

1.9. ТРЕБОВАНИЯ К ОСНОВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ И ПРИМЕНЯЕМОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Цель лекции: ознакомление с основными технологическими процессами и оборудованием для производства ИС.

1.9.1. ЖИДКОСТНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В производстве ИС с проектными нормами 0,5 мкм и менее необходимо обеспечить чистоту поверхности пластины с поверхностной концентрацией:

- щелочных и тяжелых металлов < 50 ат./см²;
- алюминия и кальция < 10 ат./см²;
- органических примесей (по С) < 10 ат./см².

Привносимая дефектность, связанная с наличием микрочастиц на поверхности, должна составлять не более 0,02 см⁻².

Комплекс химических обработок (химобработок) в процессе производства состоит из следующих операций (в соответствии с базовым технологическим маршрутом):

- финишная химобработка;
- удаление фоторезиста;
- травление оксидов, стекол;
- травление нитрида кремния.

Жесткие требования к чистоте поверхности пластин после химобработок определяют и требования к оборудованию для их проведения:

- конструкционные материалы, контактирующие с химическими реактивами и пластинами, не должны подвергаться деградации под их влиянием и не вносить дополнительные загрязнения в химреактивы и деионизованную воду (ДВ); как правило, это фторопласт типа PFA или кварц двойного переплава;
- степень обработки (шероховатость) деталей и узлов оборудования должна исключить возможность накопления загрязнений и генерации микрочастиц; шероховатость должна быть меньше 0,3 мкм, нагрев реагентов должен проводиться радиационными нагревателями; точность поддержания температуры в ваннах не должна превышать 0,1°C;
- перемещение пластин должно производиться автооператором с точностью позиционирования не хуже 1 мкм;
- метод обработки – бесконтактный (облегченные кассеты,

имеющие минимальную поверхность и массу, изготовленные, предпочтительно, из кварца);

- трубопроводы подачи реагентов и деионизованной воды должны иметь минимальное количество разъемных соединений;
- необходимо обеспечить автоматический ввод и корректировку технологических программ, отображение текущей информации о работе систем оборудования, диагностирование оборудования.

Учитывая, что проведение процессов требует различной компоновки линий химобработки, оборудование должно иметь модульное исполнение с высокой степенью унификации узлов и деталей.

В целях экономии дорогостоящих высококачественных реагентов и увеличения экологической безопасности оборудование должно быть ресурсосберегающим с рециркуляцией реагентов и их повторным использованием.

Химические материалы. Решающее влияние на качество химобработок и выход годных изделий оказывает чистота применяемых химических реагентов. Это влияние начинает серьезно сказываться уже при содержании металлических примесей на уровне единиц ррв, а на некоторых операциях, таких как формирование подзатворного диэлектрика, это влияние заметно уже при концентрациях ниже 1 ррв. На таких операциях необходимо использование реагентов с суммарным содержанием примесей 1 ррв и ниже, причем количество контролируемых элементов должно составлять 40–50. Кроме того, качество химреагентов определяется также и содержанием микрочастиц. Исходные реагенты должны содержать не более 250 частиц (размером более 0,5 мкм) в одном миллилитре. Такие химреагенты выпускаются зарубежными фирмами (например, фирмой «MERK»).

Но даже имея химические реагенты указанного качества, их подготовка и доставка к технологическим ваннам является сложной технической задачей, так как необходимо не только сохранить общий уровень содержания примесей, но и значительно уменьшить количество микрочастиц. Оборудование для подготовки (перекачка из тары поставщика в оборудование заказчика, смешивание необходимых компонентов) и система доставки (насосы, трубопроводы) должны содержать хотя бы двухступенчатую (предварительную и финишную) систему фильтрации. Конструкционные материалы не должны вносить дополнительные загрязнения в химреагенты. Данные материалы и оборудование изготавливают такие фирмы, как «Millipore» (США), «Georg Fischer» (Швейцария) и др. Учитывая ограниченный размер зон обслуживания химического оборудования, необходимо их разгрузить от систем заправки химреагентов, разместив их в специальных помещениях, а доставку реагентов к точкам потребления осуществлять по трубопроводам.

Оборудование для подготовки растворов должно предусматривать возможность приема реактивов из тары поставщика с одновременной фильтрацией, хранением их с постоянной рециркуляцией через фильтр, и с помощью насосов или методом «передавливания» осуществлять подачу реактивов к точкам использования.

Для производства плавиковой, соляной кислот, раствора аммиака водного и перекиси водорода необходимо использовать так называемые генераторы химреактивов в точке использования. Их применение позволит получать продукцию высокой степени чистоты (суммарное содержание металлических примесей не более 500 ppv) и снизить их стоимость на порядок.

1.9.2. ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

К группе термических процессов отнесем: эпитаксию, окисление, осаждение поликристаллического кремния (Si^*), Si_3N_4 , SiO_2 , отжиг, включая активацию ионно-легированных слоев, и сплавление контактов (рис. 1.9.1).

Определим основные принципы построения технологических процессов (техпроцессов) и выбора оборудования:

- интеграция процессов окисления и осаждения для устранения (уменьшения количества) перегрузок пластин из реактора в реактор;
- дополнительная газохимическая очистка поверхности перед каждым термическим процессом;
- минимизация факторов неконтролируемого воздействия на параметры структур (эрозия поверхности кремния при формировании подзатворного диоксида кремния, генерация микрочастиц и др.).

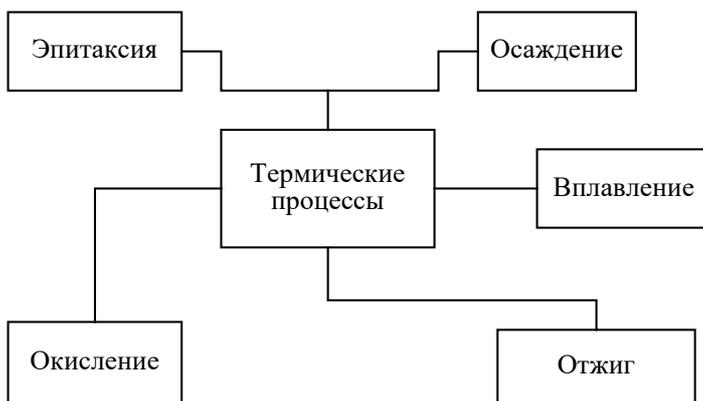


Рис. 1.9.1. Классификация термических процессов

Эпитаксия.

Эпитаксия (от греческого *epi* – на, над и *taxis* – расположение) представляет собой процесс наращивания монокристаллических слоев вещества на подложку (кристалл), при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

Эпитаксиальный слой — это монокристаллический материал, осажденный на монокристаллическую подложку, который сохраняет структуру этой подложки. Таким образом, эпитаксиальный слой имеет тот же самый тип кристаллической решетки, что и кристаллическая решетка подложки. Технологии эпитаксии полупроводниковых структур позволяют проводить контролируемое легирование выращиваемых структур примесями различных типов.

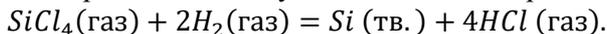
Процесс эпитаксии применяется при изготовлении биполярных, БиКМОП- и КМОП-микросхем. Кроме этого, использование эпитаксии для КМОП-схем позволяет за счет специально формируемого высоколегированного скрытого слоя эффективно решить проблему паразитной тиристорной структуры (эффект «защелки»). Еще одним положительным эффектом применения эпитаксии является геттерирующий эффект скрытого слоя относительно микропримесей металлов, имеющих в подложке.

Эпитаксиальный слой для КМОП и БиКМОП СБИС характеризуется следующими основными требованиями:

- диапазон толщин 1,5–5 мкм с разбросом 3%;
- диапазон удельного сопротивления 0,5–5 Ом·см с разбросом 5%;
- плотность дислокаций $< 1 \text{ см}^{-2}$;
- отсутствие линий скольжения;
- привнесенный прогиб $< 20 \text{ мкм}$;
- привнесенная дефектность (частицы $> 0,2 \text{ мкм}$) $< 0,05 \text{ см}^{-2}$.

Для реализации этих требований необходимо применить процесс низкотемпературной эпитаксии ($T < 1000^\circ\text{C}$) из моносилана или дихлорсилана при пониженном давлении на оборудовании синфракрасным нагревом, многопозиционным контролем температуры и ее регулированием в реальном масштабе времени. Обеспечение высокой равномерности температуры и распределения парогазовой смеси в реакторе достигается на оборудовании с индивидуальной обработкой пластин (рис. 1.9.2).

Газофазная эпитаксия, реализуемая с помощью химического взаимодействия подложки и вещества в газовой или парогазовой фазе осуществляется в камере реактора эпитаксии (рис. 1.9.3). при температуре $T = 1200^\circ\text{C}$, при этом происходит следующая химическая реакция:



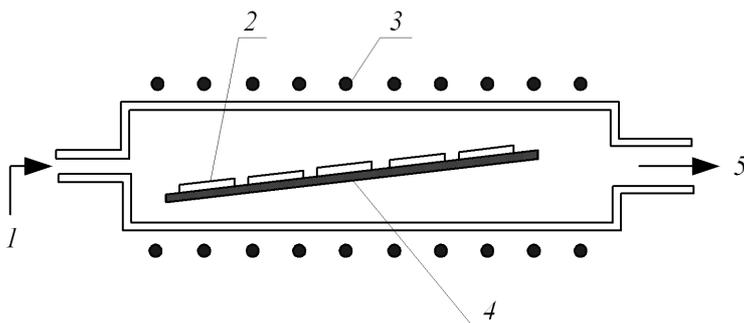


Рис. 1.9.2. Камера реактора эпитаксии:
1 – поступление газа; 2 – подложки; 3 – катушки индуктивного нагрева; 4 – графитовая основа; 5 – выход

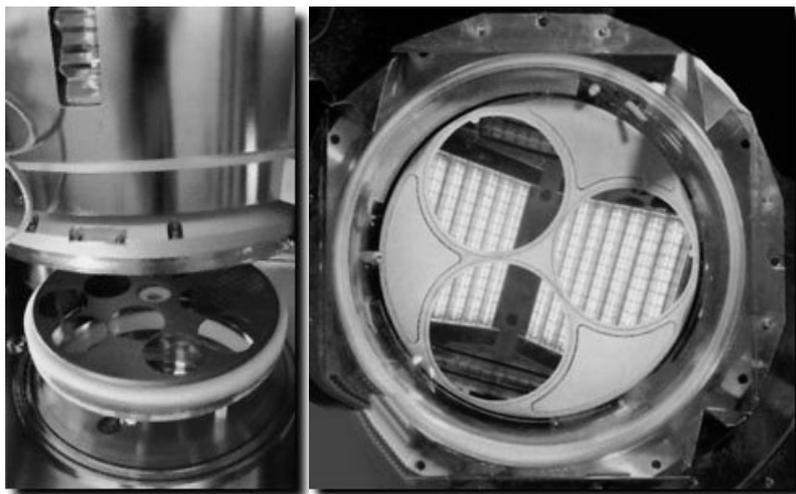


Рис. 1.9.3. Реакторы для эпитаксии

При эпитаксии можно получать как разнотипные (например, n -пленку на p -подложке, и наоборот), так и изотипные p - n -переходы типа n^+-n и p^+-p .

