $k = 3,5$ ), SiOC ( $k = 9$ ), SiLK ( $k = 2,7$ ), парилен ( $k = 2,3$ ), деидриглас ( $k = 1,5$ ) и ксерогель ( $k = 1,3$ ). Конечная цель исследования диэлектриков с низким значением  $k$  сводится к поиску такого материала, диэлектрическая постоянная которого приближается к значению этого показателя для воздуха ( $k = 1,0$ ).

С точки зрения интеграции технологического процесса внедрение диэлектриков с низким значением  $k$  представляется огромной проблемой – необходимо найти компромиссные решения между значением диэлектрической проницаемости и надежностью. Так как низкие значения диэлектрической проницаемости можно найти только у пористых изоляторов (либо полимеров, либо кремниевых соединений), то их тепловые и механические свойства отличаются от традиционных материалов технологического процесса. Вследствие присущей им пористости скорость травления материалов с низким  $k$  очень сложно контролировать, что ведет к неудовлетворительному качеству нанесенного на боковые стенки покрытия. Кроме того, низкая теплопроводность пористых диэлектриков с низким  $k$  вызывает значительные эффекты джоулевого разогрева, возникновение термических и механических рассогласованных напряжений на границе раздела между медным слоем и изоляторами. Эти проблемы существенно ухудшают качество сцепления на границе раздела и способствуют усилению диффузии меди в диэлектрики. Итак, несмотря на то что внедрение диэлектриков с низким  $k$  улучшает характеристики схем, для успешной интеграции этих материалов необходимо решение узких мест – проблем термической устойчивости и электрической надежности.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Металлизация ультрабольших интегральных схем : учеб. пособие / Д. Г. Громов [и др.]. – 2-е изд. – М. : БИНОМ, 2012. – 277 с.
- 2 Данилина, Т. И. Технология СБИС : учеб. пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей. – Томск : Изд-во ТГУ, 2007. – 287 с.
- 3 Красников, Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г. Я. Красников. – М. : Техносфера, 2011. – 800 с.
- 4 Зебрев, Г. И. Физические основы кремниевой нанoeлектроники : учеб. пособие / Г. И. Зебрев. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 240 с.
- 5 Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. В 3 т. Т. 3 / О. Ю. Наливайко [и др.]. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 784 с.
- 6 Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне / Б. П. Вонг [и др.] ; под ред. Н. А. Шелепина. – М. : Техносфера, 2014. – 432 с.
- 7 Белоус, А. И. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 1 / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – 695 с.
- 8 Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. В 2 ч. Ч. 1 : Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование / М. А. Королев [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. – 3-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 397 с.
- 9 Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. В 2 ч. Ч. 2 / М. А. Королев [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 422 с.

*Учебное издание*

**Мигас** Дмитрий Борисович  
**Черных** Александр Георгиевич

**МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 17.06.2020. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 4,2. Тираж 50 экз. Заказ 37.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск