

Элионная технология в микро- и наноиндустрии

Характеристика и особенности травления с применением газового разряда

Классификация процессов вакуум-плазменного травления

Плазму низкого давления широко используют для травления топологических элементов микронных размеров при изготовлении интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов.

Плазменное травление повсеместно заменяет жидкостное, вследствие более высокого разрешения, приспособленности к автоматизации и возрастающим объемам производства.

Процесс плазменного травления характеризуется:

- повышенной скоростью;
- анизотропией;
- селективностью;
- загрузочным эффектом;
- текстурой.

Под анизотропией при плазменном травлении понимают преимущественное удаление материала пластины в направлении, перпендикулярном ее поверхности.

Классификация процессов вакуум-плазменного травления

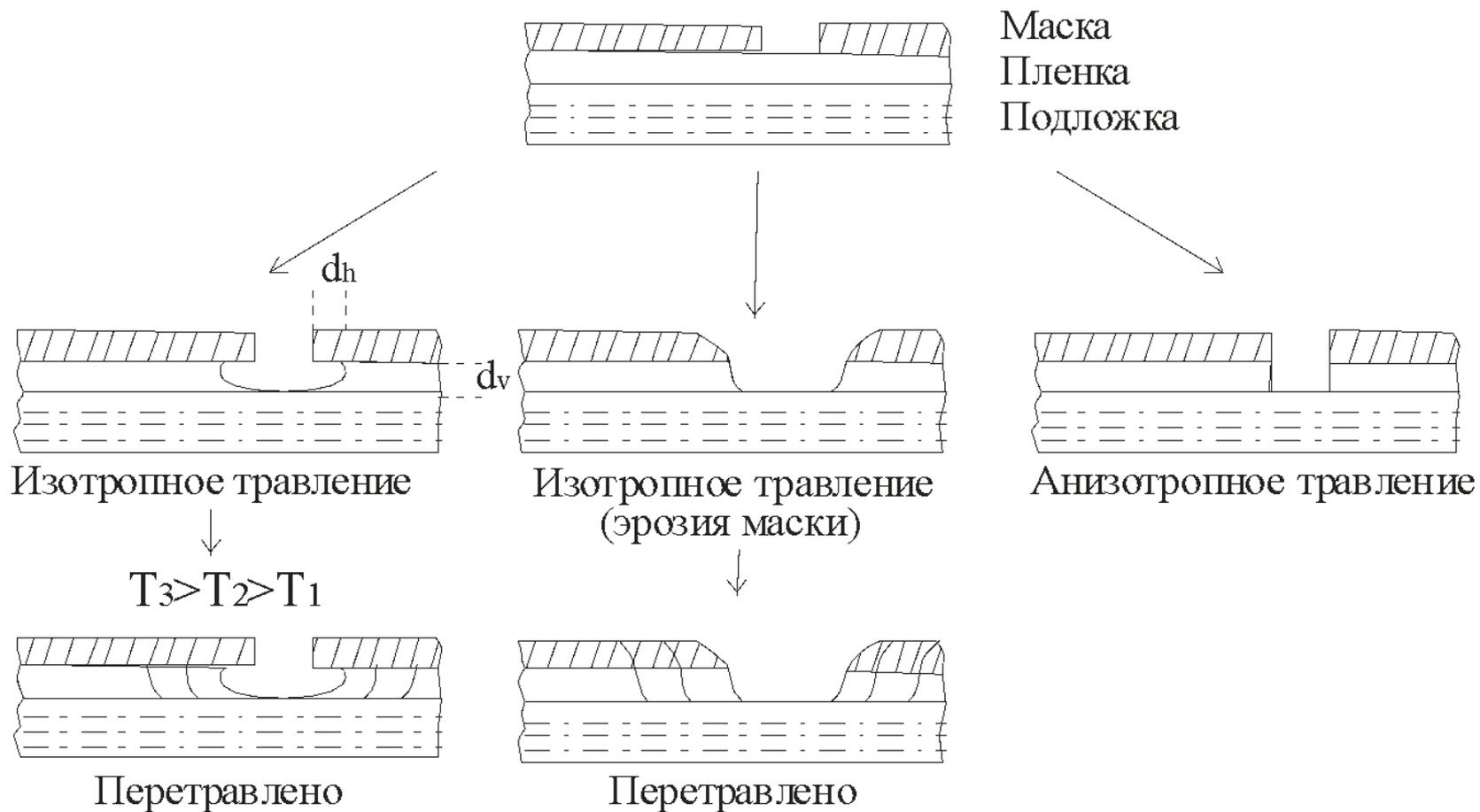
Селективность - это отношение скоростей травления двух различных материалов, например Si и SiO₂, в одной и той же плазме.

Понятие «загрузочный эффект» отображает степень обеднения газовой фазы активным травителем, вследствие его расхода в процессе травления.

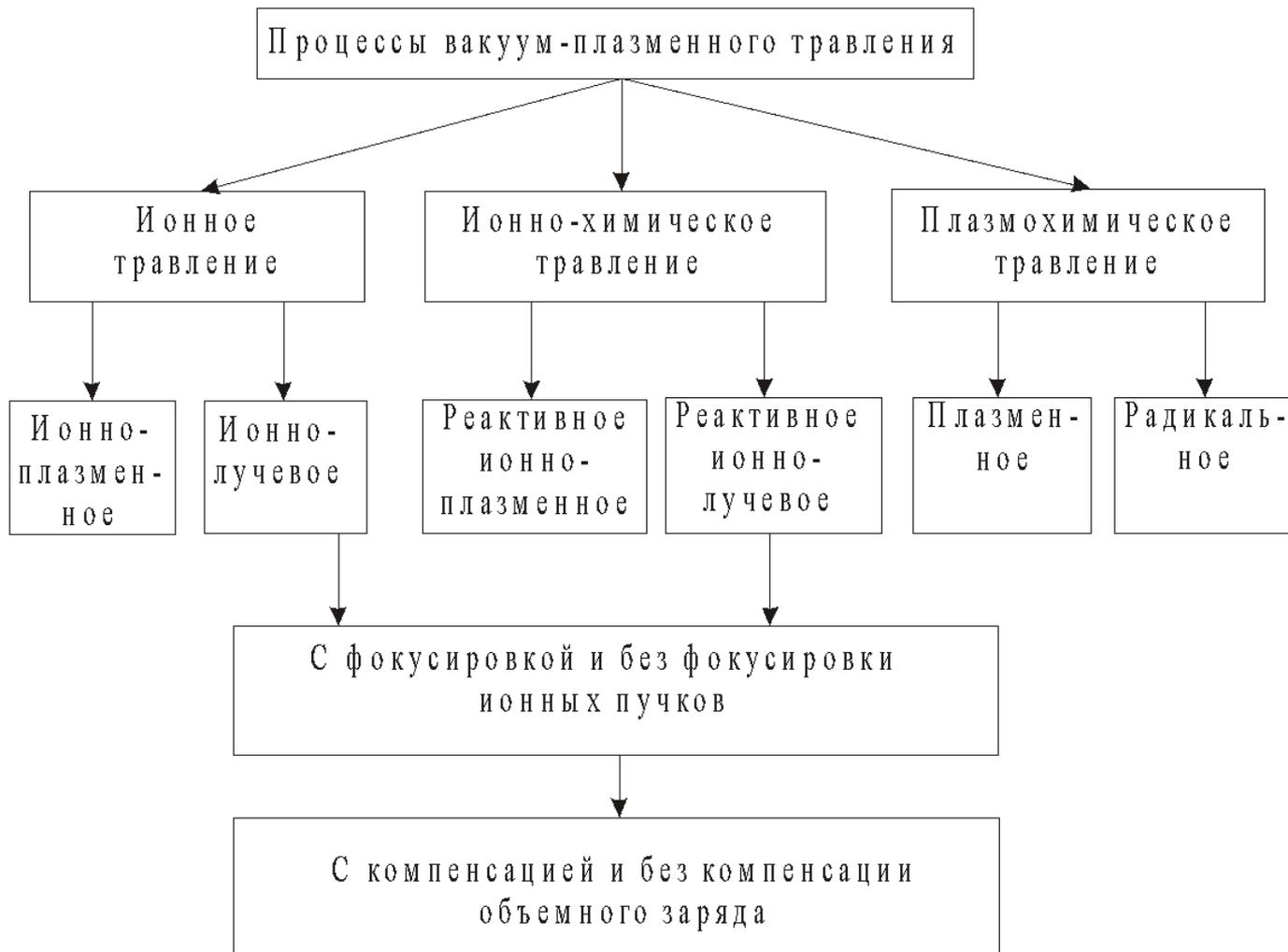
При травлении в плазме, в ряде случаев, исходная гладкая поверхность сохраняется, тогда как при использовании других травителей она становится неровной или **текстурированной**.

Газ для плазменного травления может быть выбран в соответствии с типом материала, подвергаемого травлению, и требованиями к селективности по отношению к другим материалам, экспонируемым в плазме, а также с учетом анизотропии, поверхностной текстуры, степени влияния загрузочного эффекта и предотвращения осаждения полимеров.

Профили структур в случае изотропного и анизотропного травления



Классификация процессов вакуум-плазменного травления



Классификация процессов вакуум-плазменного травления

Ионное травление (ИТ), процесс при котором для удаления поверхностных слоев материала используется **кинетическая энергия** ионов инертных газов.

В зависимости от способа получения ионов и среды, в которую помещаются образцы, ИТ подразделяется на:

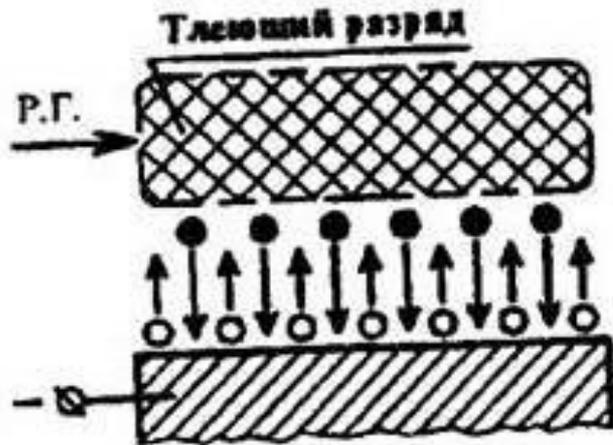
- ***ионно-плазменное травление*** (образцы помещаются на отрицательный электрод газоразрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы разряда);

- ***ионно-лучевое травление*** (образцы помещаются на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируются ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника).

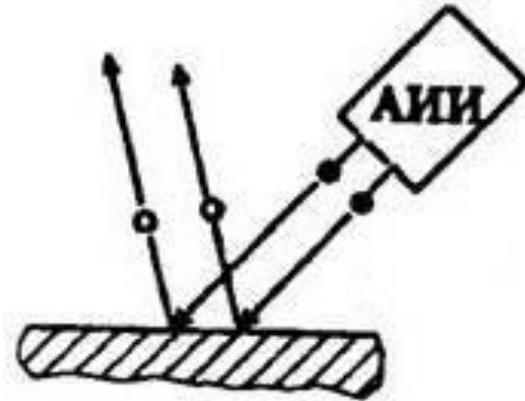
При ионно-лучевом травлении может применяться фокусировка ионных пучков с помощью электрических и магнитных полей, а также компенсация их объемного заряда с помощью инжекции электронов.

Ионное травление

Ионно-плазменный



Ионно-лучевой



Классификация процессов вакуум-плазменного травления

Плазмохимическое травление (ПХТ), процесс при котором удаление поверхностных слоев материала идет за счет протекания химических реакций между ионами и радикалами активного газа (или пара) и атомами (или молекулами) обрабатываемого материала с образованием летучих стабильных соединений.

В зависимости от среды, в которую помещаются образцы, ПХТ подразделяется на:

- **плазменное травление** (образцы помещаются в газоразрядную плазму химически активных газов)

- **радикальное травление** (образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от газоразрядной химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами или электрическими и магнитными полями, а травление осуществляется незаряженными химически активными частицами: свободными атомами и радикалами, поступающими из газоразрядной плазмы)

Плазмохимическое травление

Реактор для плазменного травления с емкостным разрядом

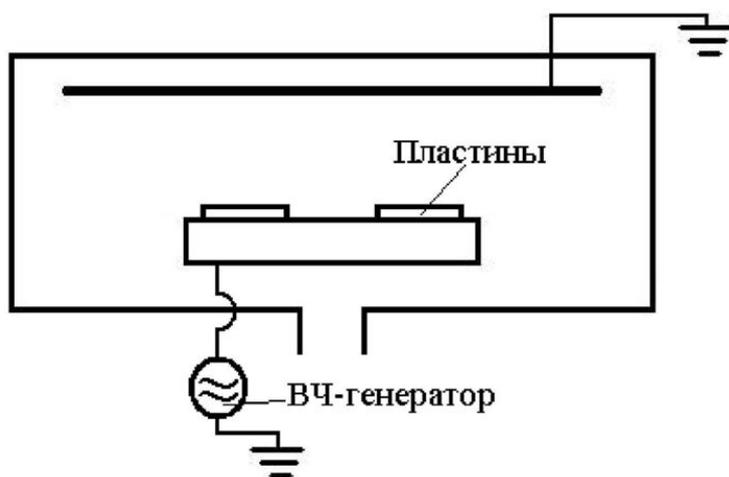
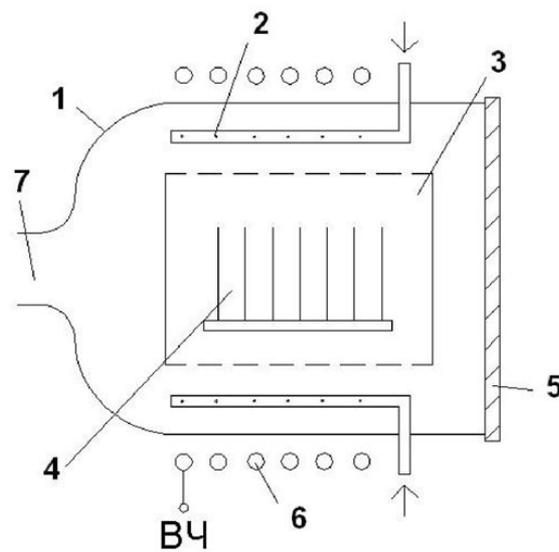


Схема ПХТ с индукционным (разрядом)



1 - кварцевый реактор; 2-коллектор для подачи газа; 3 – перфорированный корпус; 4 – подложки; 5 - крышка ; 6 – ВЧ - индуктор; 7 - откачной патрубков

Классификация процессов вакуум-плазменного травления

Ионно-химическое травление (ИХТ), процесс при котором для удаления поверхностных слоев материала используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала. В зависимости от способа получения ионов и среды, в которую помещаются образцы, ИХТ подразделяется на:

- **реактивное ионно-плазменное травление** (образцы помещаются на электрод газоразрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами химически активных газов, вытягиваемых из плазмы разряда)
- **реактивное ионно-лучевое травление** (образцы помещаются на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируются ионами химически активных газов, вытягиваемыми из автономного ионного источника)

Преимущества процессов вакуум-плазменного травления

ИТ применяется для:

- **очистки поверхностей** различных, материалов от загрязнений и адсорбированных газов с целью получения атомно-чистых поверхностей, используемых в качестве подложек при нанесении пленок и образцов в электронно-микроскопических исследованиях (для отмеченных задач ИТ обладает наибольшей эффективностью из известных способов поверхностной очистки материалов)
- **выявления строения поверхностных слоев** материалов и приготовления образцов в металлографических исследованиях (в том числе для обнаружения различий в строении сложных биологических структур)

Преимущества процессов вакуум-плазменного травления

ИТ применяется для:

- **фрезерования поверхностей пластин ортоферритов и гранатов**, используемых при создании ЗУ на цилиндрических магнитных доменах, с целью повышения подвижности доменов за счет улучшения структуры их поверхностей
- **трехмерной микрообработки материалов** с целью придания им необходимой формы и размеров
- **полировки оптических поверхностей** (поверхностные слои материалов получают с меньшим числом дефектов, чем при полировке в химических травителях)
- **получения особо тонких (10÷30 мкм) пластин** из различных материалов, для СВЧ резонаторов, масок рентгенолитографии и др.

Преимущества процессов вакуум-плазменного травления

Наиболее важное применение ИТ связано с получением **заданных конфигураций элементов в слоях рабочих материалов.**

Жидкостное химическое травление (ЖХТ) через фоторезистивные маски (ФР), имеет ряд существенных недостатков:

- подтравливание материалов под ФР масками, которое ограничивает точность и разрешающую способность воспроизведения заданной конфигурации и накладывает жесткие требования на адгезию ФР масок к материалам
- большая неровность края получаемых в рабочем материале микроструктур, что связано с преимущественным протеканием ЖХТ вдоль границ зерен и микродефектов материала

Преимущества процессов вакуум-плазменного травления

Недостатки ЖХТ:

- необходимость подбора специального травителя для каждого материала (состав травителей обычно сложный)
- разрушение ФР масок в сильных химических травителях (используемых при травлении таких материалов, как нитрид кремния или керметы), что требует создания дополнительных масок из окиси кремния или других материалов
- необходимость удаления продуктов химических реакций с поверхностей рабочих материалов и остатков травителя, что требует проведения вспомогательных операций очистки, промывки и сушки

Преимущества процессов вакуум-плазменного травления

Ионное травление позволяет применять этот процесс для травления любых материалов: **металлов, полупроводников, диэлектриков, органических соединений** и др., а следовательно отпадает необходимость разработки специальных травителей.

При ИТ можно обеспечить такой режим, при котором:

- практически исключается подтравливание под маску;
- достигается высокий коэффициент анизотропии травления;
- снижаются требования к адгезии маскирующих материалов;
- сохраняются топологические размеры формируемых на рабочем слое элементов;
- не требуются вспомогательные операции очистки, промывки и сушки обрабатываемых образцов.

Кроме того, что процессы ИТ проводятся в вакуумных камерах, а это обеспечивает высокую стерильность процесса.

Недостатки процесса ИТ

- малая скорость травления рабочих слоев;
- эффект задубливания ФР масок после ИТ, что вызывает значительные трудности при их последующем удалении;
- возникновение радиационных дефектов, к которым особенно чувствительны МОП-структуры.

Существенным недостатком ИТ является **низкая селективность** процесса при одновременном травлении нескольких материалов, поскольку большинство из них имеют близкие по значению коэффициенты распыления, а следовательно, и скорости травления. Поэтому приходится применять ФР маски значительной толщины, что уменьшает разрешающую способность метода и увеличивает эффект переосаждения распыленного материала, который изменяет конфигурацию микроскопической структуры при переносе изображения с маски на подложку.

Преимущества процесса ПХТ

В основе ПХТ лежат химические реакции между атомами или молекулами обрабатываемых материалов и радикалами (ионами) химически активных газов или паров, то что обеспечивает **высокую селективность** травления материалов, не уступающую селективности ЖХТ.

При одних и тех же удельных мощностях разряда и давлениях рабочего газа ПХТ позволяет получать на порядок большие скорости травления материалов по сравнению с ИТ. Возможность проведения ПХТ в газоразрядной плазме, а также в пространстве, отделенном от плазмы перфорированными металлическими экранами и электрическими и магнитными полями, позволяет существенно уменьшить радиационные повреждения микроэлектронных структур.

При этом, после ПХТ, так же как и после ионного травления, не нужны вспомогательные операции очистки, промывки и сушки обрабатываемых образцов.

Преимущества процесса ПХТ

ПХТ применяется для:

- **удаления ФР масок** с поверхности рабочих материалов, после их травления.
- **очистки поверхностей материалов** от органических и неорганических загрязнений перед началом эпитаксиального наращивания или вакуумной конденсации.
- **обработки поверхностей контактных площадок** перед приваркой выводов ИС с целью повышения качества межсоединений.
- **подгонки номиналов керметных резисторов.**
- **подготовки образцов для электронной микроскопии.**

Преимущества процесса ПХТ

ПХТ позволяет:

- отказаться от применения сложных и дорогостоящих травителей;
- уменьшить боковое подтравливание и неровность края получаемых микроэлектронных структур (величину клина травления можно регулировать изменением ВЧ мощности, прикладываемой к реактору);
- повысить точность и разрешающую способность травления;
- сократить технологический цикл процесса травления, устранив операции очистки, промывки и сушки пластин материалов;
- использовать при травлении таких материалов, как кремний и нитрид кремния, ФР маски, исключая при этом из технологического процесса операции выращивания, травления и удаления дополнительного слоя двуокиси кремния;
- совместить в одном реакторе операцию травления рабочего материала с последующей операцией удаления ФР маски.

Ионно-лучевое травление

Удаление поверхностных слоев при ионно-лучевом травлении (ИЛТ) осуществляется в результате физического распыления и зависит от оптимального выбора режимов всех составляющих стадий этого процесса.

Основными стадиями ИЛТ являются:

- генерация ионов;
- распространение пучка ионов в вакууме;
- взаимодействие пучка ионов инертного газа с поверхностью обрабатываемого материала.

При распространении ионного пучка в вакууме на процесс ИЛТ влияют **длина свободного пробега ионов, объемный заряд, расходимость и состав пучка.**

Длина свободного пробега ионов определяется сечениями процессов взаимодействия частиц в пучке и должна превышать ***расстояние между источником ионов и подложкой.***

Ионно-лучевое травление

К основным процессам взаимодействия относятся:

- упругие взаимодействия с потерей энергий и импульсов;
- перезарядка;
- диссоциация молекулярных ионов.

Поскольку объемный заряд ионов вызывает **расходимость пучка** и существенно **снижает скорость травления** диэлектрических материалов, он должен быть нейтрализован пучком электронов.

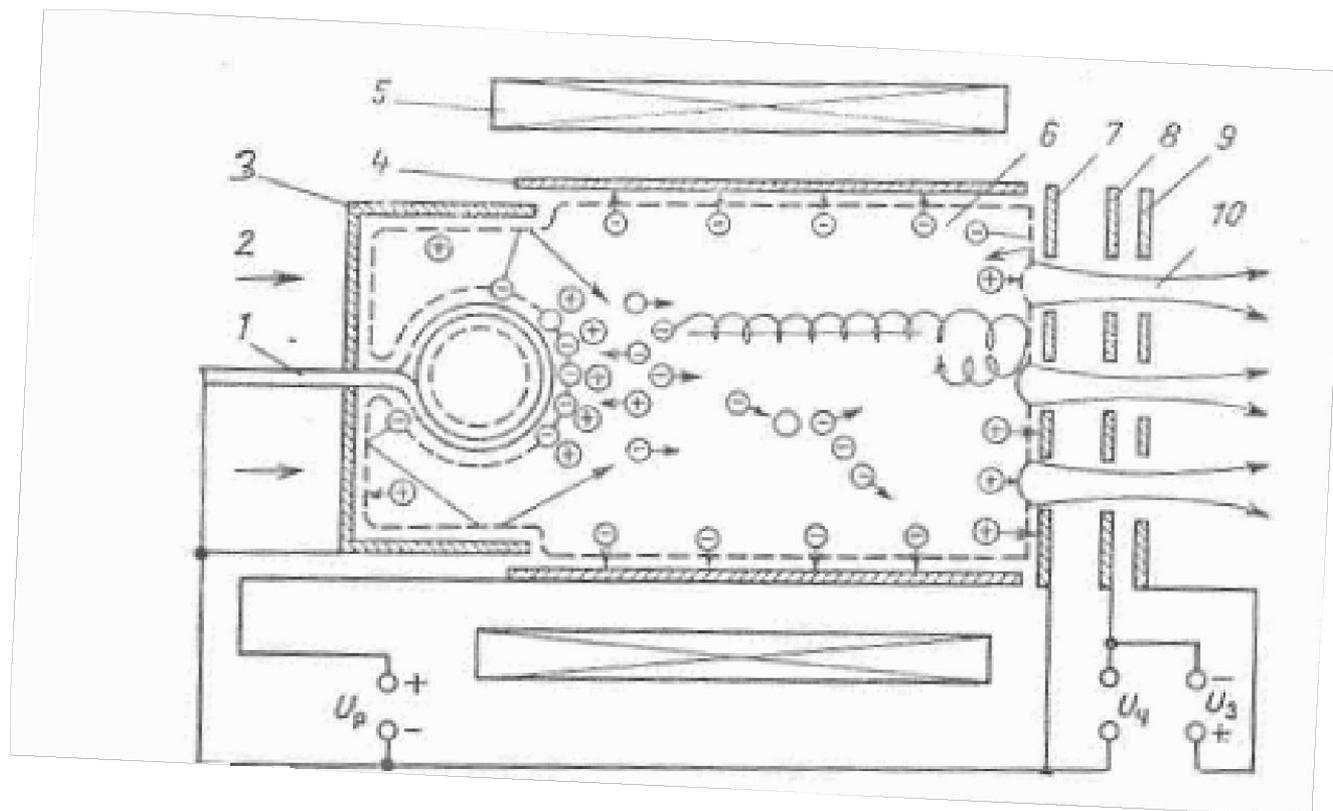
Расходимость пучка помимо объемного заряда зависит также от конструктивных особенностей источника ионов, их энергии и плотности тока. Она отрицательно сказывается на анизотропии ИЛТ (особенно при обработке неподвижных мишеней) энергетическими ионами инертных газов или ионами, которые химически не реагируют с обрабатываемым материалом.