Для обеспечения нужного уровня привносимой дефектности оборудование должно предусматривать газохимическое травление реактора, роботизированную загрузку-выгрузку пластины, систему эффективной фильтрации газов, а также быть совместимым cSMIF-портом.

Для обеспечения низкого уровня привносимой дефектности предусматривается газовое травление камеры после каждой обрабатываемой пластины.

Эпитаксия – наращивание кристаллографически ориентированных

монокристаллических слоев на монокристаллические подложки.

Монокристаллическая подложка в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла. Эпитаксия делится на: гомоэпитаксию и гетероэпитаксию. Гомоэпитаксия (автоэпитаксия) — процесс ориентированного нарастания вещества, не отличающегося по химическому составу от вещества подложки. Например, наращивание эпитаксиальной пленки кремния на подложку из монокристаллического кремния.

Гетероэпитаксия — вид эпитаксии, когда растущий слой отличается по химическому составу от вещества подложки. Например, наращивание эпитаксиальной пленки кремния на сапфире в структурах вида «кремний на сапфире» (КНС).

При гетероэпитаксии кристаллические решетки пленки и подложки должны быть подобны, а параметры решеток близки для обеспечения роста монокристаллического слоя.

При росте пленки по схеме пар (газ) – кристалл процесс осаждения атомов на подложку с образованием и ростом монокристаллических зародышей можно представить следующим образом. При соударении атома с поверхностью подложки он либо адсорбируется на ней, либо возвращается обратно в газообразную фазу (рис. 1.9.4). Процесс адсорбции характеризуется коэффициентом термической аккомодации α_T . После достижения равновесия в адсорбированном слое (равновесие между адсорбированными частицами и зародышами) начинается образование стабильных зародышей конденсируемой фазы (центров новой фазы). Рост и срастание центров новой фазы приводит к образованию эпитаксиальных слоев.

Таким образом, адсорбированный на поверхности подложки атом может участвовать в одном из трех процессов:

- 1) десорбции с поверхности (обычно при больших значениях температуры подложки);
- 2) образовании вместе с другими атомами стабильного зародыша;
- 3) присоединении к уже существующему зародышу.

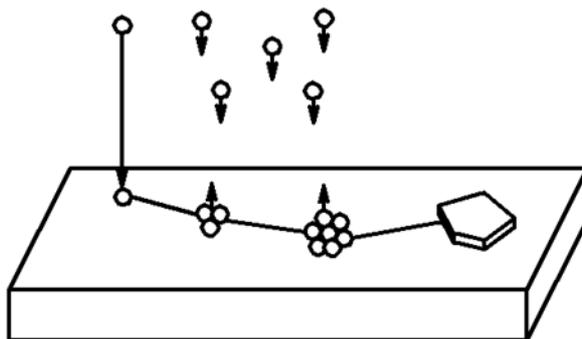


Рис. 1.9.4. Схема осаждения атомов и образования ориентированных зародышей на монокристалл

Режим, при котором происходит адсорбция значительной части падающих на подложку атомов совместно с их миграцией должен быть следующим: — температура поверхности подложки меньше температуры атомов адсорбированного слоя, которая должна быть меньше температуры поступающих на поверхность атомов.

Газофазная эпитаксия позволяет наращивать эпитаксиальные слои из парогазовой смеси. Для ее проведения используется специальное оборудование с пониженным давлением. Установка для газофазного напыления представляет собой кварцевый реактор с нагревателями и газопроводом (рис. 1.9.5). Внутри реактора размещается подложка, которая нагревается до 400...1200 °С. Газовая смесь взаимодействует с подложкой и оседает на ней, образуя эпитаксиальные слои. Добавляя в газовую смесь легирующие элементы возможно получение легированного слоя.

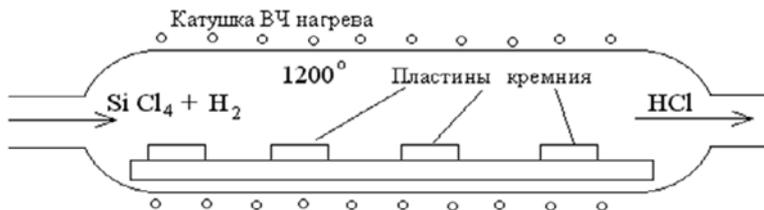


Рис. 1.9.5. Схема получения эпитаксиальных слоев кремния из газовой фазы

Эпитаксиальные методы газофазной эпитаксии основаны на осаждении молекул кремния или германия с помощью химических реакций. Температура нагрева зависит от состава смеси и кинетики химических процессов.

Чаще всего используются следующие химические методы эпитаксии:

- восстановление хлоридов водородом;
- пиролитическое разложение моносилана.

Перед наращиванием с поверхности подложки удаляются все загрязнения, включая мельчайшие пленки окислов. Для этого подложку обрабатывают водородом при очень высокой температуре, происходит восстановление кремния. Затем вводится хлоридный водород, который стравливает верхний слой.