Ионно-лучевое травление

Процессы ИЛТ реализуются с помощью автономных ионных источников, в качестве которых могут быть использованы источники:

- на базе **ускорителей с анодным слоем (УАС)**;
- на базе **ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП)**;
- для прецизионного травления микроструктур наиболее широкое применение нашли **многопучковые ионные источники (МИИ)**, которые называются **источниками Кауфмана**.

Ионно-лучевое травление



1 – термокатод; 2 – место ввода рабочего газа; 3 – экран катода; 4 – цилиндрический анод; 5 – соленоид; 6 – плазма; 7 – отражательно-эмиссионный электрод; 8, 9 – ускоряющий и замедляющий электроды; 10 – ионный пучок; U_p – напряжение разряда; U_u – ускоряющее напряжение; U_a – замедляющее напряжение

Ионно-лучевое травление

В МИИ эмитированные катодом первичные электроны, ускоряющиеся в области катодного падения потенциала, движутся в плазме по спиральным траекториям вдоль магнитного поля и, осциллируя в потенциальной яме между катодом и отражательно-эмиссионным электродом, ионизуют рабочий газ.

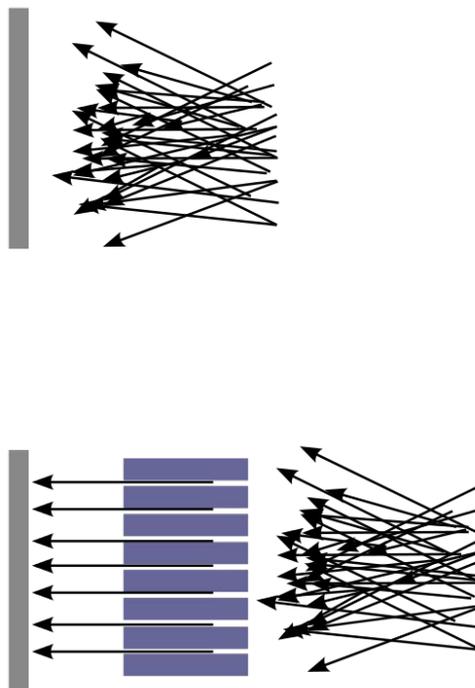
Благодаря осцилляциям время жизни электронов и вероятность ионизации ими рабочего газа существенно увеличиваются, в результате чего в стационарном разряде достигается плотность плазмы около 10^{12} см⁻³ уже при давлении порядка 10^{-2} Па и напряжении до 25 В.

Отражательно-эмиссионный электрод имеет отверстия, соосные с отверстиями в ускоряющем и замедляющем электродах. Таким образом, все три электрода образуют ионно-оптическую систему (ИОС), с помощью которой формируется ионный пучок.

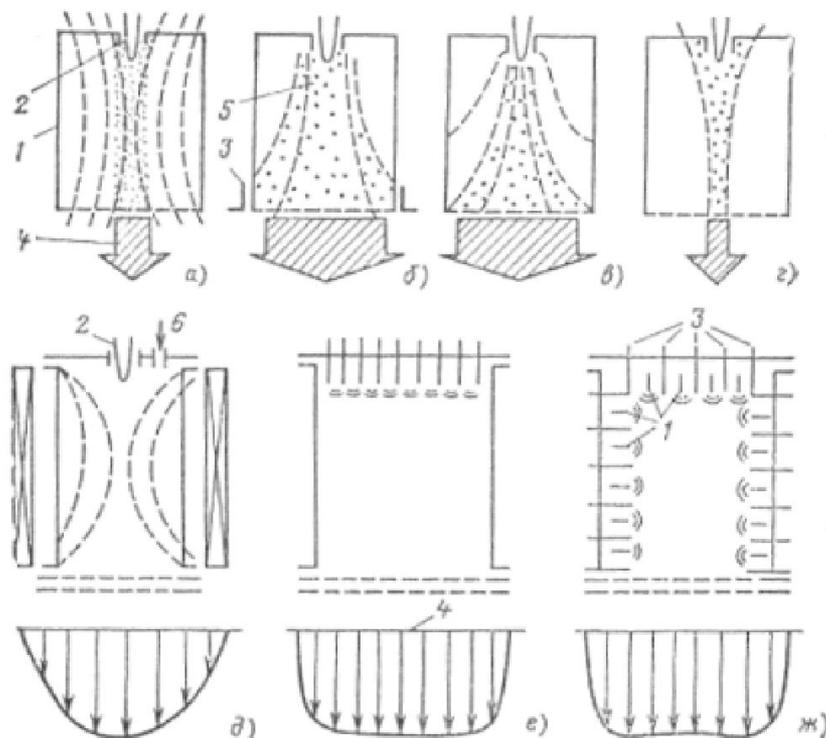
Ионно-лучевое травление

Для прецизионного травления микроструктур необходима хорошая **коллимация ионного пучка**.

Но **однородное магнитное поле**, направленное вдоль оси разрядной камеры, создает сильную неоднородность плазмы на границе отражательно-эмиссионного электрода (экстрагирующей сетки) и обуславливает сравнительно небольшой диаметр ионного пучка.



Ионно-лучевое травление



Характер распределения магнитного поля (а-г) и плотности ионного тока (д-ж) в МИИ:

а - однородное поле; б-расходящееся закрытое поле;

в - расходящееся открытое поле; г - сходящееся поле;

д -МИИ с одним катодом; е - МИИ с мультикатодной системой;

ж-МИИ с мультиполевой магнитной системой;

1 - анод; 2 - катод; 3 - полюсные наконечники; 4 - ионный поток; 5 - первичные электроны (зона плазмы); 6 - газ

Ионно-лучевое травление

В различных вариантах использования **расходящегося поля** удастся сформировать область плазмы по всей площади экстрагирующей сетки и создать ионный пучок значительно большого диаметра, чем в случае однородного поля.

Однако, при этом плотность плазмы в зоне оси разрядной камеры примерно в 2 раза выше, чем в остальных областях, и существенно возрастает при дальнейшем увеличении диаметра пучка.

Сходящееся поле улучшает коллимацию ионного пучка, однако существенно уменьшает его диаметр.

В МИИ с **несколькими** идентичными **катодами** или же с мультиполевыми магнитными системами и большим числом дискретных анодов получается равномерное распределение плотности тока.

Ионно-лучевое травление

ИОС предназначена:

- для одновременной экстракции ионов с границы плазмы,
- первичной фокусировки ионного потока большого диаметра, состоящего из множества (до 1000) ионных пучков,
- формирования каждого пучка в отдельности,
- фокусировки ионного потока в целом,
- для ускорения ионов до энергий 100-2000 эВ.

При этом должны быть обеспечены:

- минимальные потери мощности в источниках питания,
 - минимальная эрозия сеток ИОС при длительной эксплуатации МИИ.
- Обычно ИОС представляет собой блок из двух (реже трех) металлических или графитовых сеток с отверстиями одинакового диаметра, число которых определяет количество отдельных ионных пучков в потоке.

Ионно-лучевое травление

На выходе ионного потока из ИОС необходима **нейтрализация** его объемного заряда, наличие которого вызывает расфокусировку и плохую коллимацию ионного пучка, что существенно снижает качество и эффективность травления микроструктур.

Кроме того, появление на поверхности *диэлектрика* положительного заряда практически **не позволяет** использовать МИИ с ионными пучками большого диаметра для травления диэлектриков и даже металлов в том случае, если энергия ионов менее 1 кэВ.

Для нейтрализации обычно применяют специальный инжектор электронов. При этом полной рекомбинации электронов и ионов, как правило, не происходит, а обеспечивается лишь **компенсация** заряда в ионном пучке. Наиболее простым методом получения нейтрализующих электронов служит использование внешних вольфрамовых **эммиттеров**, погруженных непосредственно в ионный поток.

Ионно-лучевое травление

Важной характеристикой **плазмы** является стабильность ее параметров во времени.

Для обеспечения стабильности параметров необходимо поддерживать давление аргона в разрядной камере на постоянном оптимальном уровне, используя автоматическое регулирование скорости подачи газа.

Типичная система автоматического поддержания давления содержит регулируемые микронатекатели, соединенные с газовыми резервуарами, и электронное устройство для измерения и регулирования давления.

В качестве регулируемых микронатекателей широко используют **электромагнитные вентили**.

Ионно-лучевое травление

МИИ имеют ряд преимуществ перед другими ионными источниками, применяемыми в ионной технологии, поскольку они характеризуются:

- низким напряжением разряда (начиная с 20 В), что ограничивает возможность возникновения многозарядных ионов, распыления стенок разрядной камеры, находящихся под потенциалом катода, и тем самым обеспечивает возможность получения ионного пучка с **малым разбросом энергии** и относительно **малым** (около 10^{-6}) **количеством примесей**;
- специфическим механизмом разряда, позволяющим создавать разрядную камеру большого диаметра, что обеспечивает извлечение **однородного многолучевого ионного пучка**;
- низким давлением в разрядной камере (10^{-1} - 10^{-2} Па), в результате чего в пространстве действия ионного пучка, например в камере распыления, **можно поддерживать высокий вакуум** при относительно низкой мощности откачной системы;
- высоким **коэффициентом использования рабочего газа** (до 80 %) и малыми затратами энергии на получение одного иона.

Ионно-лучевое травление

Недостатки МИИ:

- **наличие термокатода** ограничивает применение этого источника для формирования ионных пучков в **химически активных средах**, хотя данное ограничение можно частично снять, используя плазменный катод.

Значительный интерес представляют последние разработки МИИ, в которых эффективная ионизация рабочего газа осуществляется без использования магнитного поля.

Удержание плазмы в разрядной камере и повышение эффективности ионизации в источниках этого типа (например, в источниках с седловидной формой поля) достигаются за счет градиента электрического поля, который создается с помощью анодов специальной конструкции, или за счет размещения дополнительных анодов в пределах разрядной камеры.

Ионно-лучевое травление

Скорость ИЛТ зависит от:

- коэффициента распыления, зависящего от вида подвергаемого обработке материала;
- мощности ионного источника;
- плотности ионного тока;
- угла падения ионов на обрабатываемую поверхность;
- расстояния между ионным источником и обрабатываемой поверхностью;
- вида и энергии ионов.

Зависимость скорости ИЛТ от мощности ионного источника, плотности ионного тока и энергии ионов имеет линейный (или близкий к линейному) вид.

Характер зависимости скорости ИЛТ от угла падения ионов более сложный.

Ионно-лучевое травление

Разрешение процесса ИЛТ при переносе рисунка с маски на создаваемую структуру в значительной мере определяется селективностью ИЛТ рабочего материала относительно материала **органической резистивной маски (ОРМ)**.

ОРМ, пригодные для получения субмикронных размеров, представляют собой слои электронно- или рентгенорезистов, причем наиболее широко для этой цели используется **полиметилметакрилат (ПММА)** или соединения на его основе.

Поскольку для большинства материалов (за исключением GaAs, серебра, золота, платины, меди) селективность травления относительно ПММА составляет 1/4, с помощью ИЛТ через ОРМ из электронно- или рентгенорезиста толщиной $L=0,4\div 0,6$ мкм нельзя вытравить материал на глубину более 0,1 мкм, что явно недостаточно в подавляющем большинстве случаев.

Ионно-лучевое травление

В МИИ, которые наиболее часто применяются для реализации ИЛТ, **равномерность травления** в первую очередь зависит от трех главных параметров:

- ускоряющего напряжения U ;
- напряженности магнитного поля H ;
- давления в рабочей камере P .

При совместной оптимизации этих трех важнейших параметров с помощью коллимирующих сеток в МИИ обеспечивается высокая равномерность плотности ионного тока (до 97 %) на площади диаметром до 50 см.

Поэтому в системах ИЛТ, использующих источники подобного рода, нет необходимости вращать подложки с целью повышения равномерности травления.

Ионно-лучевое травление

К числу достоинств ИЛТ относятся:

- высокое разрешение процессов, которое в настоящее время ограничено минимальными размерами элементов, получаемыми в ОРМ, а не возможностями самого процесса;
- высокая равномерность травления;
- хорошая воспроизводимость всех основных параметров процесса травления от цикла к циклу;
- возможность легкого управления им с помощью четырех легко измеряемых и контролируемых параметров (энергии, угла падения ионов, плотности ионного тока и давления), которые в используемом при ИЛТ диапазоне давлений (10^{-2} - 10^{-3} Па) не зависят друг от друга;
- универсальность процесса, позволяющая проводить ИЛТ практически любого материала;
- возможность изменения профиля травления за счет изменения угла падения ионов;
- отсутствие загрузочного эффекта и влияния адсорбированных газов на характер протекания процесса травления, поскольку предварительно рабочая камера откачивается до $p < 10^{-4}$ Па.

Ионно-лучевое травление

К числу недостатков ИЛТ относятся:

- низкая селективность травления материала относительно маски (особенно органической);
- ограничение скорости травления за счет теплового воздействия ионов на ОРМ;
- значительное тепловое и радиационное воздействие на обрабатываемые структуры, ограничивающее применение ИЛТ для изготовления МДП-структур;
- переосаждение распыленного материала на боковых стенках структур;
- образование фасок в плоскостях, соответствующих углам, при которых обеспечивается максимальная скорость травления;
- подтрав и уменьшение толщины слоев на боковых гранях и плоскостях вблизи стенок за счет отражения ионов.

Ионно-лучевое травление

В настоящее время ИЛТ применяется для изготовления приборов на основе пермаллоя, ортоферритов, гранатов, ниобата лития, свинца, т. е. тех материалов, для которых еще не разработаны процессы ИХТ и ПХТ.

Дальнейшее совершенствование ИЛТ (и в первую очередь с использованием автономных ионных источников) должно быть направлено на травление материалов через неорганические маски, формируемые с помощью ИХТ и ПХТ, разработку низкоэнергетических ионных источников (300-500 эВ) с высокой плотностью тока ($5 \dots 10 \text{ mA/cm}^2$), встроенных в системы для индивидуальной обработки пластин большого диаметра с охлаждением последних до температуры жидкого азота, что позволит достичь при ИЛТ высоких плотностей тока и существенно повысит производительность процесса.

Плазменное травление

В основе плазменного травления (ПТ) лежат активируемые излучением плазмы, электронами и ионами **гетерогенные химические реакции** между свободными атомами и радикалами и поверхностными атомами обрабатываемого материала.

Обрабатываемый материал при этом находится непосредственно в зоне плазмы или же на электродах и подложкодержателях, соприкасающихся с плазмой.

Свободные атомы и радикалы вступают в реакцию с поверхностными атомами материала и, взаимодействуя с ними, образуют **летучие соединения**, в то время как излучение плазмы, электроны и ионы **активируют эти реакции**, существенно увеличивая скорость их протекания.

Плазменное травление

Активирующее воздействие электронов и ионов зависит от **энергии**, с которой они бомбардируют поверхность обрабатываемого материала.

Эта энергия, в свою очередь, зависит от **потенциала** обрабатываемой поверхности относительно плазмы.

Вследствие различия в подвижности электронов и ионов на соприкасающейся с плазмой или находящейся в ней поверхности (если она не заземлена и на нее не подано напряжение) возникает **отрицательный «плавающий» потенциал**, значение которого определяется:

- мощностью, вкладываемой в разряд;
- давлением;
- видом газа.

При ПТ потенциал обычно не превышает нескольких десятков вольт.

Плазменное травление

Таким образом, разность потенциалов между плазмой и обрабатываемой поверхностью не может обеспечить заряженным частицам энергию, необходимую для эффективного **физического распыления**, поскольку даже при энергии 100 эВ коэффициент распыления составляет 0,1 атом/ион.

В то же время энергия ионов, электронов и фотонов достаточна для:

- разрушения химической связи между поверхностными атомами материала;
- активации химических реакций;
- стимулирования процессов десорбции образующихся продуктов,

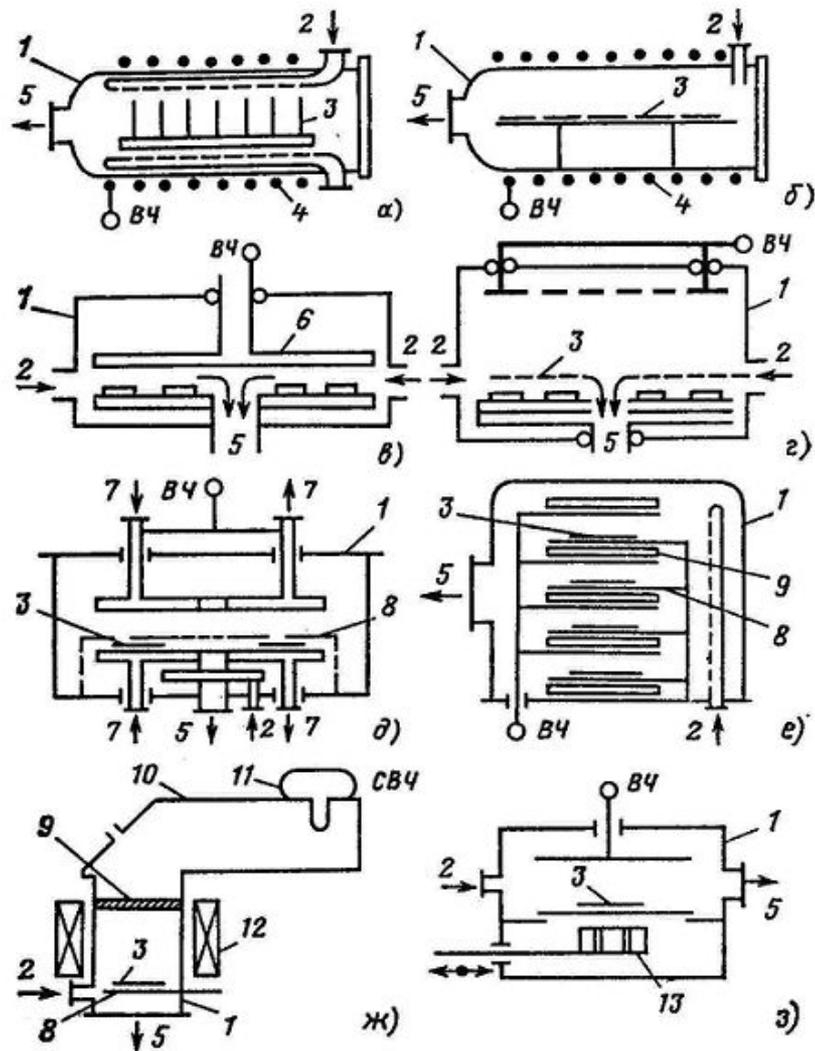
что вызывает увеличение скорости травления.

Плазменное травление

Процессы ПТ реализуются как в цилиндрических реакторах с расположением подложек в кассетах в объеме плазмы, так и в реакторах диодного типа, в которых подложки размещаются на плоских электродах.

В реакторах диодного типа ПТ реализуется только при условиях, не позволяющих ионам достичь энергии выше 100 эВ, в противном случае в реакторе будет осуществляться процесс РИПТ.

В последнее время для осуществления ПТ стали применять планарные и коаксиальные диодные системы с магнитным полем, триодные системы и системы с СВЧ-разрядами.



Объёмные (а, б)

Планарные (в-е)

Реакторы на базе СВЧ- и магнетронного разрядов (ж, з)

Плазменное травление

Реакторы объемного типа, выполненные в виде цилиндра, в которых плазма возбуждается с помощью расположенного снаружи индуктора (а, б), имеют очень низкий потенциал между плазмой и подложками (10...50 В).

Сочетание низкого потенциала и высокого давления (около 100 Па) вызывает изотропный характер травления, однако обеспечивает высокую селективность s .

$$s (\text{Si}/\text{SiO}_2) = 20$$

$$s (\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2) = 10$$

$$s (\text{поликремний/фоторезист}) = 20$$

Большим недостатком реакторов объемного типа является **неоднородность травления**, поскольку скорость травления увеличивается от центра пластины к ее периметру.

Плазменное травление

В реакторах объемного типа нет возможности применять принудительное охлаждение подложек, не обеспечивается требуемая равномерность ПТ.

Недостатки:

- неодинаковый нагрев различных частей подложек и разных подложек в кассете
- неравномерность концентрации ХАЧ
- различная интенсивность бомбардировки поверхности электронами и ионами

Если же пластины располагать так, как показано на рис. б, то неравномерность можно несколько ограничить ($\pm 16\%$), но при этом резко уменьшается число загружаемых пластин.

Плазменное травление

Значительно большую равномерность травления обеспечивают реакторы планарного типа (в, е).

В планарном реакторе с радиальным потоком рабочий газ подается по периметру нижнего заземленного электрода и откачивается через отверстие в центре этого электрода (рисунок в)

Потенциал между плазмой и нижним электродом, на котором расположены подложки, достигает **нескольких сот вольт**; это объясняется тем, что плазма находится между близко расположенными электродами.

Рабочее давление лежит в диапазоне 25...65 Па, травление носит **изотропный** характер.

При ПТ в планарном реакторе можно использовать принудительное охлаждение (д), но даже при его отсутствии в таком реакторе как (в), равномерность травления выше, чем в объемных реакторах

Плазменное травление

Анизотропия травления достигается за счет снижения давления. Но при близко расположенных электродах затруднено *стабильное* горение разряда.

Если же увеличить расстояние между электродами, то можно снизить рабочее давление, однако травление все же останется изотропным, поскольку **потенциал** между плазмой и нижним заземленным электродом быстро падает с увеличением расстояния.

В планарных реакторах **скорость травления** SiO_2 и поликремния больше, чем в реакторах объемного типа, однако при этом значительно снижается селективность.

$s(\text{поликремний/фоторезист})=2$

$s(\text{поликремний/SiO}_2) = 10$

что обусловлено высоким потенциалом между плазмой и подложками.

Плазменное травление

Скорость ПТ описывается выражением

$$v_{mp} = \frac{G_{XAC} k_{mp} \tau_{XAC}}{1 + b F_m k_{mp} \tau_{XAC} / V_{п.з}}$$

G_{XAC} — скорость генерации XAC;

k_{tr} — константа скорости травления;

τ_{XAC} — время жизни XAC;

b — постоянная, зависящая от обрабатываемого материала;

F_m — площадь обрабатываемой поверхности материала;

$V_{п.з}$ — объем зоны плазмы

Плазменное травление

Когда F_m мала

$$v_{mp} = G_{XAC} k_{mp} \tau_{XAC}$$

и не зависит от площади травления материала.

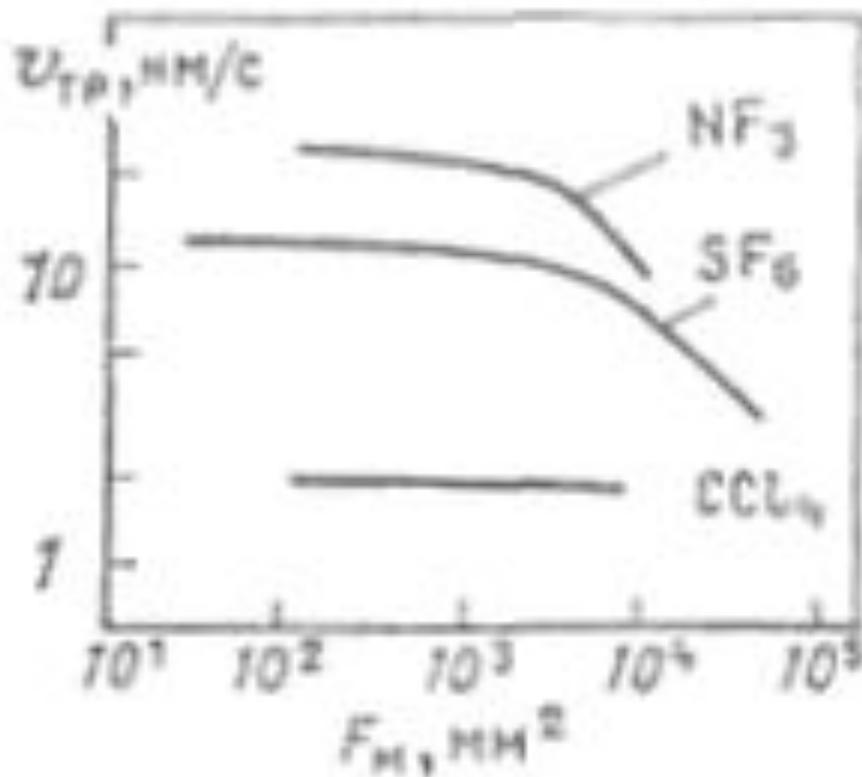
В этом случае снабжение XAC происходит в достаточной степени и ПТ протекает в **кинетической** области, где скорость травления ограничивается гетерогенной реакцией на поверхности обрабатываемого материала.

Когда F_m велика

$$v_{mp} = G_{XAC} V_{nz} / bF_m$$

ПТ протекает в **диффузионной** области и скорость травления изменяется обратно пропорционально площади обрабатываемой поверхности

Плазменное травление



Зависимость скорости ПТ от операционных параметров процесса

Плазменное травление

Температура материала, подвергаемого ПТ, влияет на скорость травления.

Так, при ПТ:

вольфрам в смесях 30 % CF_4 + 10 % O_2 и 90 % SF_6 + 10 % O_2

в реакторе планарного типа

расстояние между электродами 5 см

плотность мощности 0,2 Вт/см²

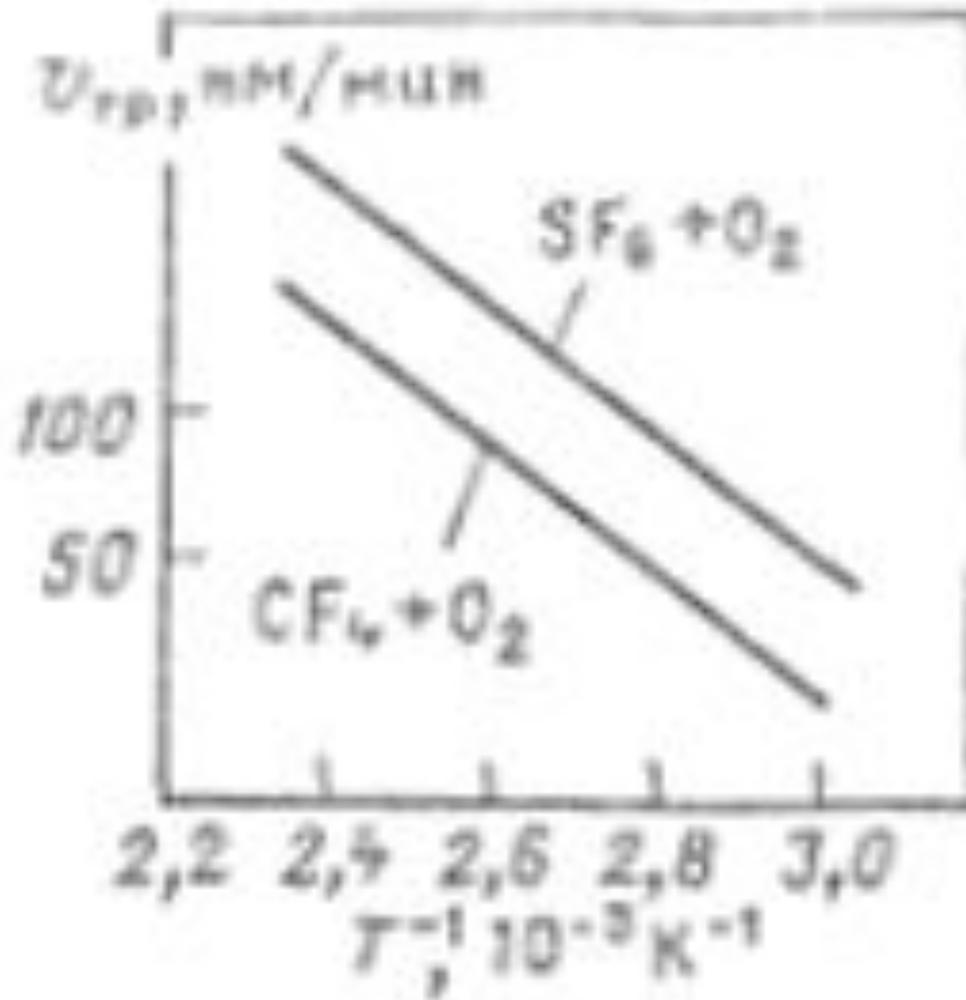
давление 26 Па

частота 4,5 МГц

имеет место резко выраженная зависимость $v_{тр}$ от температуры (при ее изменении от 50 °С до 160 °С $v_{тр}$ вольфрама увеличивается в 6 раз).

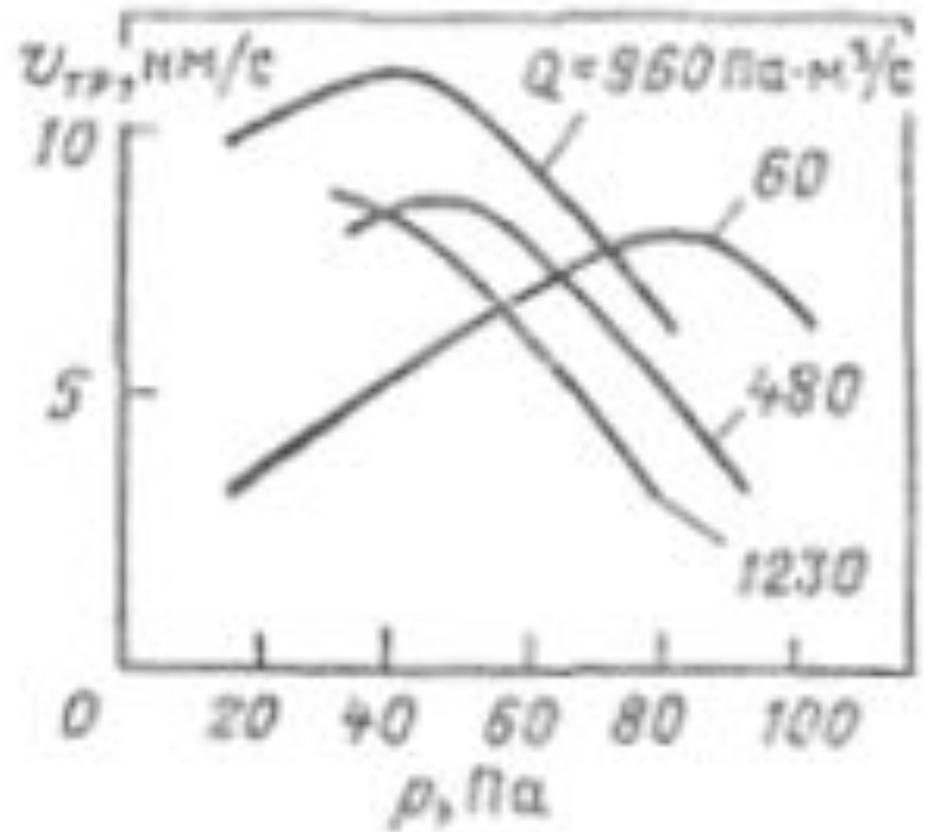
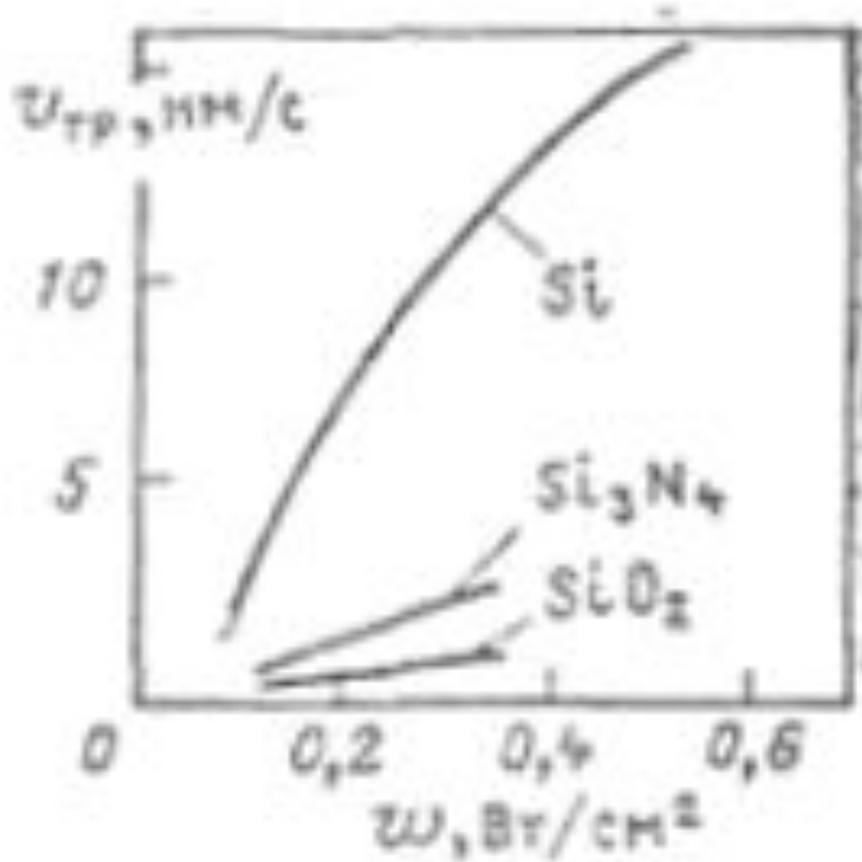
Плазменное травление

Зависимость скорости ПТ от температуры



Плазменное травление

Зависимость скорости ПТ от мощности разряда и давления в реакторе

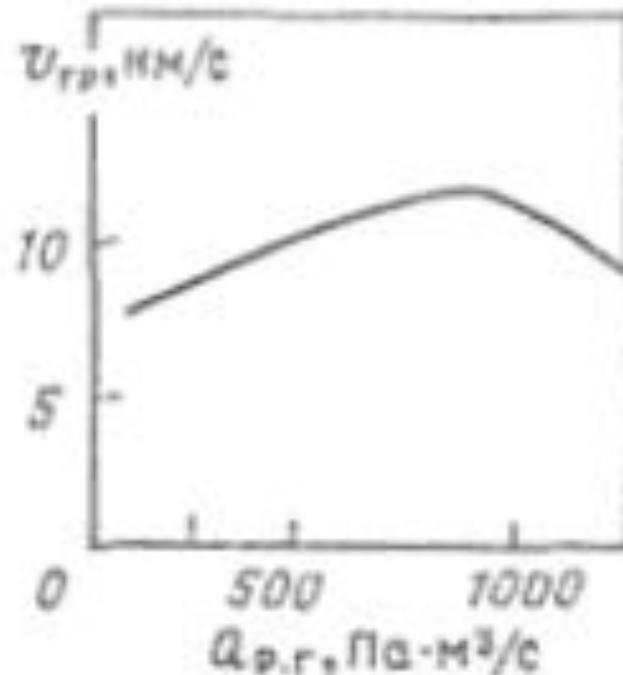


Плазменное травление

Зависимость скорости ПТ от расхода рабочего газа

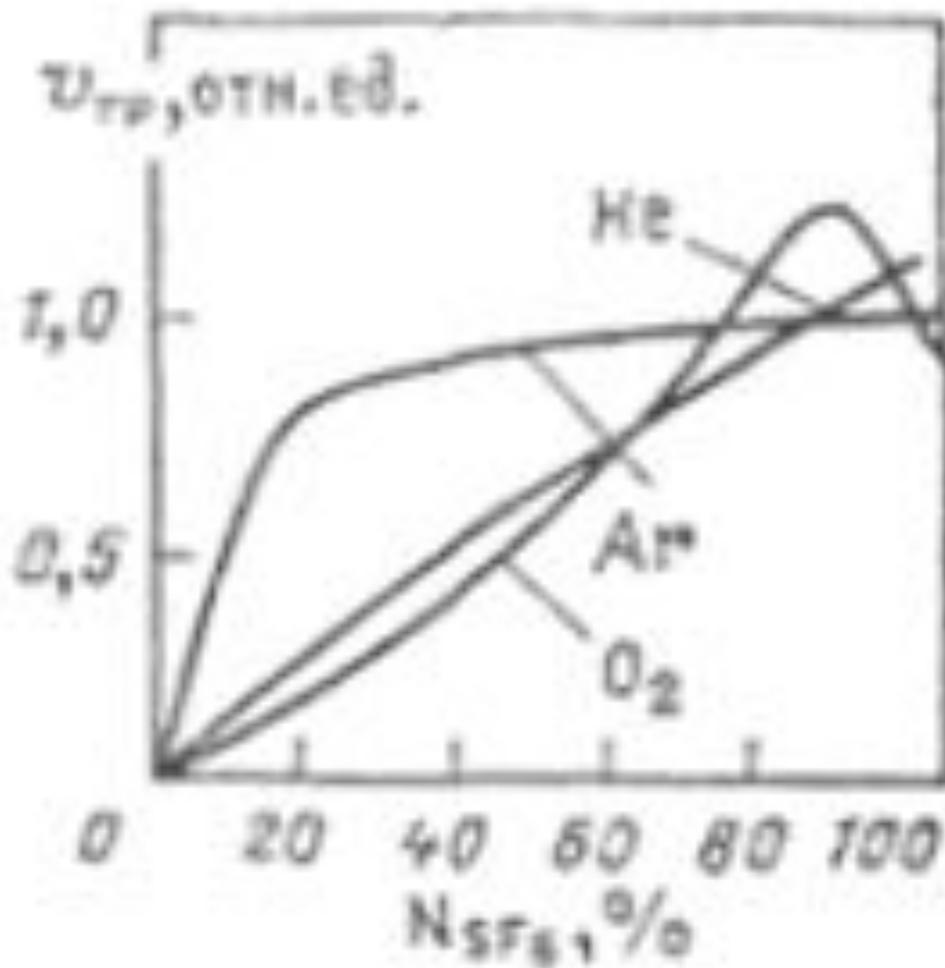
Увеличение расхода рабочего газа $Q_{p.g}$ вначале способствует эффективной доставке молекул рабочего газа в зону ВЧ-разряда, повышению стационарной концентрации ХАЧ, а следовательно, скорости ПХТ.

При дальнейшем увеличении $Q_{p.g}$ время нахождения ХАЧ у поверхности обрабатываемого материала становится настолько малым, что большая часть ХАЧ откачивается насосом, не вступив в реакцию с материалом.



Плазменное травление

Зависимость от состава рабочей смеси



В смесях, содержащих аргон, $SF_6:Ar=1:4$ $v_{тр}$ достигает 80 % значения скорости, полученной в чистом SF_6 .

Небольшие добавки кислорода приводят к росту $v_{тр}$, а при дальнейшем увеличении содержания кислорода $v_{тр}$ уменьшается

Плазменное травление

Зависимость от состава рабочей смеси

Особенно сильное влияние оказывает добавка кислорода в плазму CCl_4 при ПТ пленок хрома в реакторе планарного типа.

Без добавки кислорода хром практически почти не травится ($v_{\text{тр}} < 1$ нм/мин), а по мере увеличения содержания кислорода $v_{\text{тр}}$ резко возрастает и достигает максимума около 40 нм/мин. Когда содержание кислорода в газовой смеси превышает 40 %, $v_{\text{тр}}$ резко снижается.

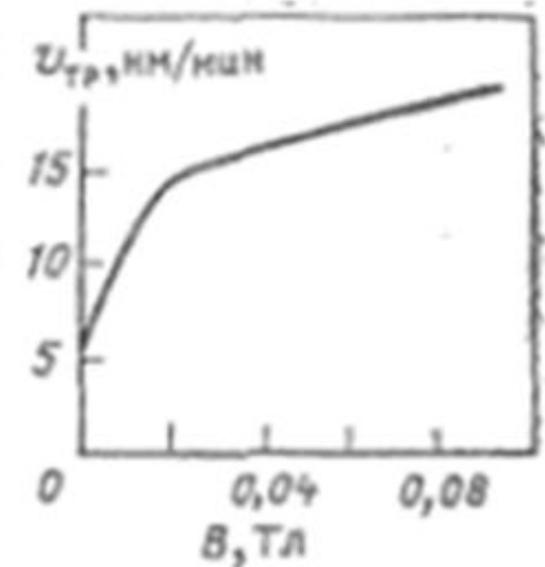
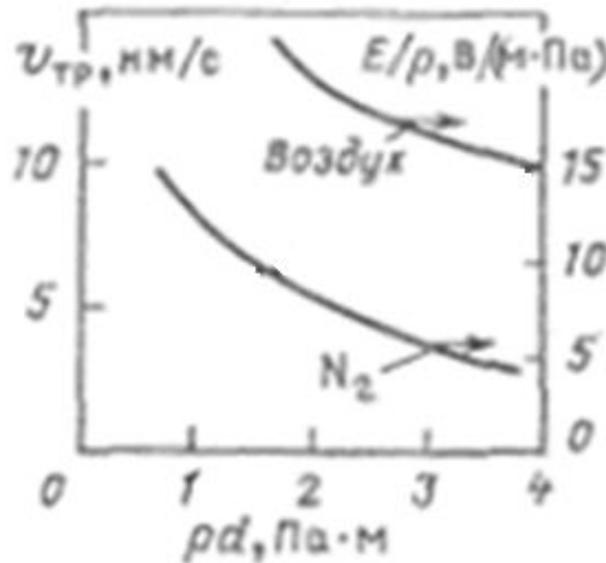
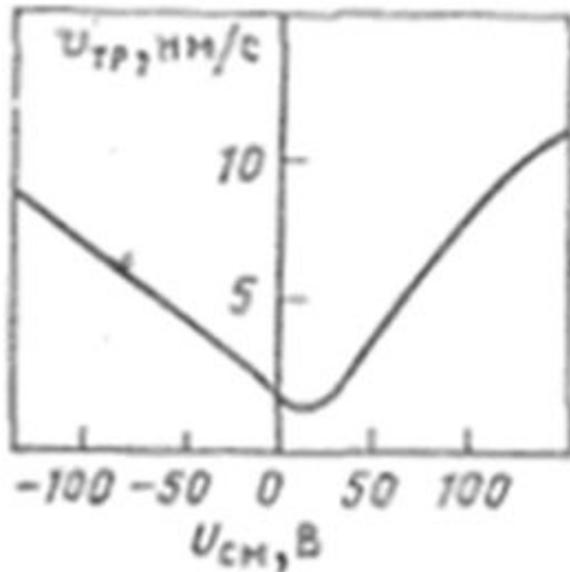
Столь резкое первоначальное увеличение $v_{\text{тр}}$ хрома при введении в CCl_4 кислорода связано с тем, что кислород одновременно выполняет несколько функций:

- он удаляет углеродную пленку с поверхности хрома;
- увеличивает содержание ХАЧ в хлорсодержащей плазме;
- усиливает химические реакции, в результате которых образуется летучее соединение $\text{Cr}_2\text{O}_2\text{Cl}_2$.

Плазменное травление

На скорость ПТ в планарных реакторах оказывают влияние:

- подача напряжения смещения на обрабатываемые пластины
- расстояние между электродами
- наличие поперечного магнитного поля



Плазменное травление

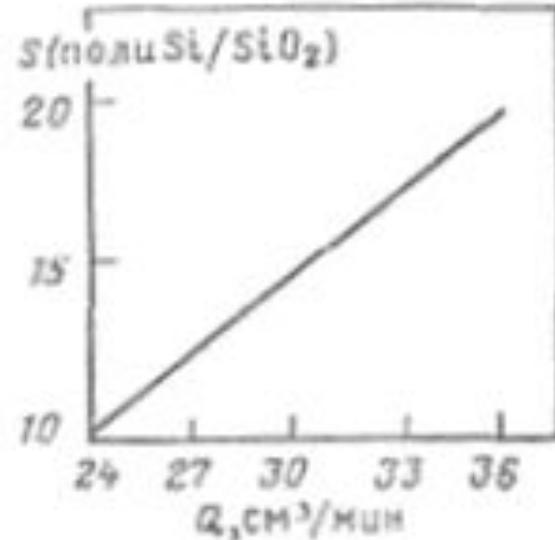
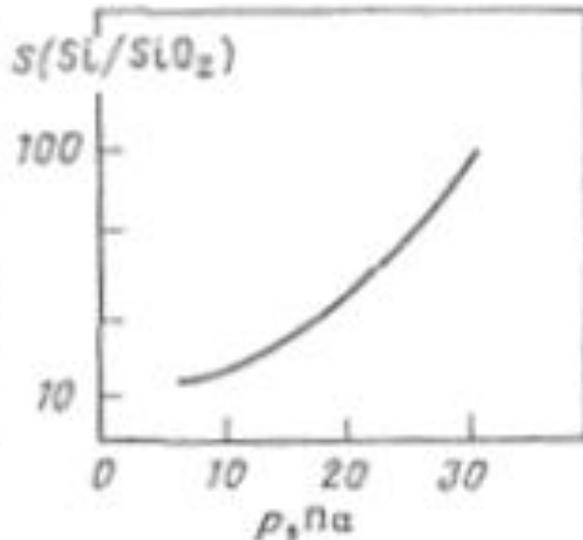
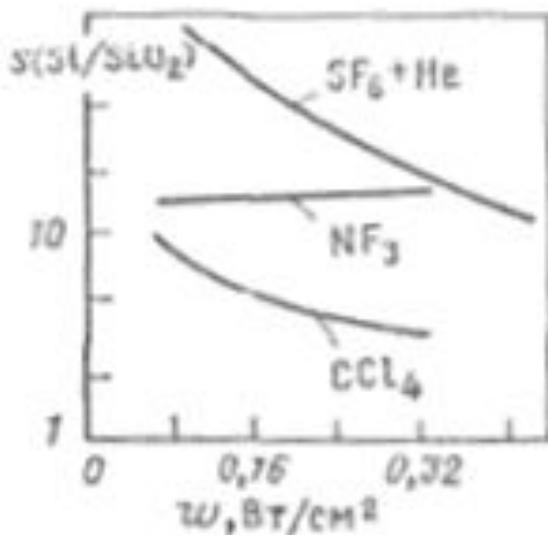
Селективность ПТ

Максимальная селективность ПТ s может быть получена:

-при минимальной интенсивности ионной бомбардировки, что достижимо при минимально допустимой ВЧ-мощности, которая обеспечивает снижение числа ионов

-при максимальном давлении, которое обеспечивает наименьшую энергию ионов.

Селективность существенно увеличивается с ростом **давления** и **газового потока**.

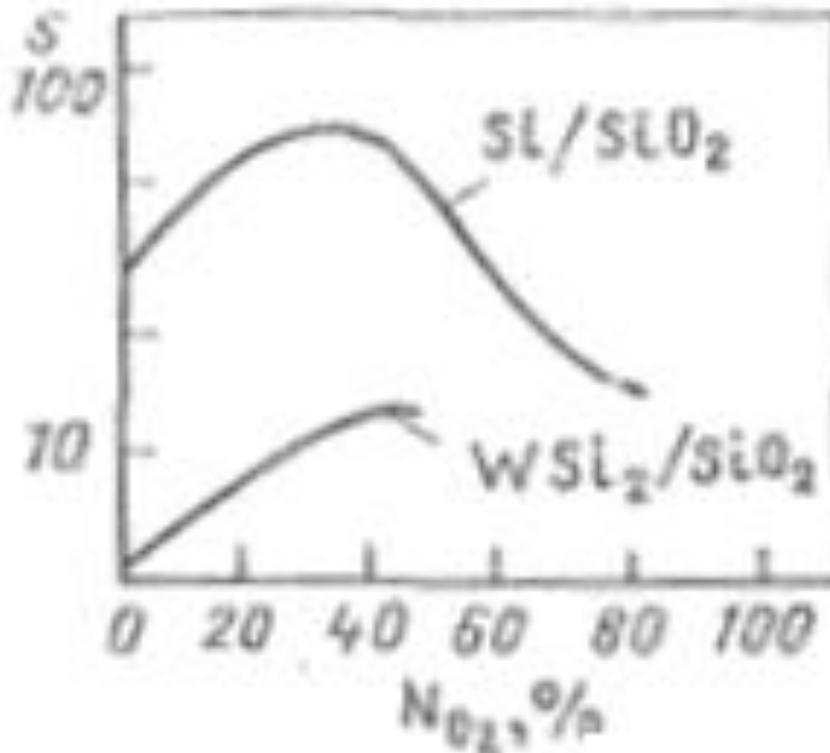


Плазменное травление

Селективность ПТ

Значительного увеличения селективности можно добиться, добавляя к рабочим газам **кислород**, который уменьшает рекомбинацию свободных атомов **F** и повышает скорость травления **кремния**.