После очищения начинается эпитаксиальное наращивание хлоридным методом, для этого в камеру вводится необходимый газовый состав. Происходит химическое взаимодействие веществ: необходимые элементы оседают на подложку, остальные выводятся из камеры. Это необходимо, чтобы предотвратить перенасыщение пространства камеры продуктами распада, поскольку химическая реакция восстановления процесс обратимый и возможно образование обратной реакции.

Недостаток эпитаксиального метода – необходимость в подогреве до очень высоких температур, что приводит к образованию легированного слоя.

Стадии процесса:

1. Продувка реактора водородом H_2 с целью восстановления пленки окиси кремния, появившейся при транспортировке и хранении подложек до Si .
2. Подача в реактор HCl для стравливания тонкого поверхностного слоя кремния.
3. Подача в реактор смеси тетрахлорида кремния $SiCl_4$ и H_2
 $SiCl_4(\text{газ}) + 2H_2(\text{газ}) = Si(\text{тв.}) + 4HCl(\text{газ})$.

Получение эпитаксиальных слоев кремния на сапфире

Долгое время структура «кремний на сапфире... (КНС) являлась основой для производства радиационно-стойких интегральных схем, что в первую очередь важно для космической промышленности, атомной энергетики и военного применения. Из-за снижения паразитных емкостей повышается быстродействие элементов, а отсутствие необходимости в дополнительной изоляции элементов друг от друга позволяет увеличить степень интеграции элементов.

Сапфировая подложка также позволяет значительно снизить (практически исключить) токи утечки приборов и уменьшить энергопотребление (рис.1.9.6).

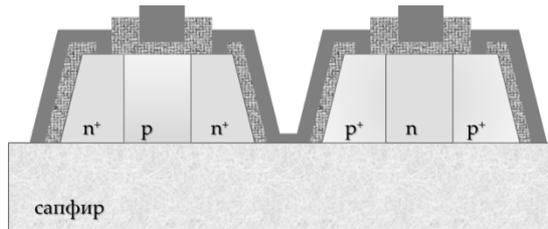


Рис. 1.9.6. Поперечное сечение подложки сапфира с транзисторами на основе технологии КНС

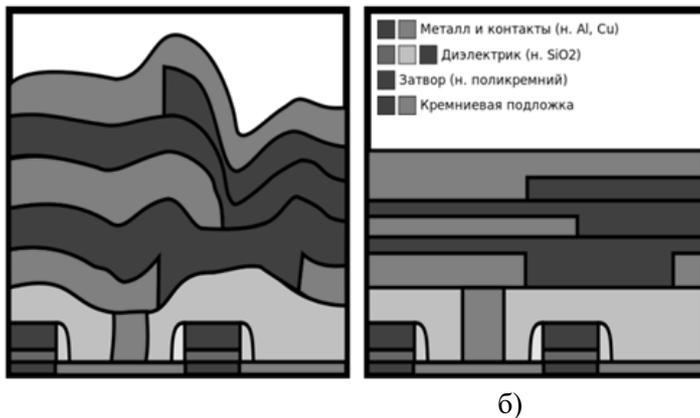
Однако КНС слишком дороги для производства и в настоящее время при производстве радиационно-стойких интегральных схем ее вытеснила структура «кремний на изоляторе» (КНИ).

Химико-механическая планаризация

Химико-механическая планаризация (ХМП) - (англ. *Chemicalmechanicalpolishing, CMP*; также Х.-м. полировка) представляет собой комбинацию химических и механических способов планаризации (удаления неровностей с поверхности изготавливаемой полупроводниковой пластины).

Причину введения ХМП можно понять из рис.1.9.7: на рис. 1.9.7 а показан срез чипа, изготовленного без химико-механической планаризации, видны неровности слоёв; на 1.9.7 б — чип, при производстве которого планаризация проводилась многократно. В результате архитектура чипа становится более идеальной и, как следствие, качество чипов существенно возрастает.

ХМП использует сочетание абразивных и агрессивных химических суспензий (например, коллоидных) и полировальной подушки, большей по площади, чем обрабатываемая пластина. Могут использоваться как круглые полировальные подушки, так и ленты. Пластина устанавливается в специальный держатель и вращается вместе с ним (рис.1.9.8). Держатель прижимает пластину к полировальной подушке. Точность обработки на современных установках ХМП составляет порядка нескольких ангстрем.



а)

б)

Рис. 1.9.7. Схема чипа без применения планаризации (а) и с применением планаризации (б)

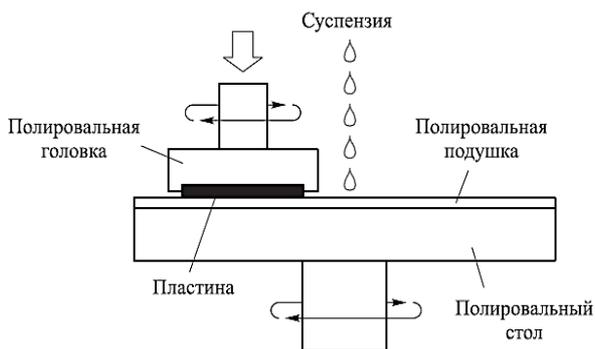


Рис. 1.9.8. Схема химико-механической планаризации

Атомно-слоевое осаждение (АСО)

Атомно-слоевое осаждение (АСО) (англ. *Atomic Layer Deposition, ALD*) — это технология осаждения тонких плёнок, которая базируется на последовательных химических реакциях между паром и твёрдым телом и имеет свойство самоограничения.

Большинство АСО-реакций используют два химических соединения, которые обычно называют прекурсорами.

Такие прекурсоры поочередно вступают в реакцию с поверхностью. В результате многократного влияния прекурсоров происходит рост тонкой плёнки (рис.1.9.9).

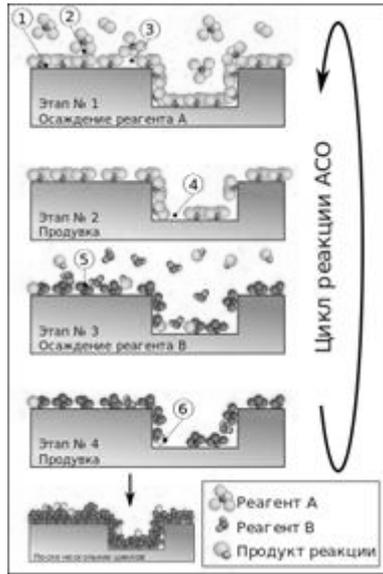


Рис. 1.9.9.Схема атомно-слоевого осаждения

АСО может быть использовано для нанесения нескольких типов тонких плёнок, в том числе разных оксидов (например, Al_2O_3 , TiO_2 , SnO_2 , ZnO , HfO_2), нитридов металлов (например, TiN , TaN , WN , NbN), металлов (например, Ru , Ir , Pt) и сульфидов металлов (например, ZnS).

Рост слоёв материала в АСО состоит из таких характерных четырех этапов, которые циклически повторяются:

1. Действие первого прекурсора.
2. Удаление из реактора непрореагировавших прекурсоров и газообразных продуктов реакции.
3. Действие второго прекурсора или другая обработка для активирования поверхности перед применением первого прекурсора.
4. Удаление из реактора остатков реагентов.

Окисление, осаждение, отжиг

Маршрут изготовления БИС включает в себя операции термического окисления кремния, осаждения Si_3N_4 , осаждения поликристаллического кремния. Технологический процесс создания подзатворного диэлектрика должен обеспечить:

- толщину 10 нм и разброс $< 2\%$;
- фиксированный заряд $< 1,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$;
- подвижный заряд $< 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$;
- плотность дефектов $< 0,2 \text{ см}^{-2}$.

Для реализации указанных параметров технологический процесс окисления должен включать следующие операции:

1. Газохимическая очистка (ГХО) пластин в парах HF (стварливание естественного оксида с удалением примеси металлов) непосредственно на установке окисления перед загрузкой в реактор. Пластины после ГХО и в процессе загрузки должны находиться в контролируемой азотной среде. Применение ГХО позволяет снизить уровень загрязнения металлами на 1–2 порядка.
2. Для снижения термического бюджета уже сформированного канала и сокращения времени на нагрев и охлаждение пластин температура окисления не должна превышать 1120–1170°C. Для пластин диаметром 200 мм с целью минимизации эффекта коробления рекомендуемая скорость нагрева – менее 10°C/мин, а охлаждения – менее 3°C/мин. Массивные пластины требуют применения специальной термостабилизации в течение 15–30 мин после вывода печи на температурный режим (700...900°C).
3. Подзатворный оксид должен формироваться пироженным влажным окислением с последующим отжигом в хлорсодержащей среде при 850°C (рис.1.9.10). Пироженное окисление, в отличие от сухого, повышает устойчивость оксида к электрическому пробую.
4. Важным является применение приёма предокисления (2нм) при 700°C (в сухом кислороде) перед выводом печи на рабочий режим 850°C. Этим исключается возможная эрозия поверхности кремния, которая способна резко снижать электрическую прочность подзатворного оксида.
5. Разгрузка пластин должна осуществляться при температуре 600°C после завершения медленного охлаждения в чистом азоте, релаксирующего механические напряжения при сохранении низкой плотности поверхностных состояний.
6. Для обеспечения гарантированного контроля газовых сред в реакторе и сокращения временных потерь при замене среды целесообразно использование вакуумной откачки.
7. Реализация принципа интеграции процессов на базе универсального реактора вертикального типа с формированием узла подзатворного оксида и затвора в едином процессе без перезагрузки.

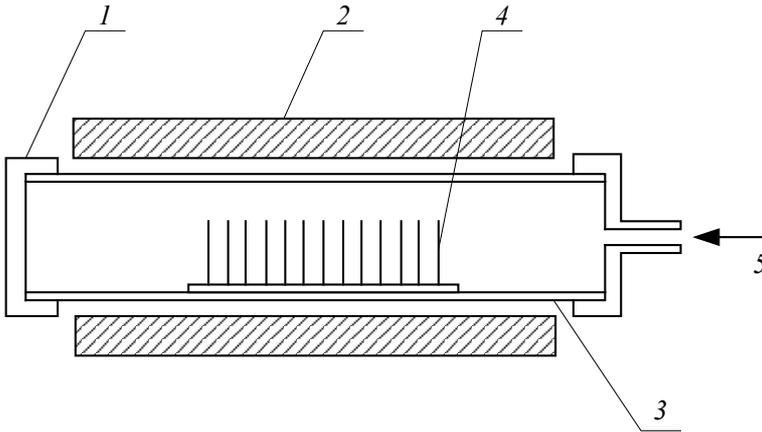


Рис.1.9.10. Камера отжига:
 1 – заглушка; 2 – 3-зонная печь; 3 – реактор (кварцевая трубка);
 4 – подложки; 5 – поступление кислорода или пара

Отжиг также требуется после некоторых других операций. Так после операции ионной имплантации сильно повреждается кристаллическая структура монокремния, поэтому обязательно нужен послеимплантационный отжиг (рис. 1.9.11).