Селективность растет с увеличением содержания кислорода и начинает уменьшаться лишь тогда, когда кислород составляет большую часть смеси, что связано с окислением поверхности.



Плазменное травление

Характерный для ПТ диапазон рабочих давлений ($5 \cdot 10^1 \dots 5 \cdot 10^2$ Па).

При использовании НЧ-разряда **снижение частоты** приводит к **росту энергии бомбардирующих электроды ионов**.

Поскольку рассеяние ионов при этом уменьшается, **повышается анизотропия травления**.

Снижение частоты позволяет получить значительную анизотропию, однако при низких давлениях трудно поддерживать подобный разряд.

СВЧ-разряд позволяет проводить ПТ при давлениях, меньших **0,1 Па**.

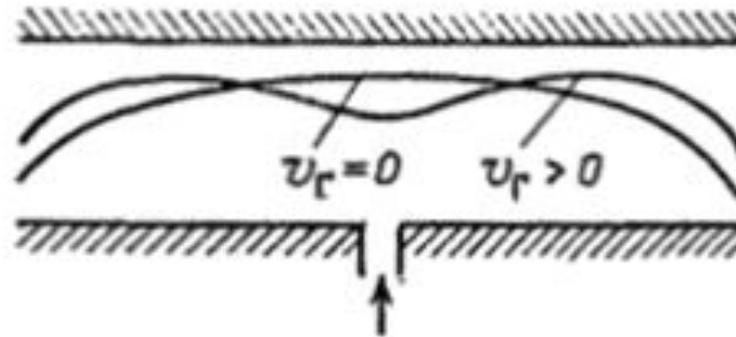
Это обеспечивает **большую степень диссоциации** молекул рабочего газа и ограничение **энергии ускоренных ионов** несколькими десятками электрон-вольт

Плазменное травление

Важную роль для равномерности ПТ играет значение и направление **потока газа** в планарном реакторе.

При отсутствии потока максимум плотности электронов, а следовательно, и ХАЧ будет в центре газового разряда.

При потоке газа от центра к краям электродов он сдвигается к краям. Скорость потока $v_r \sim Q_{p.g} / d^2$ ($Q_{p.g}$ — объемный расход газа; d — расстояние между электродами), равномерность распределения ХАЧ можно повысить, не только увеличивая расход газа, но и уменьшая расстояние между электродами.



Плазменное травление

Изотропное ПТ широко используется в тех случаях, когда не требуется высокое разрешение:

- для снятия и удаления остатков фоторезиста;
- для плазменного задубливания резиста с целью улучшения его термостойкости.

ПТ является также **основным методом сухого проявления** органических и неорганических резистов после их экспонирования ультрафиолетовым или рентгеновским излучением.

С помощью ПТ можно производить травление:

- пленок кремния и его соединений;
- фосфорно- и боросиликатного стекла;
- органических материалов;
- углерода, хрома, титана, тантала, ниобия, вольфрама, молибдена, ванадия, золота.

В производстве интегральных схем ПТ применяется для получения конфигураций с шириной линий около 3 мкм.

Радикальное травление

В основе радикального травления (РТ) лежат **гетерогенные химические реакции**, происходящие на границе **двух фаз** — твердой и газообразной — между *ХАЧ* (свободными атомами и радикалами), образующимися при диссоциации молекул рабочего газа в низкотемпературной плазме газовых разрядов, и *активными центрами обрабатываемого материала*, представляющими собой поверхностные атомы со свободными валентностями.

Обрабатываемый материал при РТ находится в зоне, отделенной от плазмы **перфорированным металлическим экраном**, магнитным полем, **расстоянием** или другими способами.

Такое разделение области плазмы (разрядной области) и области, в которой размещен обрабатываемый материал (реакционной области) **не позволяет** ионам и электронам достигать поверхности материала и в то же время практически **не создает преграды** для незаряженных ХАЧ, которые, достигая поверхности обрабатываемого материала, вступают с ним в химическую реакцию с образованием стабильных летучих соединений, удаляемых из реакционной зоны в результате ее непрерывной откачки.

Радикальное травление

Стадии РТ:

- доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда;
- превращение молекул рабочего газа в ХАЧ в плазме газового разряда;
- доставка ХАЧ к поверхности материала, подвергаемого травлению;
- взаимодействие ХАЧ с активными центрами материала, включающие в себя:
 - хемосорбцию ХАЧ на поверхности материала;
 - химическую реакцию;
 - последующую десорбцию образующихся летучих и стабильных продуктов реакции с поверхности материала;
- отвод продуктов реакции из реакционной зоны и камеры реактора.

Гетерогенная химическая реакция травления материалов может протекать только в том случае, когда обеспечивается **непрерывная доставка ХАЧ** к обрабатываемым поверхностям с помощью диффузии, конвекции или молекулярного потока и когда происходит непрерывная обратная диффузия продуктов реакции.

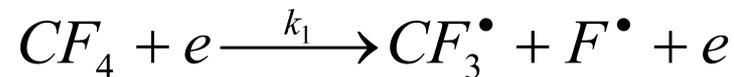
Скорость процесса в целом определяется скоростью наиболее медленной стадии.

Радикальное травление

Основным механизмом образования ХАЧ в низкотемпературной плазме является диссоциация молекул рабочего газа под воздействием **электронного удара**.

Молекулы CF_4 в плазме ВЧ-разряда первоначально распадаются с образованием атомарного фтора, радикалов CF_3^\cdot и ионов CF_3^+ , CF_3^- и F^- .

Более 75 % диссоциирующих молекул CF_4 распадаются на радикалы CF_3^\cdot и атомы фтора по схеме



Радикальное травление

Скорость РТ при одних и тех же операционных параметрах процесса:

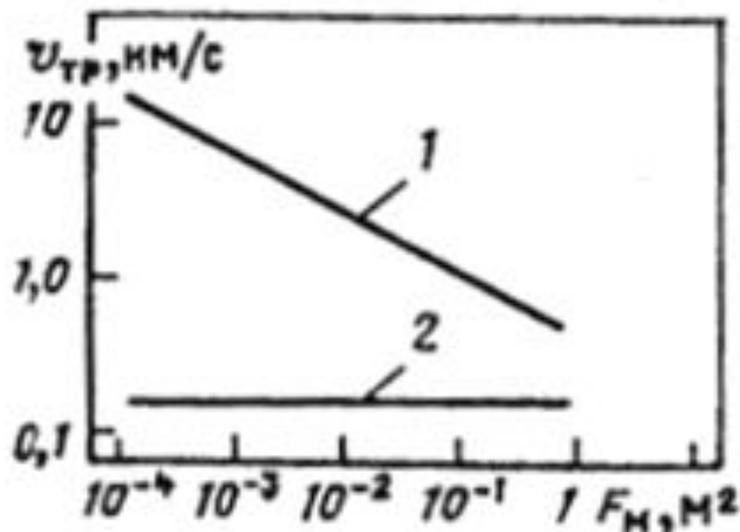
- мощности;
- давлении;
- расходе рабочего газа;
- Температуре

всегда меньше скорости ПТ, что связано с рекомбинацией ХАЧ при доставке из плазменной зоны в реакционную и **отсутствием стимуляции** химических реакций травления заряженными частицами.

Радикальное травление

Когда лимитирующей стадией процесса РТ материала является **стадия доставки ХАЧ** к его поверхности, например при травлении кремния фторсодержащими ХАЧ, скорость травления уменьшается с увеличением площади материала, подвергаемого обработке (1).

Если же лимитирующей служит **стадия химической реакции**, например при травлении SiO_2 фторсодержащими ХАЧ, то $v_{\text{тр}}$ практически не зависит от площади обрабатываемого материала (2).



Радикальное травление

Значения $v_{\text{тр}}$ в системе с использованием источника типа «Истра» в смеси 67 % CF_4 + 33 % O_2 при давлении 26 Па, расходе газа 100 см³/мин, мощности разряда 450 Вт и температуре 50 °С.

Материал	$v_{\text{тр}}$, нм/с	Материал	$v_{\text{тр}}$, нм/с
Si	16-18	Mo	0,6-0,8
Si_3N_4	1,4-1,6	SiO_2	0,12-0,16
v	0,8-1,0	Фоторезист AG-383	0,08-0,10

Так как при РТ температура поверхности обрабатываемого материала обычно не превышает 50...80 °С, стойкость органических резистивных масок очень высока.

При рассмотрении изменения профиля травления обычно принимают, что маска совсем не травится ХАЧ.

Радикальное травление

Преимущества:

- высокая равномерность травления, что особенно важно при обработке подложек диаметром более 100 мм;
- низкая температура обрабатываемых подложек, позволяющая эффективно использовать электроно-, рентгено- и фоторезистивные маски;
- отсутствие воздействия заряженных частиц на обрабатываемые структуры, а следовательно, исключение их радиационного повреждения и изменениях электрофизических свойств, что особенно важно при изготовлении ИС с МДП-структурами.

Недостатки:

Процесс РТ **наименее анизотропен** из всех вакуумно-плазменных процессов. В нем всегда имеет место **боковое подтравливание** под край защитной маски.

Реактивное ионно-плазменное травление

При проведении реактивно ионно-плазменного травления (РИПТ) обрабатываемые **образцы** находятся **в контакте с плазмой** и размещаются на электроде, подключенном к источнику напряжения.

Удаление материала происходит как за счет **физического распыления** ускоренными ионами химически активных газов, так и в результате **химических реакций** между *свободными атомами и радикалами*, образующимися в газоразрядной плазме, и *поверхностными атомами* подвергаемого травлению материала.

Газоразрядная плазма **стимулирует** процессы, происходящие как в *газовой фазе*, так и на *поверхности твердого тела*.

При этом *физическое распыление* **активирует поверхность** материала, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, **ослабляют химические связи поверхностных атомов**, увеличивая тем самым скорость их физического распыления.

Реактивное ионно-плазменное травление

Физический и химический процессы при РИПТ складываются **неаддитивно**

Количество материала, удаленного при одновременном протекании обоих процессов, **намного больше** суммы количеств материалов, удаленных с помощью каждого процесса.

Соотношение между этими процессами в каждом конкретном случае определяется:

- видом рабочего газа, из молекул которого создаются заряженные и нейтральные ХАЧ,
- энергией ионов, зависящей от ускоряющего напряжения или вводимой в разряд мощности,
- давлением рабочего газа, используемой для травления системой, ее геометрией.

Реактивное ионно-плазменное травление

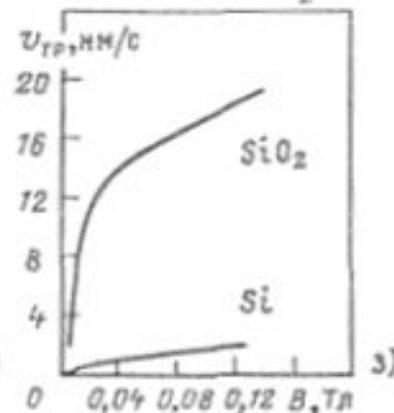
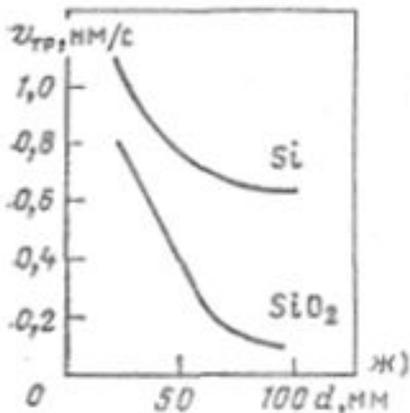
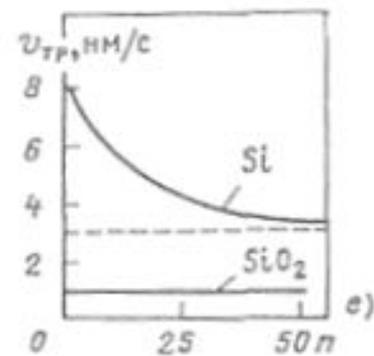
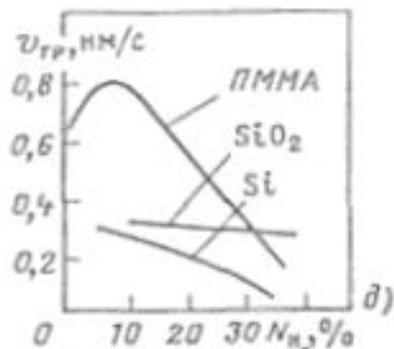
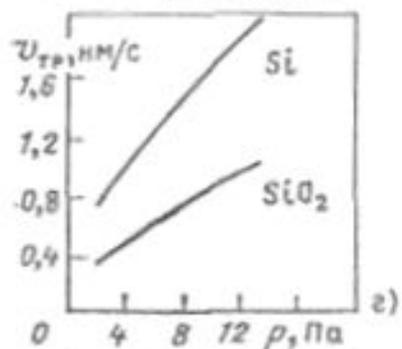
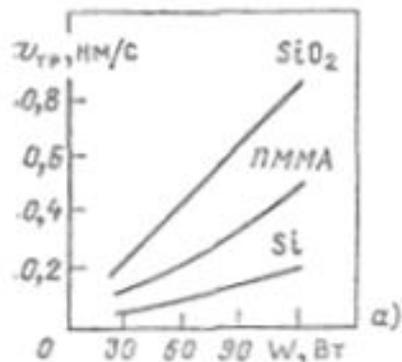
Скорость РИПТ $v_{\text{тр}}$ зависит от:

- уровня ВЧ-мощности (а),
- вида рабочего газа (б),
- состава газовой смеси (в),
- давления газа в реакторе (камере) (г),
- добавок к основному газу (д),
- степени загрузки реактора (е),
- конструктивных особенностей реактора (ж),
- магнитного поля (з),
- материала электродов.

В отличие от ПХТ скорость РИПТ практически не зависит от **температуры**, поскольку энергия на поверхности обрабатываемого материала доставляется энергетическими ионами.

В системах РИПТ всегда используется **принудительное водяное охлаждение ВЧ-электрода** для исключения перегрева изоляционных прокладок и повышения стойкости используемых при травлении органических защитных масок.

Реактивное ионно-плазменное травление



Реактивное ионно-плазменное травление

Степень ионизации, а следовательно, и скорость травления могут быть существенно повышены при использовании разряда

магнетронного типа

Материал	Рабочий газ	$v_{тр}$, МКМ/МИН	S	$w_{мин}$, Вт/см ²
Al	Cl ₂ +He	1,0	14 (SiO ₂)	0,56
SiO ₂	CHF ₃	1,1	9 (Si)	1,6
Поликремний	Cl ₂	1,0	20 (SiO ₂)	0,56

Реактивное ионно-плазменное травление

Высокая анизотропия позволяет использовать РИПТ в качестве универсального процесса травления Si_3N_4 , поликремния, фосфорсилкатного стекла и алюминия, т. е. всех тех материалов, которые применяются при изготовлении полевых транзисторов МДП-типа с элементами субмикронных размеров

Параметр, режим	Si_3N_4 (80 нм)	Поли- кремний (400 нм)	Фосфори- силкатное стекло (600 нм)	Алюми- ний (1000 нм)
Нижний слой	SiO_2 (70 нм)	SiO_2 (40 нм)	Si, поликрем- ний (400 нм)	SiO_2 (600 нм)
Рабочий газ	SiF_4	SiF_4	CHF_3	CCl_4
Давление, Па	1,3	1,3	1,3	26
Селективность по отношению к материалу подложки	2	10	20	10
Неравномерность травления по пластине диаметром 75 мм, %	± 3	± 5	± 1	± 5

Радиационно-стимулированное травление

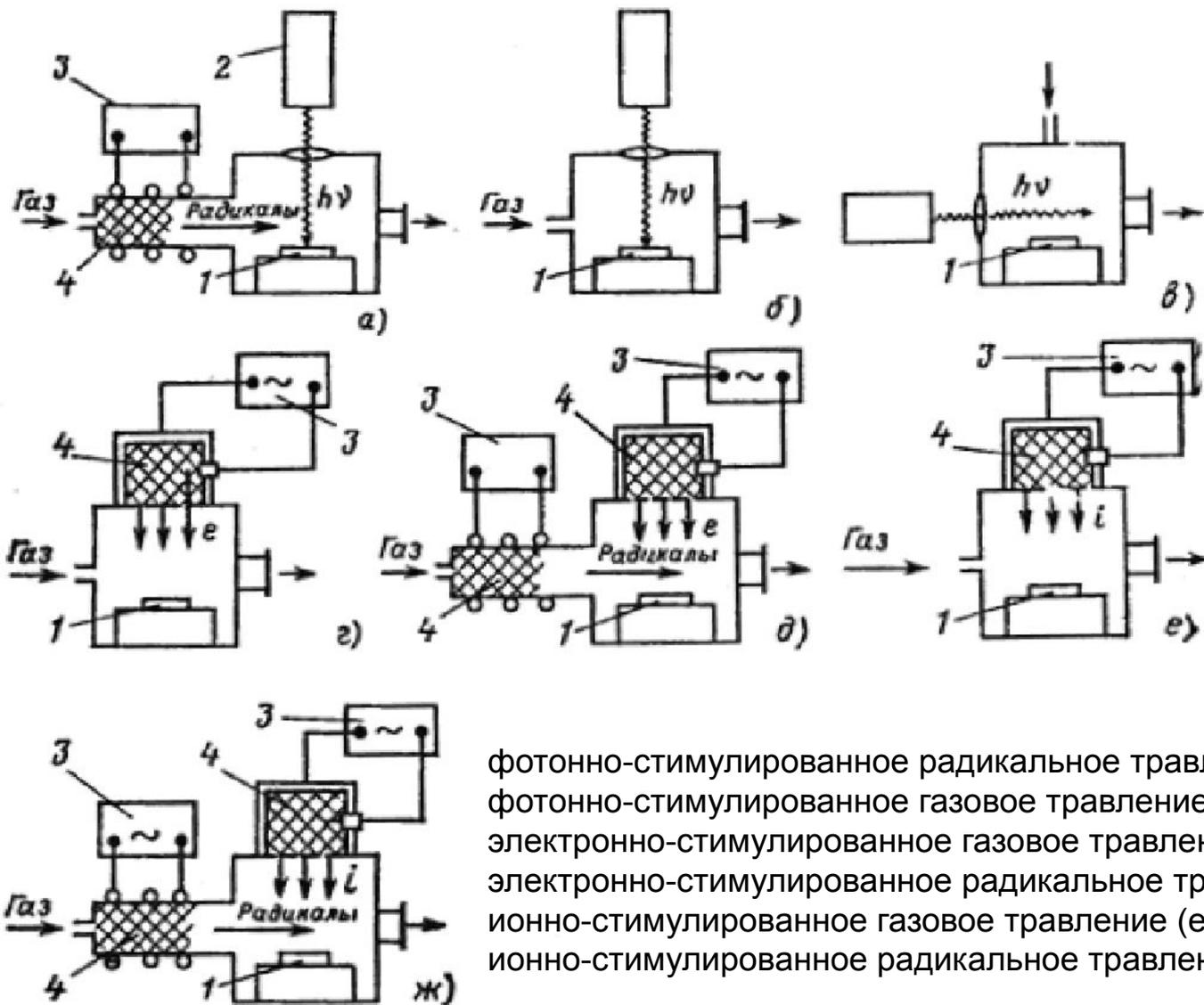
Для осуществления гетерогенных процессов травления материала необходимыми стадиями являются:

- доставка газовых молекул или ХАЧ к поверхности материала;
- их адсорбция на поверхности;
- химическая реакция с поверхностными атомами (молекулами) материала с образованием летучих стабильных продуктов реакций;
- десорбция и отвод продуктов реакции от поверхности материала.

Любая из этих стадий может быть лимитирующей, т. е. ограничивать скорость травления материала.

Следует различать два случая:

молекулы газа или радикалы могут спонтанно (самопроизвольно) травить материал без радиационного воздействия	спонтанное травление материала невозможно
роль радиационного воздействия заключается в повышении скорости (стимулировании) спонтанного травления	параметры радиационного воздействия (вид, энергия и интенсивность) непосредственно определяют скорость травления материала



фотонно-стимулированное радикальное травление (а),
 фотонно-стимулированное газовое травление (б, в),
 электронно-стимулированное газовое травление (г),
 электронно-стимулированное радикальное травление (д),
 ионно-стимулированное газовое травление (е),
 ионно-стимулированное радикальное травление (ж);

1 — обрабатываемый материал; 2 — источник излучения; 3 — генератор плазмы; 4 — плазма

Фотонно-стимулированное травление

Реализация ФСТ и очистки материалов связана с воздействием излучения:

- на газовую фазу с генерацией радикалов или возбуждением газовых молекул;
- на адсорбированный слой с генерацией в нем радикалов и стимуляцией процессов десорбции и испарения;
- на материал с возбуждением его электронов;
- нагреванием локальных областей.

Преобладание теплового механизма травления материалов характерно для излучений в инфракрасной и видимой областях спектра с плотностью мощности больше 10^9 Вт/см².

Для излучения малой мощности (менее 10^7 Вт/см²) в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра характерен диффузионно-рекомбинационный механизм травления.

Фотонно-стимулированное травление

Скорость ФСТ в том случае, когда излучение падает перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала, всегда выше, чем при воздействии излучения только на газовую фазу (падение параллельно поверхности), и может быть **в десятки раз больше скоростей ПХТ.**

При ФСТ достигается **высокая селективность** травления материалов, не уступающая, а во многих случаях даже превосходящая селективность ПХТ.

Например, $s(\text{SiO}_2/\text{Si})$ в хлоре при воздействии сфокусированного излучения аргонового лазера ($\lambda=257$ нм) составляет 1 : 80.

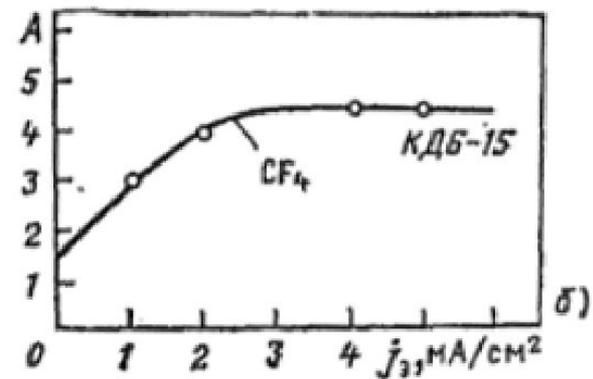
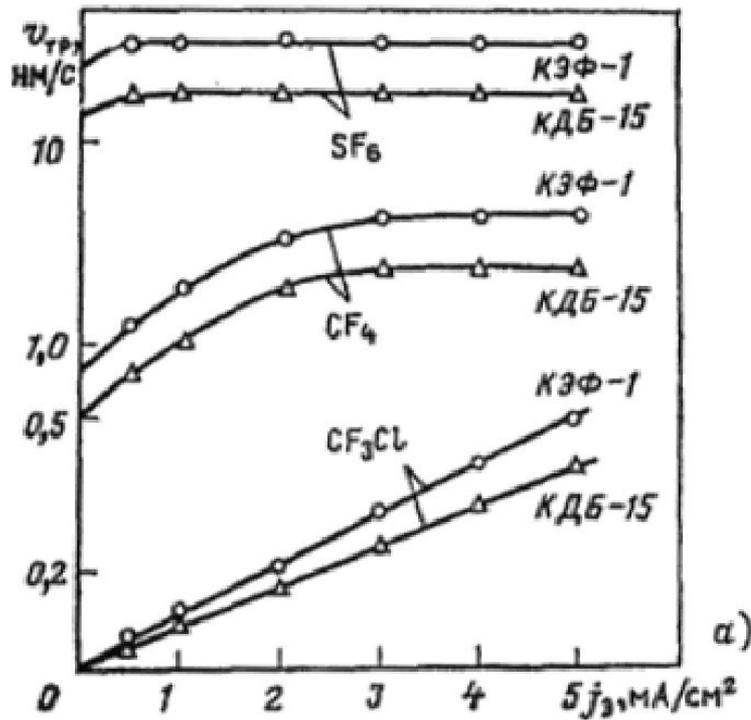
Фотонно-стимулированное травление

Достоинства процессов ФСТ :

- возможность одновременного экспонирования и проявления органических масок;
- уменьшение числа загрязнений и дефектов по сравнению с ИТ, РИТ и ПХТ;
- достижение высоких скоростей удаления материалов, не образующих летучих соединений;
- повышение скорости травления материалов в процессах РИТ и ПХТ.