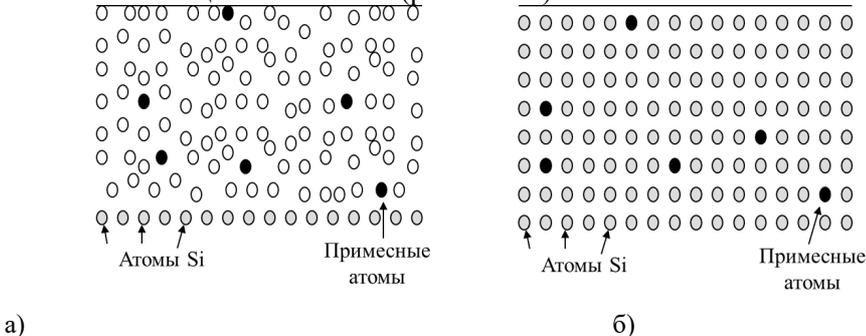


Рис. 1.9.11. Структура приповерхностного слоя кремния после ионного легирования примесей (а) и после послеимплантационного отжига (б)

При формировании силицидов металлов (в частности, $TiSi_2$, WSi_2 , $CoSi_2$, $MoSi_2$), которые в настоящее время используются в качестве затвора, межсоединений и обкладок конденсаторов, используется операция возбуждающего отжига (рис. 1.9.12) – термического процесса, в котором различные атомы связываются друг с другом формируя металлический сплав.

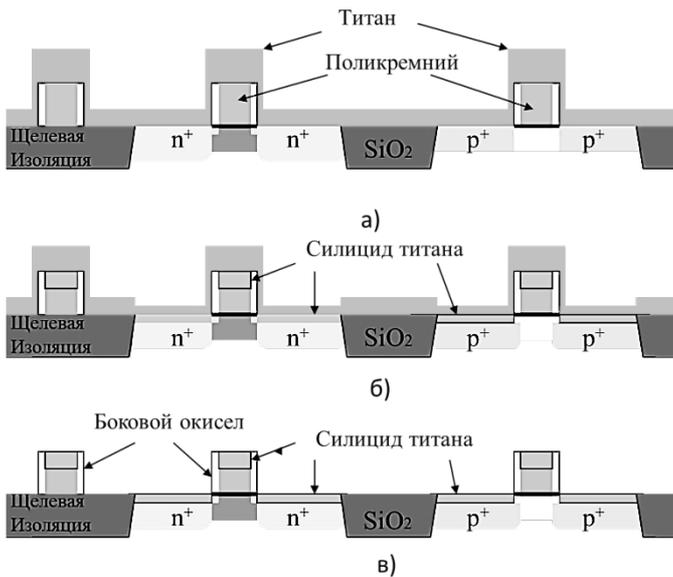


Рис. 1.9.12. Формирование контактов из силицида титана: а – осаждение титана; б – возбуждающий отжиг; в – удаление титана

Технологический процесс формирования силицида титана включает в себя следующие операции:

- очистка в потоке аргона;
- PVD- нанесение титана на кремний;
- скоростной термический отжиг при температуре около 700 °С;
- Удаление титана с помощью $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$.

Еще одной термической операцией, которая может быть использована при производстве интегральных схем – повторное оплавление (рис. 1.9.13), которое позволяет сделать поверхность диэлектрика более ровной.

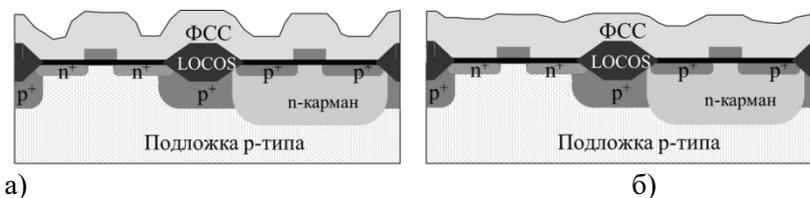


Рис. 1.9.13. Поверхность подложки, покрытая фосфорсиликатным стеклом: а – до повторного оплавления; б – после повторного оплавления

Данная операция используется после пассивации поверхности, при которой подложка покрывается пассивирующим диэлектриком. В качестве такого диэлектрика может использоваться нелегированное силикатное

стекло (SiO_2), однако оно размягчается при очень высокой температуре $T > 1500^\circ C$ и оплавится из-за поверхностного натяжения. При этом фосфорсиликатное стекло (ФСС) и борофосфорсиликатное стекло (БФСС) размягчаются при значительно более низкой температуре ($< 1100^\circ C$ вплоть до $850^\circ C$). Кроме того, фосфор также может присоединить натрий (рассосать объемный заряд на границе раздела SiO_2-Si). В результате обычно в качестве пассивирующего диэлектрика используют ФСС и БФСС.

Повторное оплавление обычно проводится в среде N_2 . Иногда также используется выпаривание H_2O , которое помогает заполнить поры непрокисленных участков окислом.

1.9.3. НАНЕСЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

С уменьшением минимального размера элемента до 0,8–1,2 мкм и тем более до 0,5–0,7 мкм сложность рельефа металлизации на поверхности кристалла значительно увеличивается. Отношение высоты рельефа к ширине зазора в ряде случаев возрастает до двух и более. При стандартных способах нанесения металлических и диэлектрических слоев на дне и стенках углублений рельефа толщина их получается очень неоднородной, вплоть до возникновения обрыва. Основные способы планаризации рельефа металлизации основаны на заполнении зазоров между проводниками и диэлектриком с последующим устранением диэлектрических выступов над проводниками специальными методами обратного травления или химико-механической полировкой. Однако широко распространенные вакуумные и газофазные методы нанесения диэлектрических пленок в узких и глубоких зазорах могут образовать пустоты, которые в процессе планаризации открываются, создавая щелевой рельеф на поверхности кристалла. Плазменные методы нанесения диэлектрических пленок при наличии электрического смещения на подложку и, в частности, с использованием высокоплотной плазмы решают проблему при наличии регулярного рельефа. Однако в реальных схемах на поверхности кристалла еще до нанесения диэлектрической пленки могут возникать узкие глубокие щели в силу различных технологических отклонений, например из-за рассовмещения рельефа различных уровней слоев, а также из-за отклонений при локальном травлении (изменение размера элемента, формирование отрицательного клина травления). Из-за непредсказуемости места расположения и формы таких щелей невозможно подобрать режим нанесения диэлектрической пленки с контролируемой (одинаковой на дне щели и на открытой части кристалла) скоростью осаждения (рис.1.9.14).

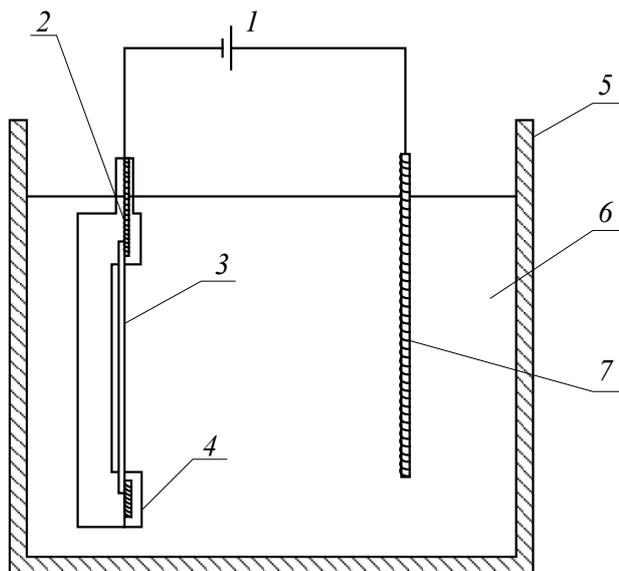


Рис.1.9.14. Нанесение пленок из жидкой фазы:

- 1 – разность потенциалов; 2 – электрическое соединение; 3 – подложка;
 4 – держатели подложки; 5 – контейнер; 6 – электролит;
 7 – второй электрод

По мнению специалистов фирмы «*Applied Materials Inc.*» (США) (другого разработчика такого оборудования), этот метод используется при формировании микросхем с минимальными размерами элементов 0,35 мкм. При использовании жидкофазного золь-гель способа нанесения пленки все щели на поверхности кристалла гарантированно заполняются пленкообразующим раствором с последующим образованием сплошной диэлектрической пленки. В зарубежной литературе способ формирования диэлектрических слоев из растворов на центрифуге называется *Spin on Glass (SOG)*. Однако этим способом нельзя достичь полной планаризации, т. е. плоской поверхности кристалла. При минимальных размерах элементов менее 0,4–0,5 мкм, чтобы обеспечить необходимую разрешающую способность оптической литографии, необходимо *SOG*-планаризацию совмещать с ХМП, которая способна создать практически плоскую поверхность кристалла. Область размеров 0,5–0,7 мкм является переходной, когда желательно, но не обязательно, использовать ХМП. По заявлению специалистов фирмы «*Applied Materials Inc.*» (разработчиков оборудования для ХМП), в области размеров 0,5–0,7 мкм примерно половина производителей микросхем использует ХМП-способ планаризации, а половина обходится только применением *SOG*. Вообще, способ сглаживания и планаризации рельефа поверхности кристалла методом *SOG*

в настоящее время широко используется многими ведущими фирмами-изготовителями кремниевых микросхем.

Один из вариантов маршрута формирования планаризованной межуровневой изоляции с использованием *SOG*-слоев состоит из следующих основных операций:

1. На поверхность проводников осаждается слой диэлектрика PECVD SiO₂ толщиной 0,1 мкм. Лучшую конформность имеют пленки ТЭОС-О₃ SiO₂ на основе ТЭОС.
2. Затем наносится APCVD SiO₂ на основе ТЭОС-О (система Watkins Johnson) толщиной до 1 мкм. При этом узкие зазоры схлопываются, на более широких остается такой же рельеф с вертикальными стенками. Сочетание в одной установке PECVD и APCVD SiO₂ увеличивает производительность, уменьшает дефектность.
3. Далее наносится один или два слоя SOG с окончательной толщиной 0,3 мкм с отжигом при 700 К.
4. ПХТ SOG и APCVD SiO₂ на толщину 0,8 мкм с селективностью 0,8.
5. Нанесение второго слоя PECVD SiO₂ и доведение общей толщины диэлектрика между металлами примерно до 1,0 мкм.
6. Далее идут операции по вскрытию контактных окон в изолирующем диэлектрике.