Электронно-стимулированное травление

Зависимости скорости (а) и показателя анизотропии (б) ЭСТ кремния марки КЭФ-1 и КДБ-15 в различных газах от плотности электронного тока $j_э$ при давлении 26 Па, расходе газа 100 см³/мин и мощности разряда в источнике радикалов 450 Вт



Электронно-стимулированное травление

В процессе ЭСТ материалов можно эффективно и в широких пределах управлять скоростью и селективностью травления

Материал	Рабочий газ	$j_э$, мА/см ²		
		0	3	5
Nb	CF ₄	0	0,4	0,7
V	CF ₄	0,4	1,5	2,7
Si ₃ N ₄	SF ₆	3,3	3,8	3,8

Параметр процесса	$j_э$, мА/см ²				
	0	0,5	1	3	5
$v_{тр}$ (Si), нм/с	0,5	0,8	1,1	1,5	1,5
$v_{тр}$ (SiO ₂), нм/с	0,01	0,05	0,1	0,3	0,5
s (Si/SiO ₂)	50	16	11	5	3

Ионно-стимулированное травление

В процессе ИСТ в ионный источник подается инертный газ из атомов которого формируется пучок ускоренных ионов, направляемый на поверхность обрабатываемого материала.

Одновременно к поверхности материала подается химически активный (рабочий) газ.

Соотношение между плотностью потока рабочего газа и плотностью тока пучка ионов инертного газа составляет 50:1.

Это приводит к тому, что давление рабочего газа около обрабатываемой поверхности на один-два порядка больше, чем давление инертного газа в источнике.

Таким образом, значительно (в 5-10 раз) увеличивается скорость травления за счет вклада химической составляющей.

Ионно-стимулированное травление

Одновременно повышается селективность травления материалов.

Вклад химической составляющей в скорость травления зависит также от адсорбционной способности молекул рабочего газа к обрабатываемой поверхности и увеличивается с понижением температуры.

В качестве рабочих газов при ИСТ могут использоваться газы и соединения, которые спонтанно могут травить обрабатываемый материал без ионной бомбардировки, например XeF_2 для кремния или Cl_2 для GaAs, а также газы, которые производят травление только в присутствии ионной бомбардировки, например Cl_2 для кремния.

Ионно-стимулированное травление

Скорость травления ИСТ материала при установившейся температуре его поверхности будет зависеть от:

- вида,
- энергии,
- плотности тока ионов,
- вида и потока химически активного газа.

Равномерность травления зависит от распределения плотности ионного тока и плотности потока химически активного газа по поверхности материала.

Анизотропия травления зависит от угла падения на поверхность ионов и молекул химически активного газа.

Ионно-стимулированное травление

Селективность травления материалов в процессе ИСТ значительно выше, чем при ИЛТ, и достигают 5-20 для различных комбинаций материалов.

Особенно велика селективность ИСТ тех материалов, один из которых травится спонтанно химически активным газом, а другой — нет (например, мышьяк и никель).

Материал	Скорость травления, нм/с		Материал	Скорость травления, нм/с	
	ИСТ (Ar ⁺ - Cl ₂)	ИЛТ (Ar ⁺)		ИСТ (Ar ⁺ - Cl ₂)	ИЛТ (Ar ⁺)
Al	130-65	1-0,5	SiO ₂	1,3-1,2	0,55
GaAs	80-50	4,0	Ni	0,8-0,65	0,80
Si	6,5-5	0,40	Фоторезист	1,7	0,85

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ

Методы ионного и ионно-плазменного нанесения тонких пленок:

- **ионно-плазменное**, основанное на применении электрического разряда в атмосфере инертного газа, при котором мишень и подложка играют роль электродов;
- **ионно-лучевое**. Распыляемая мишень и подложка находятся вне плазмы;
- **реактивное ионно-плазменное**, основанное на химическом взаимодействии распыляемых из мишени атомов с активным газом, введенным в виде добавки к инертному газу;
- **плазмохимическое**, основанное на использовании эффектов ускорения химических реакций в поле плазмы тлеющего разряда;
- **ионное**, основанное на осаждении инжектируемых источником ионов на подложку;
- **плазменно-дуговое**, основанное на использовании плазмы электродугового разряда.

Типы плёнок

В технологии полупроводниковых **интегральных схем (ИС)** в зависимости от назначения требуется формировать пленки следующих типов:

1. Металлизирующее контактное покрытие

Должны иметь:

- низкие собственные механические напряжения;
- воспроизводимую технологию осаждения;
- высоту потенциального барьера на кремнии *n*- и *p*-типов не более 0,5 эВ.

Должны обладать: низким сопротивлением контактов и хорошей совместимостью с вышележащим изолирующим слоем и межслойной изоляцией.

Типы плёнок

2. Металлизирующее покрытие затвора

Должны иметь:

- более высокую проводимость, чем сильнолегированный поликремний;
- воспроизводимое напряжение плоских зон в контакте с тонким затворным оксидом.

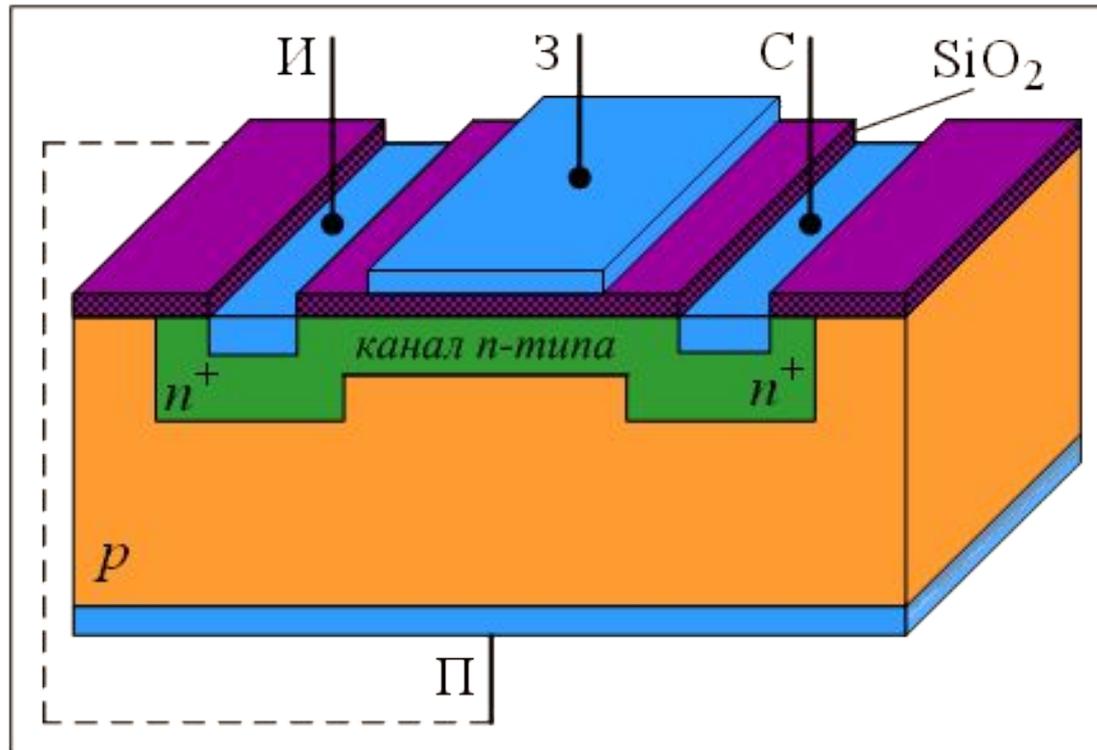
Не должны: реагировать с затворным оксидом.

3. Межэлементная изоляция

Изолирующие пленки должны:

- иметь прочную связь с поверхностью;
- противостоять электромиграции и коррозии;
- эффективно покрывать ступенчатый рельеф, типичный для структур после химической и плазменной обработки;
- позволять вести контролируемое травление узких линий с шириной менее 0,5 мкм.

Структура полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом n -типа



Типы плёнок

4. Диэлектрические материалы для защиты и пассивации кристалла

Должны иметь:

- низкие собственные механические напряжения;
- хорошее покрытие ступенчатого рельефа;
- управляемую скорость травления.

5. Металлизация для присоединения кристалла.

Пленка для контактов должна:

- обладать высокой надежностью;
- обеспечивать возможность ультразвуковой микросварки золотых и алюминиевых выводов.

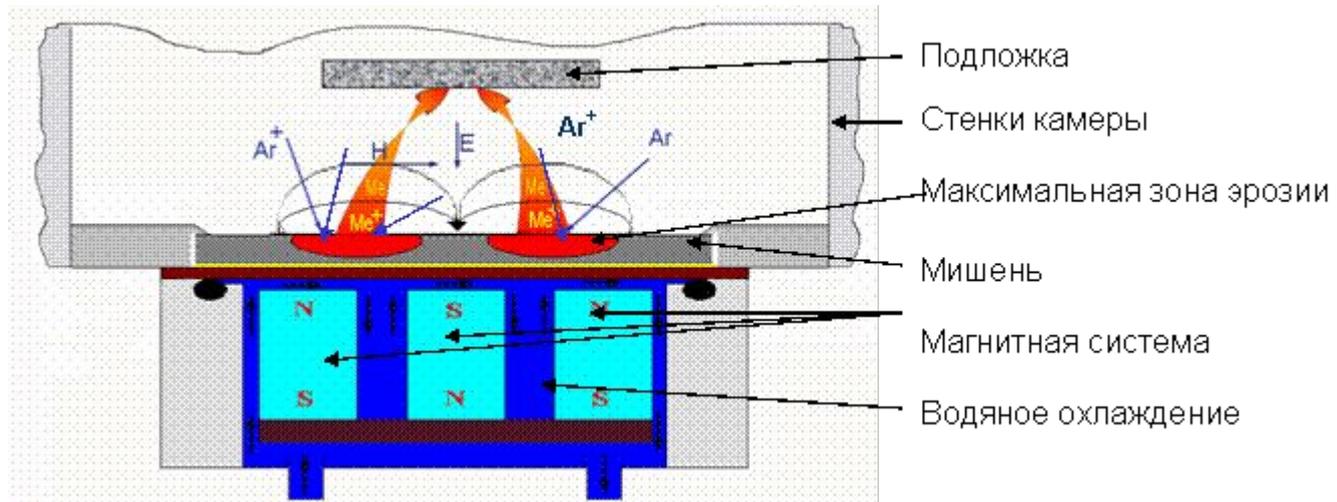
Ионно-плазменное нанесение

Ионно-плазменное нанесение включает в себя процессы создания пленок в вакууме на полупроводниковых и диэлектрических подложках, в которых необходимый для получения пленки материал переводится из твердой фазы в газовую **распылением мишени** энергетическими ионами инертных газов.

При этом источником энергетических ионов является **низкотемпературная плазма**.

Распыленные энергетическими ионами **частицы (атомы и ионы)**, осаждаясь на поверхность подложки, формируют **пленку материала**.

Ионно-плазменное нанесение



Одним из важнейших отличий ионно-плазменного нанесения от термовакuumного является

высокая энергия распыленных частиц 3...5 эВ
испаренные 0,15 эВ при $T_{исп} \sim 2000$ К

Это позволяет осаждающимся частицам частично внедряться в подложку, обеспечивая **высокую адгезию пленки к подложке**

Ионно-плазменное нанесение

Преимущества:

- возможность получения пленок **тугоплавких и неплавящихся** материалов, поскольку процесс распыления не требует расплавления материала;
- сохранение **стехиометрического состава** пленок при осаждении многокомпонентных материалов;
- **высокая энергия осаждаемых частиц** обеспечивает снижение минимальной температуры эпитаксиального роста;
- возможность **очистки подложки** и растущей пленки ионной Бомбардировкой: до, в процессе и после окончания процесса нанесения

Ионно-плазменное нанесение

Процесс ионно-плазменного нанесения тонких пленок является комплексным и состоит из нескольких этапов, основными из которых являются:

- **ионизация** рабочего газа;
- **бомбардировка** и **распыление** энергетическими ионами материала мишени;
- **перенос** распыленного материала в пространстве мишень – подложка;
- **осаждение** распыленного материала на подложке.

Ионно-плазменное нанесение

Основным параметром процесса ионно-плазменного нанесения является **скорость осаждения**:

$$v_{oc} = (v_p \alpha / s) \int \beta ds,$$

v_p - скорость распыления материала;

α - коэффициент прилипания распыленных частиц материала к подложке;

β - вероятность поступления распыленных с элемента поверхности мишени ds частиц на подложку;

s - площадь распыляемой мишени.

Ионно-плазменное нанесение

Скорость распыления v_p , в свою очередь, является сложной функцией энергии и распределения по энергиям бомбардирующих **ионов** и имеет от них интегральную зависимость:

$$v_p \approx \int S(E) j(E) dE$$

$S(E)$ - коэффициент распыления;

$\int j(E) dE$ - распределение по энергиям плотности тока ионов, бомбардирующих мишень.

Скорость осаждения:

$$v_{oc} \approx (\alpha / s) \iint \beta S(E) j(E) dE ds$$

Ионно-плазменное нанесение

Эффективность протекания процесса ионно-плазменного нанесения определяется всеми тремя параметрами:

- распылением (скорость распыления v_p);
- переносом (параметр β);
- конденсацией (параметр α).

Каждый из параметров влияет на совокупную скорость ионно-плазменного нанесения.

Еще в большей степени параметры влияют на качество получаемых пленок. Распыленные под действием ионов частицы имеют **нейтральный электрический заряд**. Как правило, это молекулы или нейтральные атомы. Степень ионизации распыленных частиц мала и не превышает 1 %.

Когда ионная бомбардировка перпендикулярна плоскости мишени, то частицы скорее всего распыляются в перпендикулярном направлении от мишени.

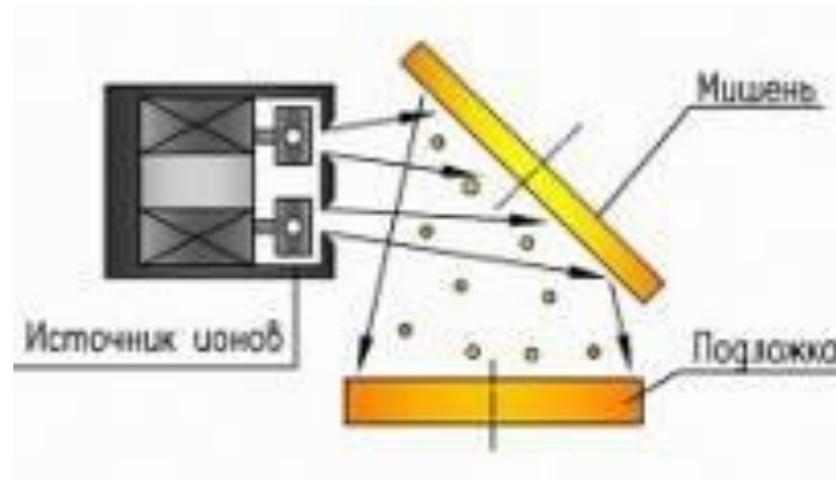
При энергиях ионов от 1 до 3 кэВ распределение распыленных частиц близко к закону Ламберта - Кнудсена (**закону косинуса**).

Ионно-лучевое нанесение

При ионно-лучевом нанесении распыляемая мишень и подложка находятся вне плазмы.

Распыление мишени осуществляется пучком ионов, направляемым на мишень из автономного источника.

Поскольку в этом случае на мишень и подложку **не воздействуют другие частицы и излучение плазмы**, то ионно-лучевое нанесение можно рассматривать как некую идеализацию ионно-плазменного нанесения



Ионно-лучевое нанесение

Преимущества:

- низкое рабочее давление (10^{-3} - 10^{-2} Па);
- отсутствие электрического и магнитного полей в области подложки;
- точный перенос стехиометрического состава материала мишени;
- возможность управления энергией ионов, бомбардирующих мишень;
- возможность существенного повышения скорости распыления мишени за счет бомбардировки ионами под углом к ее поверхности, что невозможно при магнетронном распылении.

Это важно в связи с переходом от микроструктур к наноструктурам, для формирования которых требуются однослойные или многослойные диэлектрические пленки существенно меньшей толщины, высокого качества и различного состава.

Реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное нанесение пленок

Получение **пленок различных соединений** (например, окислов или нитридов) при введении в газоразрядную плазму химически активных (*реактивных*) газов.

Используется эффект **повышения химической активности** молекул реактивного газа в разряде и эффект **энергетической активации** поверхности.

При этом, по крайней мере, **один из компонентов** в составе получаемых на подложках пленок вводится в рабочую камеру в виде **газа**.

Меняя состав и давление реактивного газа, можно получать в виде тонких пленок различные **сложные соединения**.

Химическое соединение распыляемого материала и реактивного газа может образоваться как на **поверхности мишени** или **растущей пленки**, так и **внутри потока** распыляемых частиц.

Реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное нанесение пленок

Существует некоторое **критическое давление** реактивного газа, при котором образование химического соединения идет на поверхности мишени.

В этом случае **распыляется** не исходный материал, а **новое соединение**.

При достижении критического значения давления происходит резкое падение скорости распыления. Это связано с более высокой, чем в структуре исходного нанокompонентного материала, энергией связи атомов материала в соединении.

Например, атомы алюминия имеют энергию связи на уровне 5 эВ, а в структуре оксида алюминия энергия связи достигает 19 эВ.

Реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное нанесение пленок

Падение скорости ионно-плазменного распыления при увеличении парциального давления реактивного газа, например кислорода, объясняется кинетической теорией газов.

Число молекул кислорода, поступающих на поверхность распыляемой мишени

$$n_0 = \frac{1}{4} N_O \bar{v}_{ap}$$

N_O - число молекул кислорода в единице объема

\bar{v}_{ap} – средняя арифметическая скорость молекул газа

Полная скорость распыления материала мишени складывается из скоростей распыления собственно материала и адсорбированного на поверхности кислорода:

$$v_p = (1 - \theta)v_{p.m} + \theta v_{p.O}$$

θ - доля атомов материала мишени, закрытых адсорбированным кислородом

$v_{p.m}$ - скорость распыления материала мишени

$v_{p.O}$ - скорость распыления кислорода

Реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное нанесение пленок

Критическое давление кислорода $p_{кр}$, необходимое для образования оксида, определяется соотношением

$$p_{кр} = 5,4 \cdot 10^{10} \frac{v_{р.м}}{\Delta G}$$

ΔG - свободная энергия образования оксида

При непосредственной бомбардировке мишени ионами кислорода скорость образования оксида существенно возрастает, и критическое давление уменьшается.

Атомарный кислород химически более активен, чем молекулярный. То же относится и к атомарному водороду и азоту.

Реактивное ионно-лучевое и реактивное ионно-плазменное нанесение пленок

При ионно-плазменном распылении соединения может происходить нарушение его **стехиометрии**.

Стехиометрия пленок, получаемых ионно-плазменным и ионно-лучевым реактивным распылением, зависит от **температуры подложки**.

При высоких скоростях нанесения и низких температурах обычно получаются **пленки низкого качества** (например, пористые) и с плохо воспроизводимым составом.

Ионное осаждение пленок

Ионное осаждение – процесс осаждения пленок в вакууме, при котором конденсация материала на подложке осуществляется из потока низкоэнергетических ионов. При этом процесс осаждения сопровождается ионной активацией поверхности подложки и растущей пленки.

Процесс осаждения происходит в три стадии:

- 1) термическое испарение** осаждаемого материала при резистивном, лазерном или электронно-лучевом нагреве;
- 2) ионизация** испаренных атомов материала с помощью неоднородного электрического поля, лазерного луча или высокоэнергетического пучка электронов;
- 3) фокусировка** ионов в пучок необходимой конфигурации и их последующая транспортировка на подложку.

Ионное осаждение пленок

Метод позволяет изменять в широких пределах такие параметры ионного потока, как:

- **энергия ионов**
- **плотность** потока
- **соотношение** в потоке ионов и нейтральных атомов

Главной отличительной особенностью процесса ионного осаждения является то, что он осуществляется в условиях **высокого вакуума** (порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$ Па).

Это приводит к существенному улучшению качества пленок и уменьшению вероятности захвата растущей пленкой остаточных газов.

Конденсирующийся материал более равномерно распределяется по подложке, происходит сглаживание поверхности пленки и увеличение ее плотности.

Так, плотность танталовых пленок, полученных ионным осаждением, на 10 % выше, чем распыленных ионно-плазменным методом.

Плазменно-дуговое напыление

Плазменно-дуговое напыление используется в электронной промышленности при изготовлении покрытий :

- эмиссионных,
- антиэмиссионных,
- геттерных,
- поглощающих СВЧ-энергию,
- электроизоляционных.

В настоящее время разработано большое число конструкций электродуговых нагревателей газа.

Наиболее простой вариант представляет **дуговой электрический разряд**, горящий между двумя торцевыми электродами.

В этом случае за разрядом образуется плазменная струя с высокой температурой.

Плазменно-дуговое напыление

Напыляемый материал разогревается до жидкого состояния и переносится на обрабатываемую поверхность при помощи потока плазмы.

Напыляемый материал выпускается в виде прутков, порошков или проволоки. Порошковый способ наиболее распространенный

Типовой технологический процесс изготовления плазменно-дуговых покрытий состоит из следующих операций:

- выбора напыляемого материала;
- ситового анализа порошка;
- обезгаживания порошка в вакууме;
- подготовки поверхности подложки под напыление;
- напыления;
- финишной обработки покрытия (термической или механической).

Наибольшее распространение плазменно-дуговые процессы получили при распылении мишени из **диборида циркония, титана и гидрида титана** на сетку мощных генераторных ламп.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

Три эффекта воздействия плазмы низкого давления на процессы осаждения слоев из газовой фазы:

1. Кинетический эффект.

Под этим термином подразумевается изменение скорости протекания реакций.

С термодинамической точки зрения протекание реакции в данных условиях возможно и **без плазмы**, но **скорость** осаждения чрезвычайно **мала** для практического использования.

Воздействие плазмы открывает возможность для новых реакций, в которых участвуют **радикалы, ионы и электроны**.

Разряд с низкой плотностью тока ($j < 1 \text{ мА/см}^2$) обычно достаточен для значительного увеличения скорости реакции.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

2. Термодинамический эффект.

В интенсивном плазменном разряде с плотностью тока $j > 100 \text{ мА/см}^2$ преобладают обратные реакции с участием радикалов, присутствующих в газовой смеси.

В результате этих реакций в системе устанавливается уникальное химическое равновесие, не имеющее аналогов при обычном химическом осаждении слоев.

При введении плазменного возбуждения реагентов, равновесие системы сдвигается и слои осаждаются при меньших температурах.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

3. Эффект воздействия плазмы на структуру материала.

При осаждении тонких слоев в плазме подложки могут находиться либо под потенциалом, близким к потенциалу плазмы, либо под большим отрицательным потенциалом.

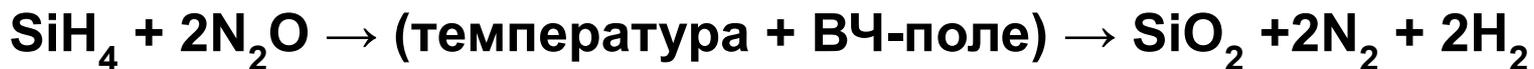
При отрицательном потенциале подложки **5...20 В** относительно плазмы поверхность подложки подвергается бомбардировке положительными ионами с энергиями соударения в несколько электронвольт, что ниже порога распыления.

В ходе поглощения энергии поверхностью растущего слоя и ее перераспределения в материале образуются термодинамически стабильные структуры, обладающие:

- большой плотностью;
- сжимающими напряжениями;
- малым размером зерен;
- улучшенной адгезией.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

В качестве исходных реагентов при получении диоксида кремния обычно используется **силан** и **закись азота** или **кислород**



В качестве источника кремния может служить также тетрахлорсилан, тетраэтоксисилан, а в качестве окислителя – диоксид углерода.

Однако применение этих реагентов ограничено необходимостью использования более **высоких температур** для получения качественных пленок и возможностью **загрязнения** пленок хлором и углеродом.

Осаждение диоксида кремния обычно проводится в системах с внутренними плоскопараллельными электродами. Как правило, они представляют собой вакуумную камеру с плоскими электродами, между которыми поддерживается ВЧ-разряд при непрерывной откачке газа.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

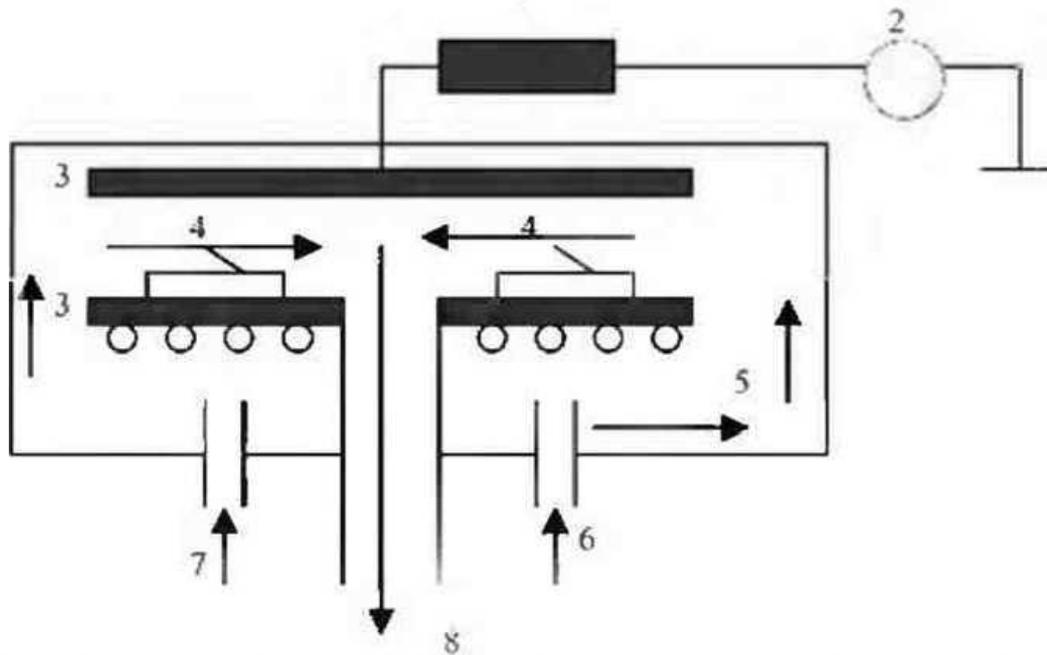


Схема устройства с плоско-параллельными электродами для плазмохимического осаждения пленок

Диаметр электродов в промышленных установках составляет 40-60 см, а расстояние между ними 5-10 см.

Электроды 3, потоки газов 6, 7, горизонтальное размещение пластин на нижнем заземленном и подогреваемом электроде 5. Для согласования ВЧ-цепи (13,5 МГц) между источником питания 2 и электродом 3 помещается устройство согласования 1

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

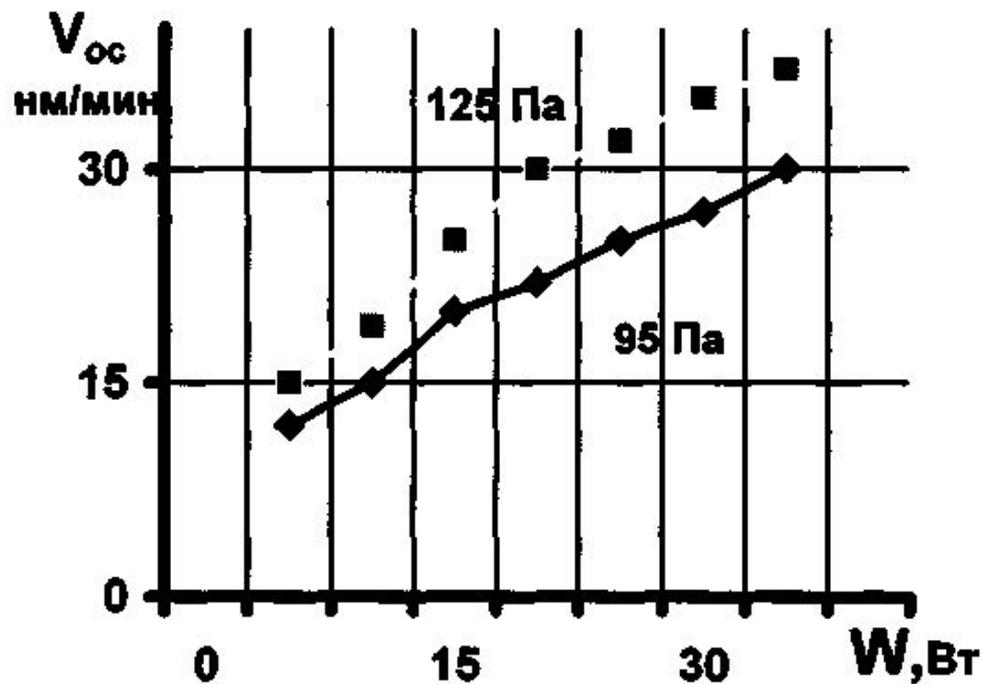
Основными факторами, влияющими на скорость осаждения и равномерность пленки, являются **ВЧ-мощность, расход газа и давление в камере.**

Процесс осаждения пленки SiO_2 из смеси силана SiH_4 , закиси азота N_2O , кислорода O_2 с небольшим количеством аргона в качестве газа носителя при давлении газовой смеси в камере - 100 Па.

Расход газа : SiH_4 -70, N_2O -2500, O_2 -14, Ar-100 $\text{cm}^3/\text{мин}$.
Температура подложки - 650 К.

В качестве основного окислителя используется: закись азота, препятствующая зародышеобразованию в газовой фазе.

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния



Влияние ВЧ-мощности на скорость осаждения диоксида кремния в разряде из смеси силана, закиси азота, кислорода и аргона

Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

В оксидных пленках, осажденных в плазме, содержится также 5-10% **водорода** в виде SiH, SiOH и H₂O.

Концентрация водорода сильно зависит от температуры осаждения, причем большей температуре соответствует **меньшая концентрация водорода**.

В большинстве случаев пленки диоксида кремния на кремниевых и арсенид галлиевых подложках испытывают при комнатной температуре напряжения сжатия. Величины напряжения, достигающие $4 \cdot 10^8$ Н/м², зависят, главным образом, от *температуры подложки и скорости осаждения*.

Электрические свойства пленок, такие, как **напряжение пробоя** и **величина диэлектрической проницаемости**, также зависят от условий осаждения. Для уменьшения плотности поверхностных состояний после осаждения применяют отжиг в смеси азота с водородом при температуре 625 К.

Плазмохимическое осаждение пленок нитридов

Для осаждения нитрида кремния Si_3N_4 в тлеющем ВЧ-разряде обычно используются те же реакторы, что и для получения диоксида кремния.

Преимущественно используются исходные реагенты в виде силана SiH_4 и аммиака NH_3 или азота N_2 , и реакция протекает следующим образом:



Плазмохимическое осаждение пленок нитридов

Благодаря низкой энергии диссоциации NH_3 , **составом осаждаемых слоев можно управлять** в широком диапазоне параметров процесса.

Обогащенные кремнием слои, как правило, менее плотные и содержат большое количество дефектов, таких, как Si-оборванные связи, Si-Si-связи, группы Si-H.

Эти дефекты образуют локализованные состояния в запрещенной зоне и играют роль ловушечных или рекомбинационных центров в нитриде кремния.

Все это приводит к ухудшению диэлектрических свойств:

- увеличению токов утечки,
- уменьшению напряжения пробоя,
- ухудшению зарядовых характеристик,
- к сдвигу края оптического поглощения в слоях нитрида кремния в область больших длин волн.

Плазмохимическое осаждение пленок нитридов

Плазмохимический нитрид кремния содержит **большое количество водорода** (10-40 %), образующего связи Si-H и N-H, что существенно изменяет свойства пленок.

При более высокой концентрации водорода уменьшается плотность пленок, при этом увеличивается скорость их травления в жидкостных травителях.

Ухудшается термическая стабильность, а также другие электрофизические свойства.

Отжиг при температуре 870-970 К приводит к разрыву водородных связей, однако, при этом возможно образование в пленке микроскопических пузырьков и пор, вызванных накоплением водорода.

Плазмохимическое осаждение пленок нитридов

Хотя пленки нитрида кремния достаточно проницаемы для Na^+ и других примесей, они широко применяются в качестве **пассивирующих слоев**, особенно в приборах с пластмассовой герметизацией.

Низкая температура осаждения, хорошие диэлектрические и механические характеристики делают их пригодными для применения в качестве **межслойного диэлектрика**.

Использование нитрида кремния и диоксида кремния, полученных в ВЧ-плазме, **на активной области ИС не практикуется** из-за связанного с плазменным нанесением увеличением встроенного заряда и других побочных явлений, происходящих под действием ионной, электронной и фотонной бомбардировки.

Ионно-плазменное нанесение тонких пленок нитрида алюминия

Применение тонких слоев нитрида алюминия для **пассивации** и **маскирования поверхности ИС** обуславливает интерес к разработке и совершенствованию методов их получения.

Большой интерес представляет применение нитрида алюминия в структурах **полупроводник - нитрид алюминия - полупроводник** на основе кремния и арсенида галлия или карбида кремния, которые являются альтернативой структурам типа кремний на сапфире (КНС-структуры), а также могут быть использованы для создания многоуровневых БИС и в оптоэлектронных устройствах.

Ионно-плазменное нанесение тонких пленок нитрида алюминия

Среди вакуумных методов наибольший интерес представляет способ планарного ВЧ-магнетронного распыления, как наиболее эффективный и универсальный.

Скорость роста слоев зависит от ВЧ-мощности и давления реакционных газов.

При температуре осаждения 625 К скорость роста достигает 5 мкм/ч.

Для повышения эффективности и улучшения однородности толщины слоев по подложке предложены новые варианты распылительных устройств, например ионно-распылительный.

Рабочая камера с противоположно расположенными мишенями предусматривает использование двух мишеней из алюминия, расположенных на расстоянии 100 мм одна от другой

Ионно-плазменное нанесение тонких пленок нитрида алюминия

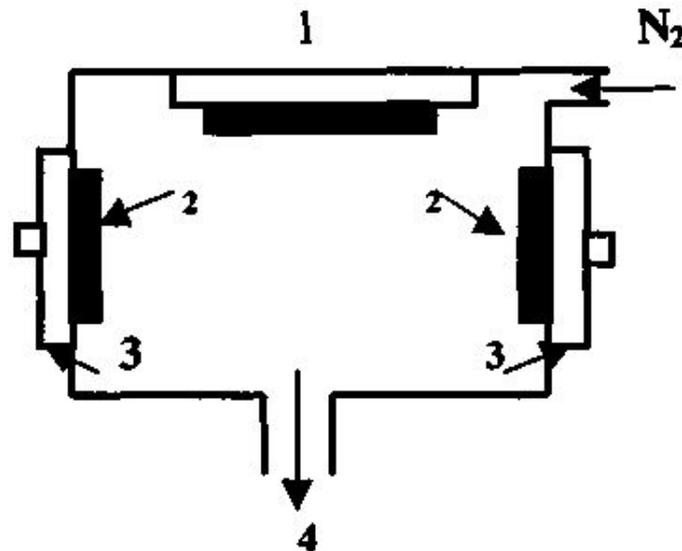


Схема ВЧ-магнетронной распылительной установки с двумя противоположно-расположенными мишенями:

1- подложкодержатель с подложкой и нагревателем; 2 - мишени из алюминия; 3 - ВЧ-магнетроны; 4- откачка

Распыление ведут при давлении 1,0-2,6 Па со скоростью осаждения на подложку, размещенную вблизи зоны тлеющего разряда, 1,6-13,0 нм/мин, температура кремниевых подложек 300-823 К.

Ионно-плазменное нанесение тонких пленок

Преимущества:

Ионно-плазменные методы позволяют получить чрезвычайно однородные по толщине зеркально-гладкие слои и обрабатывать подложки в полунепрерывном процессе партиями, даже из нетугоплавких материалов, например, **арсенида галлия, алюминия, стекла, полимеров** и др.

Недостатки:

В то же время при использовании этих методов **скорость осаждения была относительно низкая, технологический цикл продолжительный**, и кроме того, наблюдалось **нарушение стехиометрии состава** для низкотемпературного осаждения.

Ионное внедрение

Метод ионного внедрения позволяет вводить контролируемые количества примесей в поверхностный слой полупроводника.

В этом отношении он подобен обычным методам полупроводниковой электроники, таким, как диффузия и сплавление.

С точки зрения полупроводниковой электроники наиболее важными характеристиками легированного слоя является **сопротивление**, а также **положение** и **характеристики p-n-перехода**.

Эти параметры определяются в первую очередь распределениями внедренных атомов и дефектов, именно от них зависят **концентрация, подвижность и время жизни носителей**.

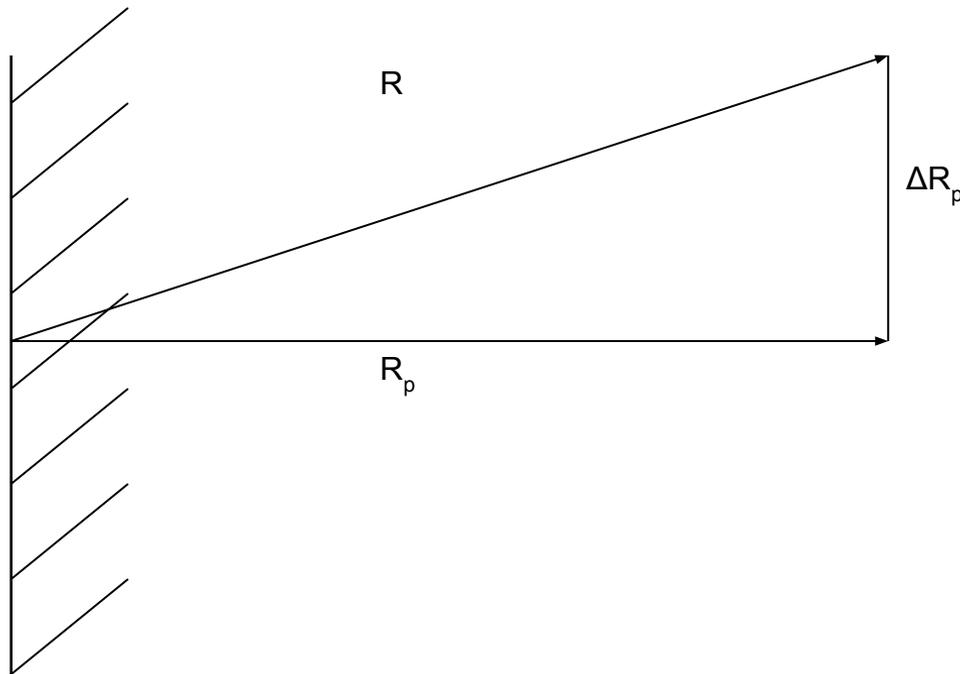
Ионное внедрение

Важными технологическими параметрами являются:

R – полный пробег ионов в твердом теле

R_p – проецированный пробег ионов в твердом теле

ΔR_p – среднеквадратическое отклонение пробега ионов в твердом теле.



Ионное внедрение

Распределение пробегов в аморфном теле приближенно соответствует гауссовой кривой со средним **проецированным пробегом R_p** и **стандартным отклонением ΔR_p** .

В большинстве случаев при ионном легировании более 90 % внедренных ионов приходится на такое «аморфное» распределение.

Остальная же часть ионов составляет длиннопробежный «хвост» распределения, обусловленный канализованием или стимулированной диффузией.

R_p и ΔR_p зависит от энергии E и массы M_1 иона и массы M_2 атомов подложки.

R_p зависит от отношения E/M_1 .

Полуширина кривой распределения $2,5\Delta R_p$ приблизительно равна R_p
В кремнии при энергиях ионов (от бора до сурьмы) 20 - 100 кэВ равенство $2,5\Delta R_p \approx R_p$ выполняется с погрешностью $\pm 30\%$.

Ионное внедрение

В процессе внедрения ионы останавливаются, занимая нерегулярные положения в кристаллической решетке, вследствие ядерных столкновений возникает **большое количество радиационных дефектов** вплоть до образования аморфных областей.

При соответствующей термообработке кристаллическую решетку восстанавливают, при этом внедренные ионы занимают в решетке подложки электрически активное положение.

Реальные профили распределения легируемых ионов существенно отличаются от расчетных из-за влияния диффузий.

При изготовлении полупроводниковых приборов применяют маскирующие пленки. Легирование проводят через такие пленки.

Ионное внедрение

Даже небольшие дозы легирования существенно влияют на электрические свойства полупроводников – значительно уменьшают **время жизни** неосновных носителей заряда, их **подвижность** и **концентрацию**.

Радиационные дефекты изменяют также некоторые физические свойства полупроводников – увеличивают **показатель преломления** (отражательную способность), что используют для получения световодов, а также ряда электрических оптических приборов.

Ионное легирование с большими дозами в монокристаллических полупроводниках всегда изменяет **объем** легированного слоя. В большинстве случаев (для Si) объем увеличивается; при этом возникают напряжения, приводящие к прогибу подложки.

Ионное внедрение

После отжига ионно-легированных слоев или в процессе отжига образуются многочисленные дефекты, главным образом **дислокации** и **дефекты упаковки**.

Концентрация этих дефектов не велика. Эти дефекты влияют на:

- увеличение обратного тока,
- снижение пробивного напряжения,
- время жизни неосновных носителей заряда.

Применяемый в этом случае отжиг зависит от сорта внедряемого иона и проводится при разных температурах (500-1000) °С, а также в разных средах (окислительной, нейтральной и др.).

Наряду с рекристаллизацией решетки полупроводниковой подложки отжиг должен способствовать электрической активации внедренных ионов.

Ионное внедрение

Для локального введения примеси в твердое тело применяют **контактное** или **проеекционное** маскирование.

При контактном маскировании в качестве маскирующего материала применяют металлы (Al, Au, Pt, Ti), диэлектрики (SiO_2 , Si_3N_4 и др.) и фоторезисты.

Для того чтобы затормозить ионы,
-маскирующие пленки должны быть достаточно толстыми,
-коэффициент распыления - низким,
-пленки после легирования - хорошо растворяться (для удаления их с поверхности подложки).

Фоторезисты применяют при температурах до $100\text{ }^\circ\text{C}$ и дозах до 10^{14} см^{-2} (дальше идет полимеризация фоторезиста).

Ионное внедрение

Если при легировании через пассивирующие пленки масса легирующего иона равна массе атома пленки, то ионы передают этим атомам значительную энергию, и атомы сами могут быть внедрены в материал подложки. Этот эффект называется *легированием атомами отдачи*.

Пассивация для защиты от обратной диффузии.

Пассивирующие слои применяют также во время отжига для предотвращения обратной диффузии какого-либо компонента материала полупроводниковой подложки или обратной диффузии легирующих ионов. Для этого используют пленки из SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , которые наносят низкотемпературным распылением (или напылением).

Ионное внедрение

Очень важным эффектом (почти всегда сопутствует процессу ионного легирования) является **диффузия**

- термическая,
- междоузельная,
- в процессе отжига в окислительной среде,
- радиационно-ускоренная.

Термическая диффузия появляется как в процессе отжига, так и в процессе ионного легирования если происходит значительный нагрев полупроводниковой подложки за счет выделяющейся мощности ионного пучка.

Междоузельная диффузия возникает в результате того, что часть легирующих ионов останавливается в решетке в нерегулярных положениях и может быстро диффундировать по междоузлиям. Этот вид диффузии характерен для атомов, имеющих малый радиус (Au, Cu).

Ионное внедрение

Отжиг в окислительной среде, проводят при 900 - 1100°С, толщина оксидной пленки обычно 10 - 300 нм. Возникающее при этом перераспределение примеси, между подложкой и растущей оксидной пленкой влияет на профили распределения ионов примеси вызывая обогащение, или обеднение поверхности полупроводника примесью.

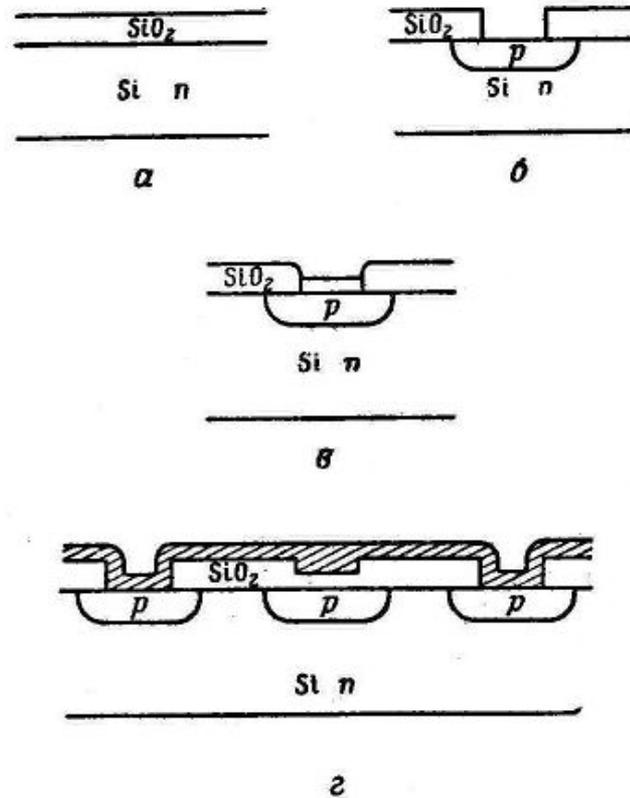
Радиационно-ускоренная диффузия происходит в результате дополнительной бомбардировки химически неактивными частицами, которые создают вакансии, увеличивая коэффициент диффузии. Этот вид диффузии проявляется либо непосредственно в процессе легирования, либо после внедрения ионов в результате облучения поверхности подложки электрически неактивными частицами (α -частицы, нейтроны, протоны и т. п.).

Применение ионного легирования в планарной технологии

Планарная технология состоит из следующих операций:

- диффузии донорных и акцепторных примесей через окна в слое окисла,
- термического выращивания двуокиси кремния,
- осаждения паров двуокиси или нитрида кремния на термически выращенный оксид,
- металлизации (обычно алюминием) поверхности окисных слоев для обеспечения контакта с сильно легированным слоем.

Применение ионного легирования в планарной технологии



а – окисление;

б – диффузия сквозь окна в окисле;

в – наращивание изолирующего слоя методом реактивного напыления;

г – нанесение металлического электрода.

Применение ионного легирования в планарной технологии

Оксидные и нитридные слои получают обычно при средних температурах:

- оксидные при $\sim 450^{\circ}\text{C}$,
- нитридные при $\sim 800^{\circ}\text{C}$.

Контакты и токоведущие дорожки получают напылением металлических слоев при комнатной или несколько более высокой температуре с последующим вжиганием при температуре, несколько меньшей температуры плавления (вплавление алюминиевых электродов обычно проводится при 550°C в течение 10 мин).

После того как на пластину нанесен металл, нагрев выше температуры плавления исключается.

Применение ионного легирования в планарной технологии

При разработке технологии изготовления приборов особое внимание нужно обращать на то, чтобы **температурные режимы последующих операций** не искажали результатов предыдущих.

Обычно для этого достаточно проследить за тем, чтобы каждая операция проводилась **при более низкой температуре**, чем предыдущая.