Описанный маршрут формирования планаризованной межуровневой изоляции может быть использован до проектных норм 0,4 мкм.

Выбирая соответствующие материалы растворов и используя кластерное оборудование для нанесения пленки вышележащего уровня металла, можно существенно упростить процесс формирования планаризованной межуровневой изоляции. Это достигается за счет отказа от ПХТ SOG (процесс «No etchback»). В этом случае можно ограничиться нанесением на поверхность проводников M1 только одного слоя PECVD SiO₂ толщиной до 0,3 мкм, далее формируется слой SOG, который в камере нанесения второго слоя PECVD подвергается дополнительному обезгаживанию.

Чтобы исключить выделение активных газов из открытой прослойки SOG в процессе нанесения M2, производится ее обезгаживание и нанесение первой части слоя M2 при относительно низкой температуре подложки. Далее в следующей камере наносится основная толщина проводящего слоя при повышенной температуре. Этот вариант в настоящее время приобретает все большее применение.

В последнее время появились работы, показывающие значительные достижения в области нанесения диэлектрических пленок из жидкой фазы. Найдены материалы и способы формирования слоев с существенно более низкими значениями диэлектрической постоянной (до 1,5–2,0, а стандартные материалы и способы нанесения диэлектрических слоев

позволяют уменьшить это значение только до 3,8–4,0). Необходимость уменьшения диэлектрической постоянной изолирующей пленки диктуется тем, что при размерах элементов менее 1,0 мкм время задержки сигнала в большей степени начинает зависеть от параметров (RC) соединений. Процесс формирования таких пленок связан с использованием процесса термообработки слоев в атмосфере инертного газа высокого давления. По литературным данным, аналогичная термообработка позволяет также полностью заполнять алюминием объем контактных окон между уровнями металлизации.

Толщина формируемых современными методами диэлектрических пленок из жидкой фазы может достигать 1,0–1,5 мкм без признаков растрескивания. Такие пленки могут обладать значительно меньшими механическими напряжениями, чем пленки, сформированные плазмохимическим или газофазным способами, а также они имеют барьерные свойства против миграции щелочных ионов.

Требования к растворам. В табл. 1.9.1. указаны основные требования к растворам при нанесении диэлектрических пленок из жидкой фазы.

Время жизни свежеприготовленного планаризирующего раствора при хранении в холодильнике при температуре -4°C и раствора ФПТ-1-40 при хранении в комнатных условиях в затененных бутылках – более 6 месяцев.

Таблица 1.9.1.

Требования к планаризирующим растворам

	<i>SIL</i>	<i>MEMOSIL</i>	<i>PHEMOSIL</i>
Толщина пленки, нм	100–110	190–210	190–210
Вязкость, сР	2,8–3,0	2,85–2,95	2,8–2,9
Плотность, г/см ³	0,856–0,858	0,858–0,860	0,860–0,862
Проводимость, Ом·см ⁻¹	(2–6) ⁻⁵	(2–6) ⁻⁵	(2–5) ⁻⁵
Показатель преломления	1,393–1,395	1,393–1,395	1,397–1,4
pH	2,3–2,8	1,5–2,0	1,8–2,2
Диэлектрическая постоянная пленки	6–7	3–4	4–5

Обозначения: *SIL* – силикатные; *MEMOSIL* – метилсилоксановые; *PHEMOSIL* – фенилсилоксановые.

Требования к планаризирующей и пассивирующей пленке:

1. Толщина планаризирующих пленок на плоской пластине может варьироваться в пределах 0,1–0,5 мкм. Неравномерность толщины пленки на плоской поверхности пластин диаметром 150 мм – менее $\pm 5\%$.

2. Сформированные на поверхностях структур $Al-SiO_2$ и Si^*-SiO_2 планаризирующие слои не должны растрескиваться и шелушиться.
3. Коэффициент планаризации рельефа металлизации с шириной зазора 0,5–0,7 мкм – более 0,7, а для зазоров 0,8–1,2 мкм – более 0,5.
4. Планаризирующие пленки должны выдерживать нанесение слоев в кислород- или азотсодержащей плазме.
5. Привнесенная дефектность (размером $> 0,2$ мкм) после нанесения планаризирующей или пассивирующей пленок – не более $0,05 \text{ см}^{-2}$.
6. Процесс формирования планаризирующей пленки и пассивирующей пленки изменяет пороговые напряжения МДП-транзисторов не более чем на $\pm 5\%$.
7. Состав планаризирующих слоев: силикатные – SIL (SiO_2 , БФСС), органосиликатные (*MEMOSIL* – метилсилоксановые и *PHEMOSIL* – фенилсилоксановые).
8. Толщина пассивирующих пленок – 1–2 мкм. В процессе технологических обработок, включая и термообработку при температуре 450 К, пленки не растрескиваются и не отслаиваются. Цвет и механические свойства пассивирующей пленки позволяют использовать процесс автоматизированной сборки кристаллов в пластмассовый корпус.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 9

Вопрос 1	С помощью какой операции можно нанести монокристаллический слой кремния?
Ответы:	
1	Эпитаксия
2	Химико-механическая планаризация
3	Отжиг
Вопрос 2	Для чего используется повторное оплавление?
Ответы:	
1	Планаризации пассивационного диэлектрика
2	Образования переходных соединений
3	Окисления поверхности