Эти требования к последовательности температур – самый серьезный недостаток технологии, сужающий возможности ее применения в производстве полупроводниковых приборов

Применение ионного легирования в планарной технологии

В рамках планарной технологии ионное внедрение может применяться при легировании полупроводников

- для введения фиксированного количества заданной примеси в локализованную область

- для создания контролируемого профиля концентрации в заданной области

В первом случае ионное внедрение выступает как предварительная операция, вслед за которой можно проводить высокотемпературную диффузию для получения желаемого профиля распределения примеси. Здесь возможно непосредственное применение операций обычной диффузии и термического выращивания оксида и никакого конфликта с планарной технологией не возникает.

Во втором случае, когда требуемый профиль распределения примеси нужно получить в результате самого ионного внедрения, высокотемпературные операции должны быть исключены во избежание диффузионного уширения профиля.

Оборудование для ионного легирования

Ионный источник состоит из устройств для получения заданных ионов (**собственно ионный источник**) и их экстракции:

- разрядной (ионизационной) камеры (она же часто несущая конструкция);
- анода, создающего электрическое поле внутри разрядной камеры;
- источника электронов (нагреваемого термокатода, холодного или полого катода), служащего для эмиттирования их в зону разряда;
- магнитной системы (для повышения эффективности ионизации);
- экстрагирующего электрода и электрода первичной фокусировки (для экстракции ионов из зоны плазмы);
- системы подачи рабочего газа или устройства испарения (распыления) твердого легирующего материала;
- системы источников питания (для обеспечения необходимых анодного и экстрагирующего потенциалов, а также питания катода и электромагнитной системы).

Оборудование для ионного легирования

Ионные источники должны:

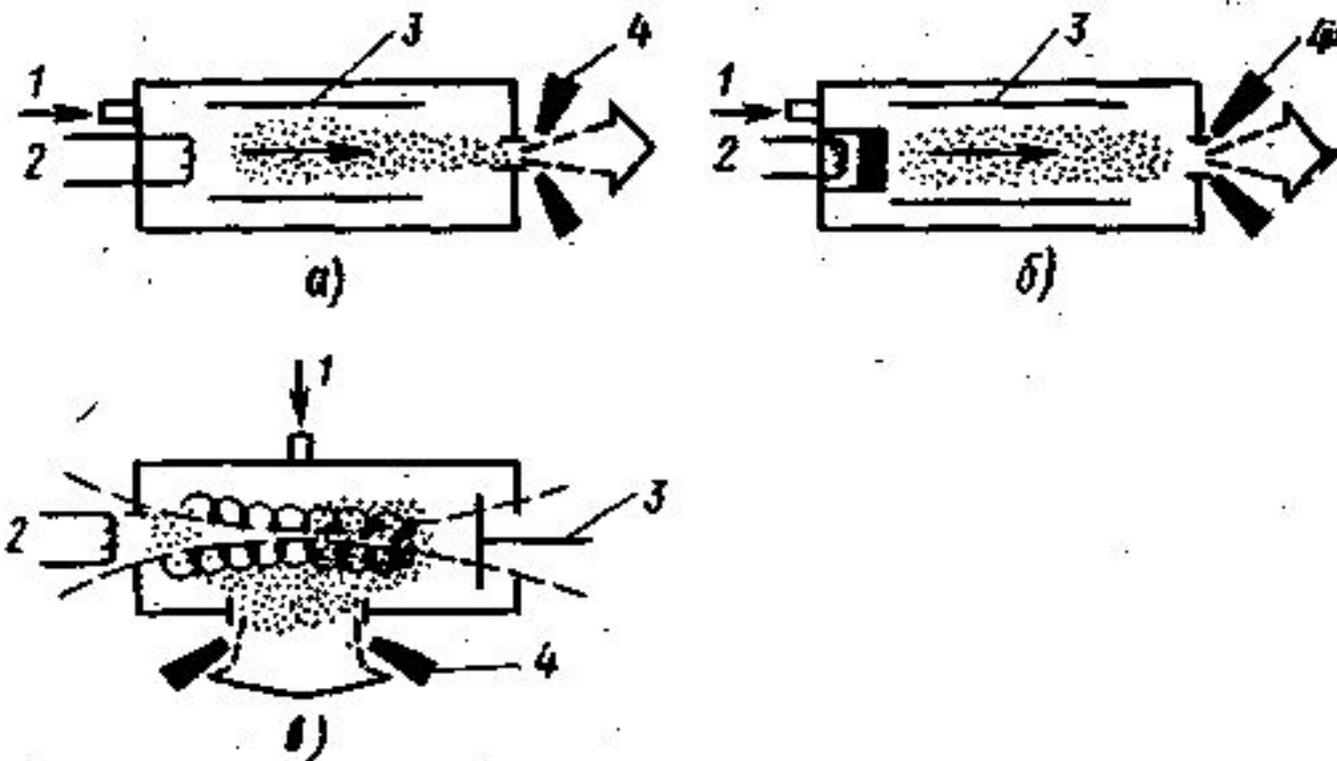
- генерировать однородный высокоинтенсивный ионный пучок со стабильными во времени параметрами, двухзарядный ионный пучок с высоким выходом и пучок молекулярных ионов;
- получать предельную плотность ионного тока при максимально низких экстрагирующих напряжениях;
- ионизировать газообразные (BF_3 , BCl_3 , AlCl_3 , AsF_3 , PCl_3 , O_2 , N_2 и т. п.) и твердые (B, As, Sb, Al) вещества;
- заменять легирующий элемент во время технологического процесса;
- формировать ионный пучок заданного сечения;
- быть простым в управлении и обладать значительным временем наработки на отказ катода и всего источника.

Оборудование для ионного легирования

Все требования обеспечить в одном источнике невозможно. Используют различные типы для работы с различными ионами. Наиболее распространенными являются:

- источник с горячим катодом;
- источник с холодным катодом;
- источник с полым катодом;
- дуоплазмотрон;
- источники с ВЧ- и СВЧ-возбуждением;
- источник с поверхностной ионизацией;
- источник типа «плазма-поток».

Оборудование для ионного легирования



Ионные источники с горячим катодом – прямого (а, в) и косвенного (б) накала: 1-система подачи газа, 2-катод, 3-анод, 4-экстрактор

Оборудование для ионного легирования

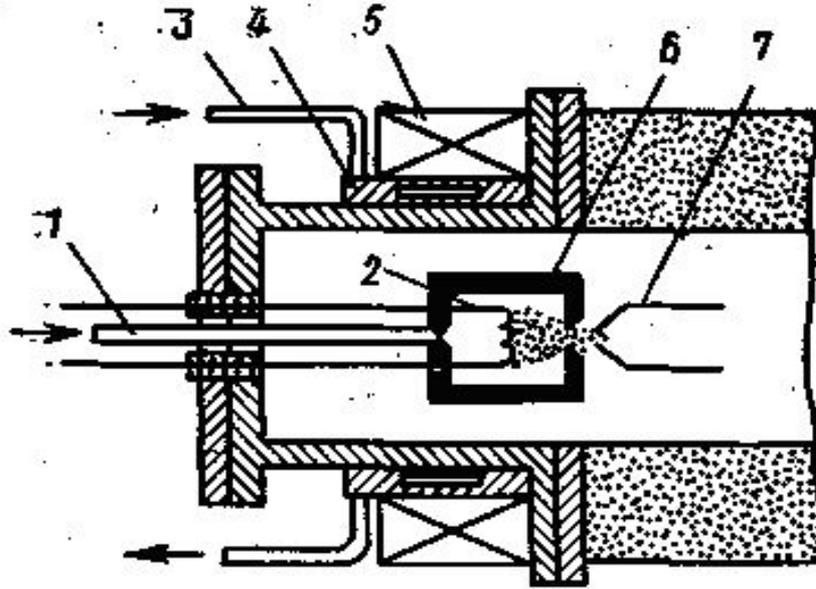


Схема ионного источника с горячим катодом:

1-ввод газа,

2-катод,

3-ввод охлаждающей жидкости,

4-держатель,

5-электромагнит,

6-разрядная камера,

7-экстрактор

Оборудование для ионного легирования

Эмиттером в источнике с горячим катодом является вольфрамовый накаливаемый катод, укрепленный на танталовых держателях и находящийся под отрицательным относительно земли потенциалом 100 В. Катод расположен внутри цилиндрической разрядной камеры (анода), изготовлен из графита высокой чистоты и электрически изолирован от нее втулкой, выполненной из оксида алюминия.

Большинство деталей источника изготовлены из нержавеющей стали. Эмитированные катодом электроны ускоряются за счет разности потенциалов в радиальном направлении к стенкам разрядной камеры; при этом, они находятся в зоне действия аксиального магнитного поля, создаваемого охлаждаемым электромагнитом, и вызывают интенсивную ионизацию рабочего газа, подающегося в разрядную камеру.

Время наработки на отказ катода составляет 100 ч. В данном источнике получают ионы различных материалов, используя газообразные источники (BP_3 , PH_3 , H_2 , Ar и др.) либо твердые (As, Al и др.).

Оборудование для ионного легирования

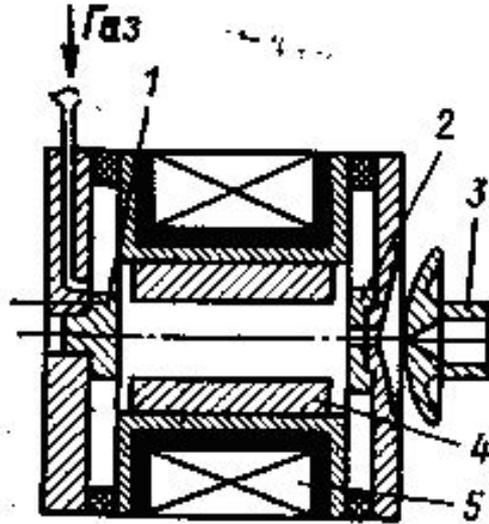


Схема источника с холодным катодом и разрядом Пеннинга:

1-катод,

2-антикатод,

3-система экстракции,

4-анод,

5-соленоид

Оборудование для ионного легирования

Цилиндрический кольцевой анод в источнике Пеннинга размещен между параллельно расположенными катодом и антикатодом, изготовленными из алюминия и титана.

Ионы вытягиваются через отверстие в антикатоде.

Источник может работать без замены катода до 1000 часов и обладает высокой эффективностью ионизации (до 10^{14} см⁻³).

Недостатками такой конструкции являются низкий ток пучка на выходе (до 100 мкА), большая пульсация в пучке, возможность использования только газообразных веществ.

Система ионно-пучкового транспорта

Установки ионного легирования включают в себя устройства, предназначенные для транспортировки ионного пучка от ионного источника до мишени без изменения характеристик первичного сформированного пучка.

Система ионно-пучкового транспорта должна обеспечивать требуемые параметры легирующего ионного пучка в зоне мишени:

- энергию ионов,
- интенсивность пучка (плотность ионного тока),
- стабильность ионного тока во времени и по площади мишени,
- высокую изотопную чистоту пучка.

Транспортная система содержит:

- ускоритель ионов,
- устройства фокусировки, сепарации масс и сканирования ионного пучка,
- приемную камеру.

Устройства сепарирования

Устройства сепарирования масс предназначены для формирования изотопно чистого ионного пучка, т. е. для очистки его от сопутствующих примесей.

Эти устройства должны обеспечивать:

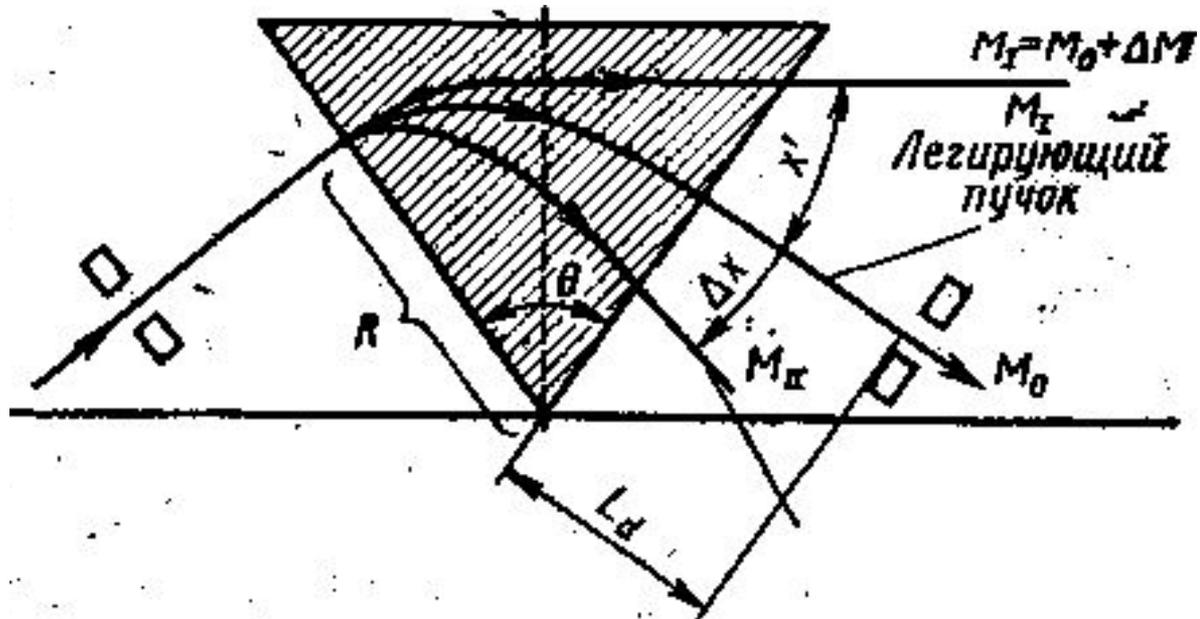
- сепарирование в широком диапазоне масс с высоким разрешением;
- минимальную аберрацию пучка и дополнительную его фокусировку в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также сохранение формы пучка;
- минимальное загрязнение пучка продуктами распыления стенок сепаратора при бомбардировке их отклоненными ионами.

Устройства сепарирования

Различают три метода сепарирования ионов:

- 1) по массам – с отклонением изотопно чистого легирующего пучка от первоначального направления (сепараторами служат магниты различной конфигурации);
- 2) по скоростям – без изменения направления легирующего пучка (используют ЕхВ сепараторы со скрещенными электрическим и магнитным полями);
- 3) по массам – с сепарацией ВЧ-фильтром.

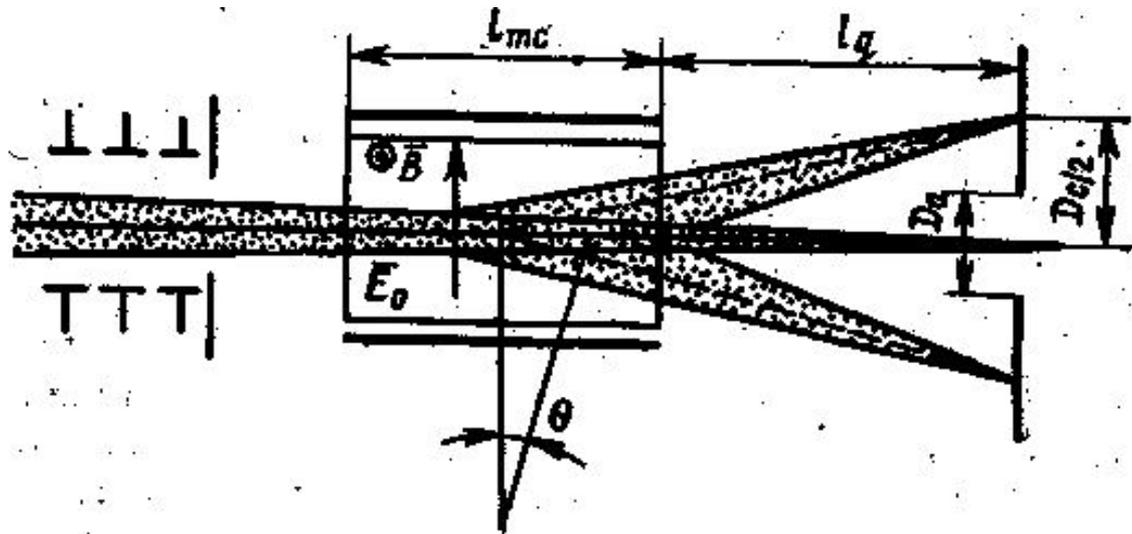
Устройства сепарирования



Принцип сепарации в масс-сепарации с секторным магнитом

Угол секторного магнита θ может быть 60, 65, 90 °. Секторные масс-сепараторы выполняют также функции фокусирующего элемента.

Устройства сепарирования



Принцип работы $E \times B$ – сепаратора

Ионно-оптические устройства с взаимно перпендикулярными электрическим и магнитным полями.

Электрическое поле E используют для компенсации воздействия на ион заданной массы M_1 силы Лоренца, создаваемой магнитным полем B .

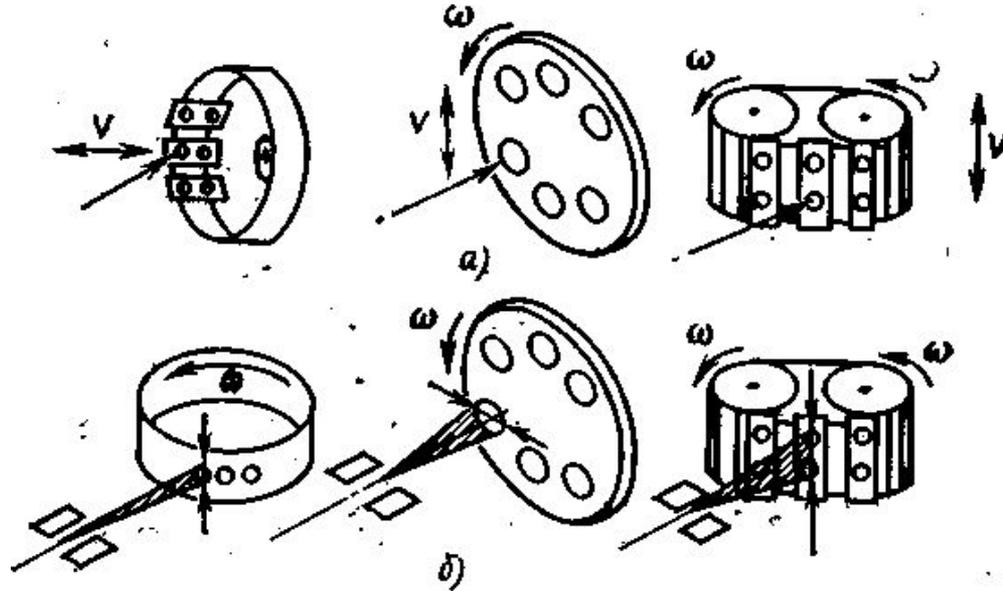
При определенных значениях магнитного и электрического полей, ионы с массой M_1 проходят через сепаратор по прямой линии.

Устройства сканирования

В устройстве ионного легирования применяют три вида устройств сканирования ионного пучка по поверхности обрабатываемой подложки:

- механическое, при котором ионный пучок неподвижен относительно мишени, а подложки перемещаются относительно пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- смешанное, при котором подложки перемещаются в одном направлении, а пучок электростатически сканируется в другом направлении;
- электростатическое – со сканированием пучка в двух направлениях по поверхности неподвижной подложки.

Устройства сканирования



Схемы механического (а) и смешанного (б) сканирования

Механическое сканирование осуществляется каруселью (или другим механизмом).

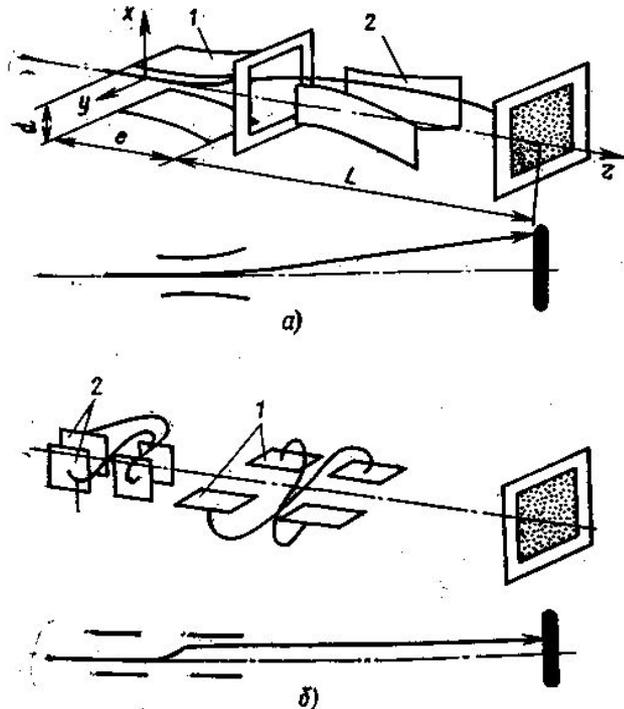
Достоинство этого метода – постоянство угла падения ионного пучка на поверхность подложки

Недостаток – сложный механизм перемещения подложки, наличие в вакуумной камере большого числа подвижных частей, требующих смазки, сложность контроля технологического процесса, ограниченная однородность легирования

Устройства сканирования

Электростатическое сканирование применимо в широком диапазоне энергий ионов. Этот метод обеспечивает высокую однородность легирования и эффективен при индивидуальной обработке подложек.

Недостатком этого метода является необходимость отвода от подложки теплоты, выделяющейся в процессе облучения.



Схемы полного электростатического сканирования ионного пучка с одинарным (а) и двойным (б) отклонением:

1-пластины вертикального сканирования,
2-пластины горизонтального сканирования

Приемные камеры

Приемные камеры предназначены для размещения легируемых полупроводниковых пластин, управления и контроля процессами их смены на позиции легирования, ориентации пластин относительно ионного пучка и их нагрева или охлаждения.

В установках ионного легирования применяют приемные камеры с индивидуальной и групповой обработкой пластин.

В установках имплантации малых доз в основном используют приемные камеры с загрузкой партии пластин и индивидуальным шлюзованием каждой пластины.

В первом случае партию пластин (примерно 25 шт.) помещают в камеру в кассете или на диске, легирование каждой пластины происходит индивидуально. Кассеты с пластинами загружают вручную или автоматически через шлюзовую камеру.

Литография

Технология осаждения тонких пленок позволяет с высокой точностью, например до 10 нм, выдерживать размер прибора в одном измерении, ***перпендикулярном*** плоскости подложки.

Формирование с такой же точностью рисунка на плоскости, т. е., в двух других измерениях, значительно сложнее.

Оно обычно осуществляется с помощью процесса литографий, появившегося на основе технологии контактной печати.

Развитие микроэлектроники происходит в направлении усложнения схем и уменьшения размеров рисунка.

В настоящее время рассматривается возможность получения линий шириной **0,014 мкм** с допусками в **0,005 мкм**. Для выполнения этих требований необходима разработка систем формирования рисунка и литографического процесса с очень высокой разрешающей способностью.

Литография

Рисунок формируется экспонированием соответствующих участков тонкого слоя резистивного материала, нанесенного на пластину:

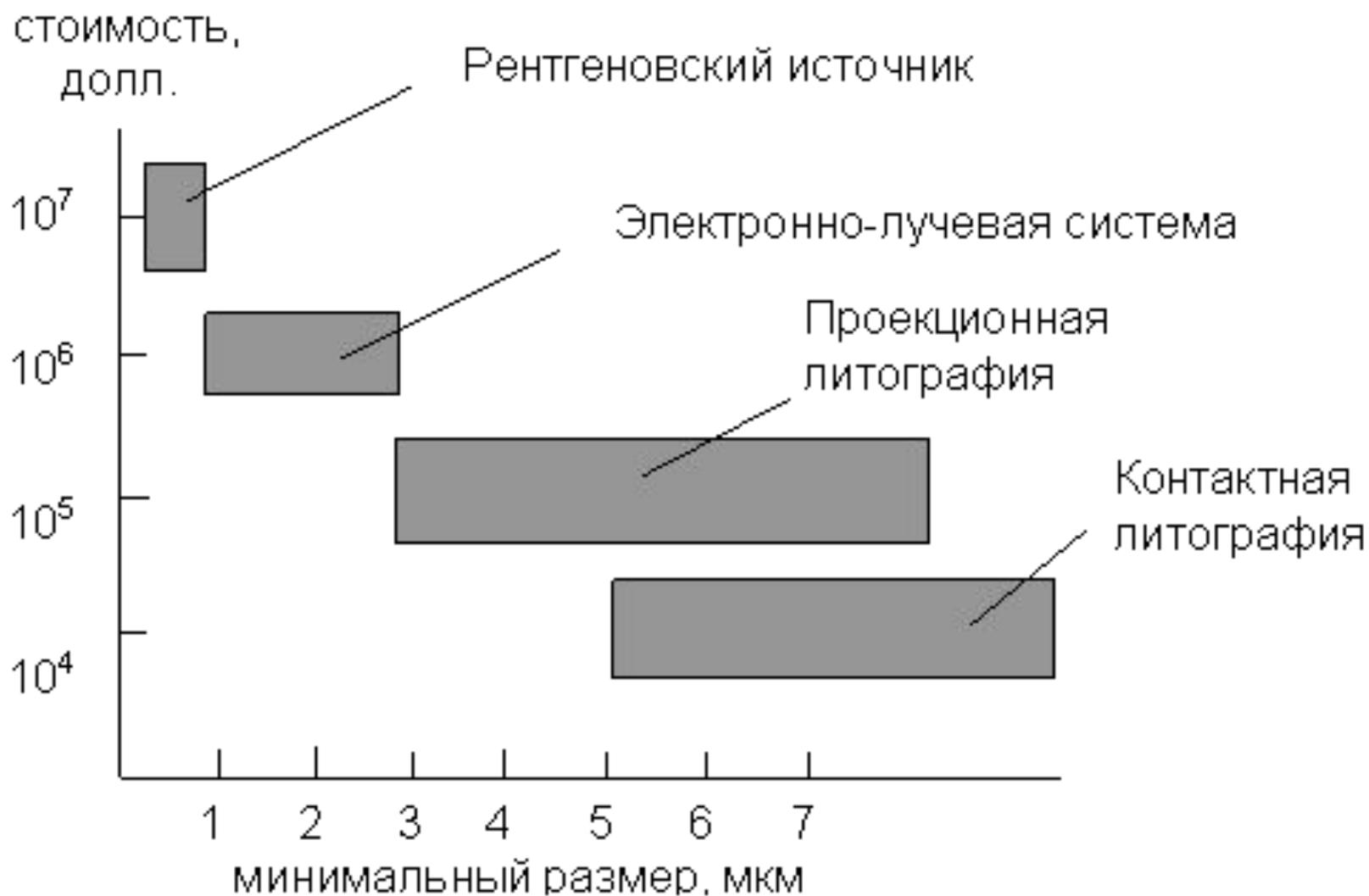
- светом,
- рентгеновским излучением,
- электронным пучком.

с последующим проявлением изображения.

В зависимости от вида используемого излучения и типа резиста литография может быть:

- оптической (фото),
- рентгеновской,
- электронно-лучевой.

Литография



Оптическая литография

Процесс оптической литографии начинается с проектирования топологии рисунка с последующим **фотоуменьшением** его линейных размеров. Уменьшенная в 2-10 раз копия используется при получении изображения методом контактной печати.

Обычно в фотолитографии используется ультрафиолетовый свет с длиной волны **330-400 нм**.

Более коротковолновое излучение не применяется, так как все известные комбинации фоторезистов, мощные источники света и оптические системы ***теряют свою эффективность*** на длинах волн короче 330 нм.

Широкое распространение получили дуговые ртутные лампы со спектром 330-400 нм, дуговые ксеноноворотутные лампы и спектральные дейтериевые лампы для проведения литографии в глубокой ультрафиолетовой области.

Оптическая литография. Контактная печать

Контактная печать является самым первым методом формирования рисунка на полупроводниковых пластинах.

При использовании этого метода шаблон, содержащий нужный рисунок, накладывается на покрытую **фоторезистом** пластину и **экспонируется светом**, в результате чего на резисте образуются засвеченные и незасвеченные области.

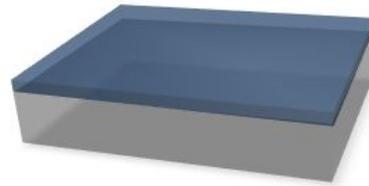
С помощью последующего **проявления (селективного травления)** происходит удаление участков фоторезиста в соответствии с временем экспонирования.

Разрешающая способность этого метода около **2 мкм** и ограничивается **дифракционными эффектами** между двумя соседними линиями.

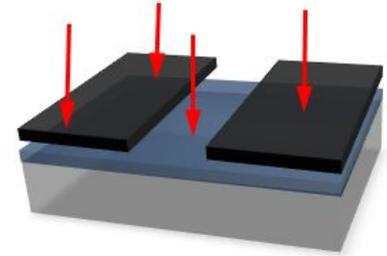
Оптическая литография. Контактная печать



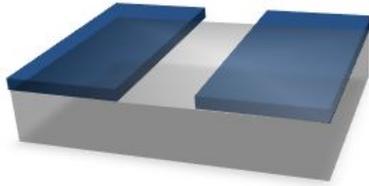
1) Подготовка поверхности



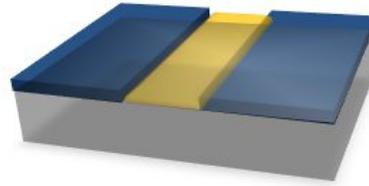
2) Нанесение фоторезиста



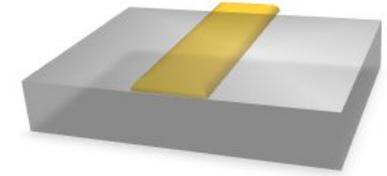
3) Экспонирование



4) Проявление фоторезиста



5) Обработка поверхности



6) Удаление фоторезиста

Оптическая литография. Контактная печать

Основной недостаток контактной печати состоит в **изнашивании фотошаблона** при его многократном использовании.

Плотное соприкосновение фотошаблона с подложкой приводит к возникновению **дефектов** на соприкасающихся поверхностях как **шаблона**, так и **резиста**.

Накопление дефектов и частиц фоторезиста, прилипающих к фотошаблону, при многократном экспонировании приводит к его **быстрому износу**.

Допустимое число экспозиций зависит от **сложности шаблона**, определяемой *степенью интеграции*, и **прочности поверхности шаблона**.

Лучше применять шаблоны, покрытые **хромом**, **окислом железа** или **другими металлами**, так как они допускают периодическую очистку и могут использоваться для гораздо большего числа экспозиций.

На практике шаблоны с твердым покрытием могут использоваться более 100 раз.

Оптическая литография. Контактная печать

Разрешающая способность метода контактной печати может быть повышена, если для экспонирования резиста использовать более **коротковолновое излучение**, так как при этом уменьшается влияние **дифракции**.

Глубокий ультрафиолет (с длиной волны **200-260 нм**) позволяет получать ширину линий **0,5 мкм**, т.е. примерно вдвое большую длины волны излучения.

По мере того как размер кристалла (чипа) возрастает, а детали изображения становятся меньше, возникает необходимость, в более совершенных методах экспонирования, чтобы уменьшить число дефектов при более высокой степени интеграции.

К ним можно отнести:

- бесконтактную** (с сохранением зазора между фотошаблоном и пластиной) печать;
- проекционную** печать.

Оптическая литография. Бесконтактная печать

Пространственное разделение фотошаблона и подложки существенно уменьшает **количество дефектов**, возникающих из-за контакта.

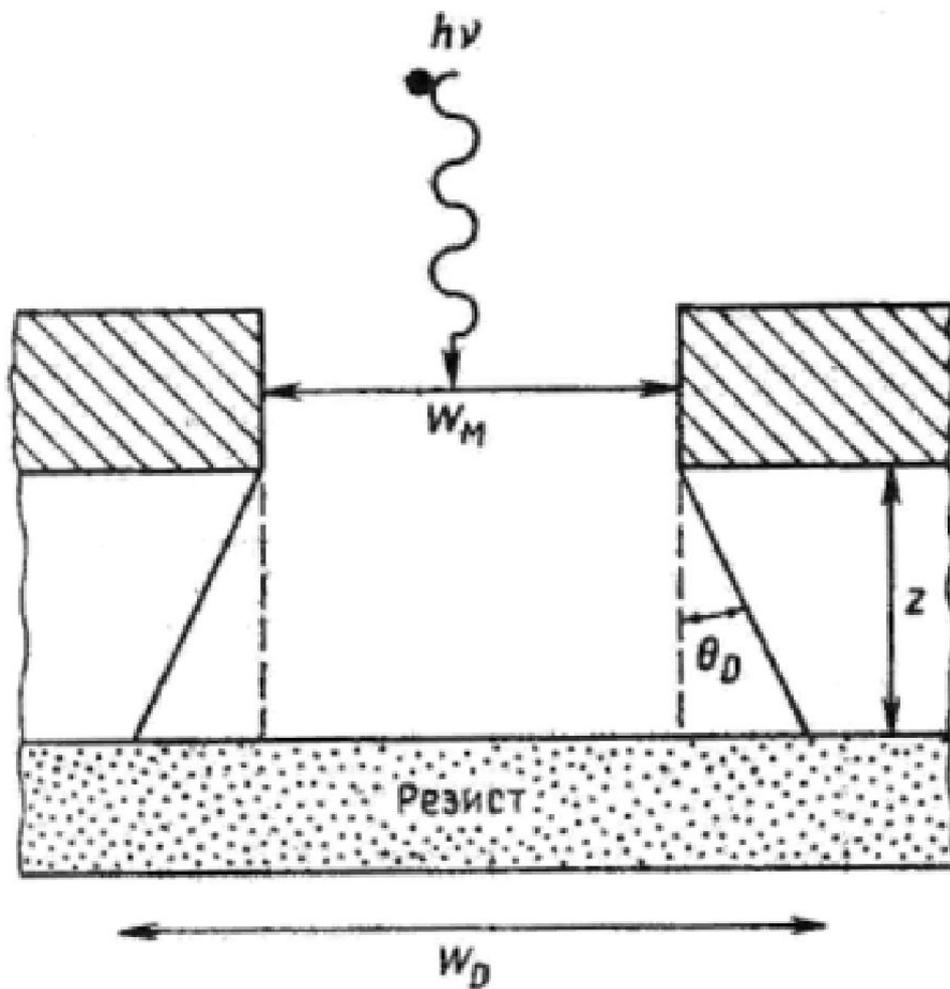
Однако, **дифракция** проходящего света уменьшает разрешающую способность и одновременно ухудшает четкость изображения.

Степень этих негативных явлений зависит от **величины зазора** между фотошаблоном и пластиной, который может быть неодинаковым вдоль пластины.

При малых зазорах основным источником искажений являются **неровности поверхности пластины** (особенно в пластинах большого диаметра)

При больших зазорах – **эффекты дифракции**.

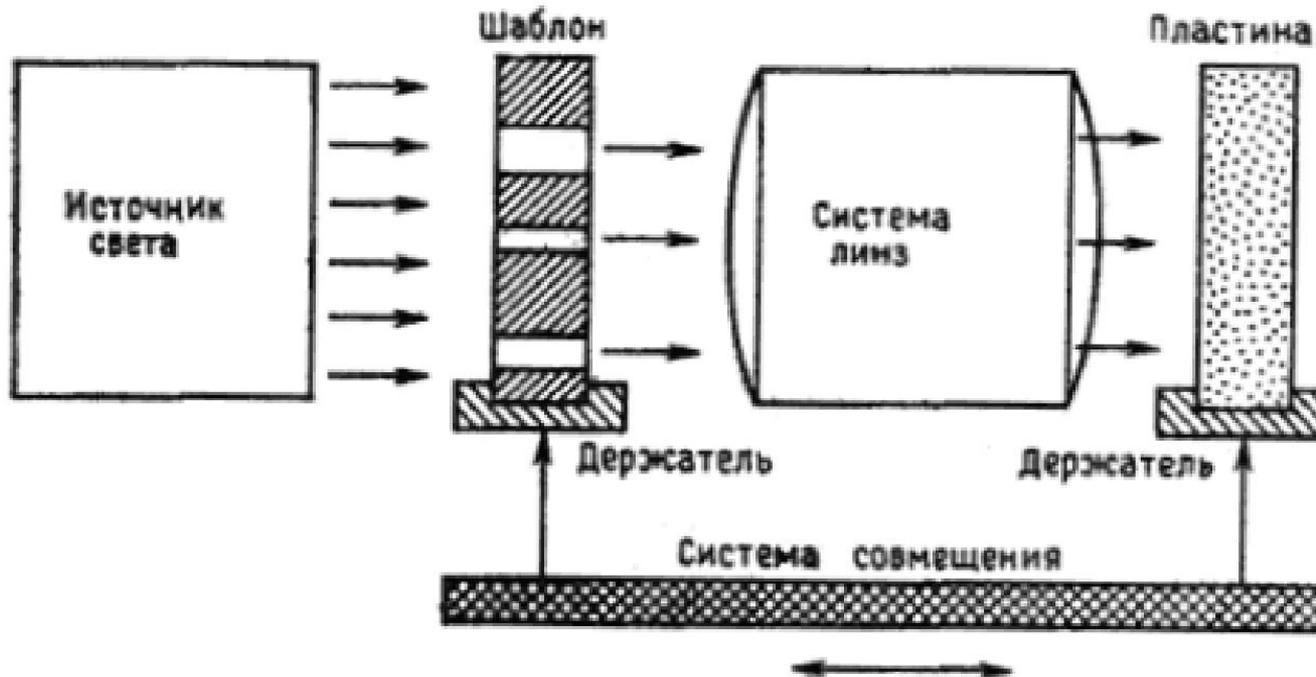
Оптическая литография. Бесконтактная печать



Оптическая литография. Проекционная печать

Метод **проекционной печати** заключается в проецировании изображения фотошаблона на пластину, покрытую фоторезистом, с помощью системы линз с высокой разрешающей способностью.

В этом случае шаблон может использоваться **неограниченное число раз**, исключая случаи его повреждения при эксплуатации, поэтому вполне оправданно применение очень **высококачественных шаблонов**.



Оптическая литография. Проекционная печать

Недостатки метода

Глубина резкости оптической системы должна превышать ± 10 мкм, т. е. диапазон, в котором обычно лежат отклонения пластин от идеальной плоскости, обусловленные высокотемпературной обработкой.

Это ограничивает **апертуру линз** и, следовательно, разрешающую способность метода.

Кроме того, затруднительно изготовить систему линз, одновременно удовлетворяющую условиям получения высококачественного (ограниченного явлением дифракции) **изображения** и равномерного освещения **всей поверхности пластин**, типовой размер которых в составляет 100 мм.

Оптическая литография. Проекционная печать

Рассеяние света на оптических элементах из стекла приводит к необходимости применения **позитивных резистов**.

Обычные проекционные системы позволяют получать изображения с разрешением **1 мкм**.

При увеличении диаметра пластин использование стационарных проекционных систем становится **нецелесообразным**.

В сканирующих (или пошаговых) проекционных системах изображение фотошаблона проецируется на определенную часть пластины. В этом случае за один раз экспонируются гораздо меньшие площадки (порядка 1 см^2), и затем экспонирование повторяется после перемещения изображения на соседнюю область пластины.

Оптическая литография.

Проекционная система с пошаговым перемещением



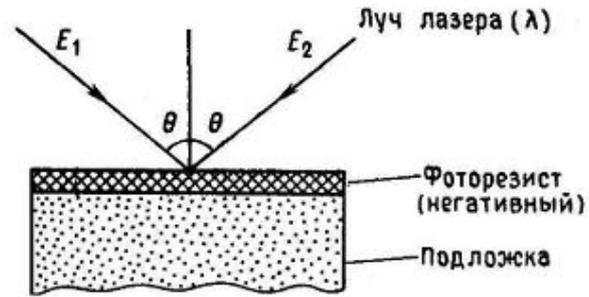
Голографическая литография

В голографической литографии экспонируемая подложка помещается в область, где **интерферируют два лазерных луча**, создающих стоячую волну.

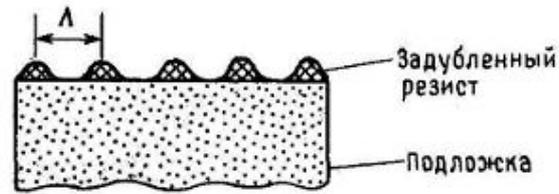
Этот способ применим в основном для экспонирования рисунков, имеющих **периодическую структуру**.

Период экспонируемой решетки может составлять **50 %** длины волны лазерного излучения.

Голографическая литография



a



б

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}$$

Принцип использования голографической литографической литографии для изготовления решеток (экспонирование)

Электронно-лучевая литография

Применение электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) позволяет решить технические проблемы:

- повышение разрешающей способности

и экономические проблемы:

- рост выхода годных структур;

- снижение затрат на изготовление шаблонов.

Такие возможности ЭЛЛ обусловлены тем, что она принципиально отличается от фотолитографии (ФЛ) – свободна от тех ограничений, которые действуют в случае использования оптических методов.

Пределы разрешающей способности этого метода таковы, что можно по меньшей мере на **порядок величины** уменьшить минимальную ширину линий.

Электронно-лучевая литография

Применение электронно-лучевой литографии для изготовления микроэлектронных приборов сводится к созданию:

- маскирующего рельефа резиста на подложке/пластине;
- заготовке шаблона.

В основе метода лежит использование остросфокусированного **электронного луча** (ЭЛ), движением которого по поверхности подложки, включением и выключением (затемнением) управляет ЭВМ.

Под действием ЭЛ происходит экспонирование резиста (электроны либо разрушают, либо сшивают молекулы) и, таким образом, его свойства локально изменяются. В результате чего в процессе проявления селективно удаляется либо экспонированная (позитивный резист), либо неэкспонированная часть (негативный резист).

Сформированный из резиста рельеф, или топологический рисунок, и является пригодной для различных технологических процессов **маской**.

Рентгеновская литография

Основу рентгеновской литографии составляют принципы **контактной** или **бесконтактной** печати при использовании для экспонирования низкоэнергетического (1÷10 кэВ) **рентгеновского излучения**.

В этом случае можно пренебречь явлением дифракции, свойственным фотолитографии, а также явлением обратного рассеяния, возникающим при электронно-лучевой литографии.

В отличие от оптических систем для рентгеновских лучей не существует соответствующих зеркал или линз вследствие малой длины волны рентгеновского излучения ($\lambda=0,4\div 5$ нм).

Поэтому источник рентгеновских лучей конечного размера должен быть удален от фотошаблона и резиста **достаточно далеко**, с тем, чтобы лучи падали на пластину с возможно **малой расходимостью**.

Конечные размеры источника и расходимость рентгеновских лучей вызывают геометрические искажения.

Рентгеновская литография

Минимально допустимая величина литографического разрешения системы:

$$\Delta = s (d/D)$$

s - ширина зазора между фотошаблоном и пластиной,

d - диаметр источника излучения,

D - расстояние от источника до шаблона.

В системах с высоким разрешением

-величина Δ не должна превышать 0,05 мкм.

-зазор s должен быть достаточно большим, чтобы даже при большом диаметре шаблона исключить возможность касания резиста и фотошаблона, так как это может быть причиной возникновения дефектов.

Источники рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение возникает при торможении в материале мишени падающих *электронов*.

Максимальная энергия рентгеновского излучения равна *энергии падающих электронов E* .

Если величина E превышает энергию характеристического излучения атомов мишени, то спектр рентгеновского излучения будет содержать линии *этого излучения*.

Получение рентгеновских лучей электронной бомбардировкой – **малоэффективный процесс**, так как большая часть мощности электронов идет на нагрев мишени. Поэтому, максимальная интенсивность рентгеновского излучения определяется допустимой тепловой мощностью рассеяния мишени.

Источники рентгеновского излучения

Для пучка электронов диаметром 1 мм, падающего на алюминиевую мишень с водяным охлаждением, типовая величина максимальной мощности равна **400-500 Вт**.

Мощность получаемого при этом рентгеновского излучения порядка **10 мВт**, причем излучение распределено по полусфере.

В общем случае мощность рентгеновских лучей пропорциональна току электронов.

Источники рентгеновского излучения

Для создания источников рентгеновских лучей с наибольшей интенсивностью используются **вращающиеся аноды с водяным охлаждением**.

Материал анодов выбирается, исходя из **усталостных характеристик, теплоемкости и теплопроводности**, а также в соответствии с **характеристиками тормозного излучения**.

Алюминиевый анод диаметром 20 см, вращающийся со скоростью 8000 об/мин, может рассеять около **20 кВт** при диаметре пятна электронов **6 мм**.

Максимальная мощность пучка пропорциональна **диаметру пятна электронов** на мишени в степени **3/2**.

Чтобы уменьшить образование полутеней, нужно использовать систему с **быстро вращающимся анодом, с малым диаметром пятна и небольшим расстоянием от источника до шаблона**.

Шаблоны рентгеновской литографии

Основная проблема состоит в изготовлении тонких, но прочных подложек, **прозрачных** к рентгеновскому излучению.

Используются два типа тонких пленок: органические и неорганические.

Органические пленки изготавливаются на основе каптона и полиимида, которые вытягиваются в тонкие планарные слои.

Неорганические пленки содержат кремний, окисел кремния, металлоиды кремния, окисел алюминия

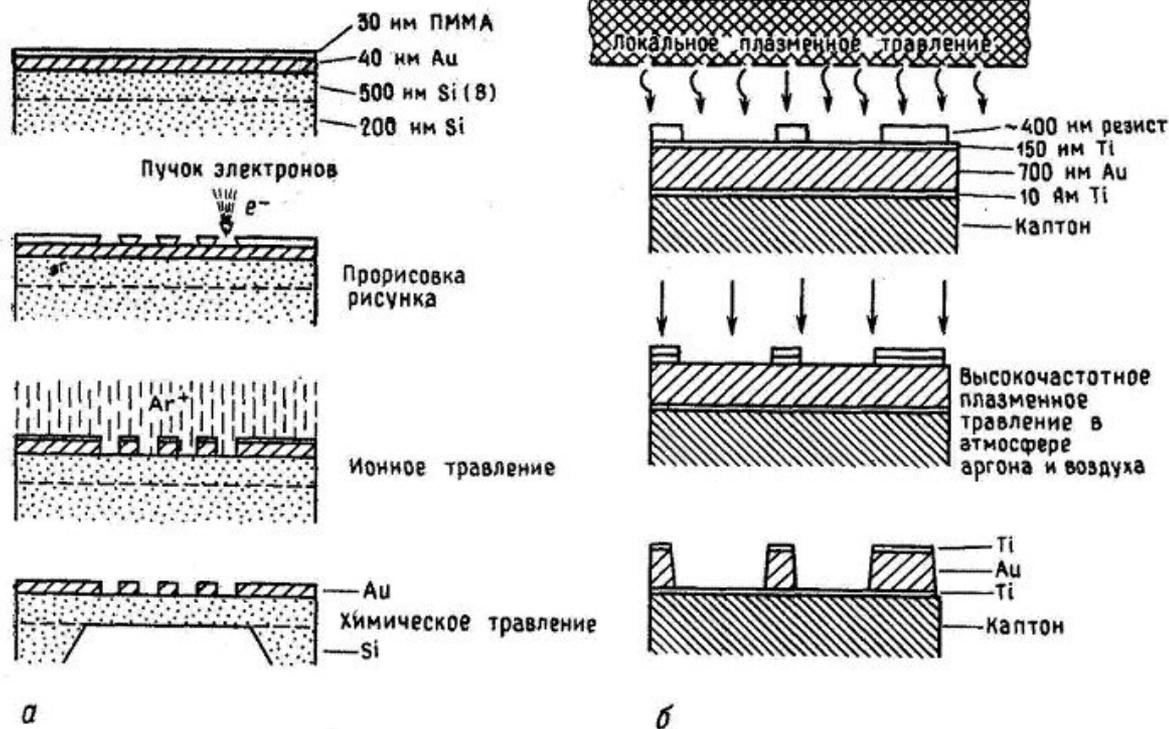
Шаблоны рентгеновской литографии

Рисунок на пленке, **поглощающий рентгеновское излучение**, получается с помощью ионно-лучевого травления, распыления или гальванического покрытия через резистивную маску.

Поглощающая пленка обычно состоит из двух металлических слоев: тонкого слоя хрома или титана, используемого для лучшей адгезии с подложкой, и слоя золота.

Ослабление интенсивности рентгеновских лучей зависит от длины волны излучения и от энергии падающего излучения.

Шаблоны рентгеновской литографии



Последовательность операции для изготовления маски из золота на подложке из кремния и каптона
а – изготовление кремниевой мембраны с поглощающим рисунком из золота
б – изготовление маски из золота с подслоем титана)