

## 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Процесс плазменного травления характеризуется скоростью, анизотропией, селективностью, однородностью по поверхности, воспроизводимостью, загрузочным эффектом и текстурой поверхности. Свойство материала травиться с разной скоростью по разным направлениям называется анизотропией. В отличие от принятой в физике и физической химии твердого тела кристаллографической анизотропии, показатель которой определяется отношением скоростей травления в разных кристаллографических направлениях, в технологии плазменного травления показатель анизотропии определяется отношением скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно поверхности материала. Селективность – это отношение скоростей травления двух различных материалов, например Si и SiO<sub>2</sub>, в одной и той же плазме. Понятие «загрузочный эффект» отображает степень обеднения газовой фазы активным травителем вследствие его расхода в процессе травления. В зависимости от вида травителя, присутствующего в плазменной среде, исходная гладкая поверхность может сохраняться или становиться текстурированной. Газ для плазменного травления может быть выбран в соответствии с типом материала, подвергаемого травлению, и требованиями к селективности по отношению к другим материалам, находящимся в плазме, а также с учетом анизотропии, заданной поверхностной текстурой, степени влияния загрузочного эффекта и предотвращения осаждения продуктов реакции. Различие между изотропным и анизотропным травлением поясняет рисунок 1.

В реальных процессах вытравленная область простирается за границы отверстия в маске. Маска постепенно разрушается и становится более тонкой на границе отверстия, поэтому отверстие постепенно расширяется ( $W > W_{m0}$ ). Химическое разрушение (изотропное травление) пленки под маской будет приводить к размытию деталей рельефа. Если травление маски пренебрежимо мало (высокая селективность), то степень анизотропии определяется выражением (см. рисунок 1) [1]

$$\alpha = \frac{E_v}{E_h},$$

где  $E_v$  – вертикальная скорость травления;

$E_h$  – горизонтальная скорость травления.

Чтобы компенсировать размытие рельефа (подтравливание) во время изотропного травления, диаметр отверстий в маске уменьшают.

Минимальный размер элементов топологии, достижимый при использовании метода изотропного травления, ограничен толщиной пленки, лежащей под маской и составляющей обычно несколько микрометров. Следовательно, для изготовления строго заданного рельефа необходимо анизотропное травление.

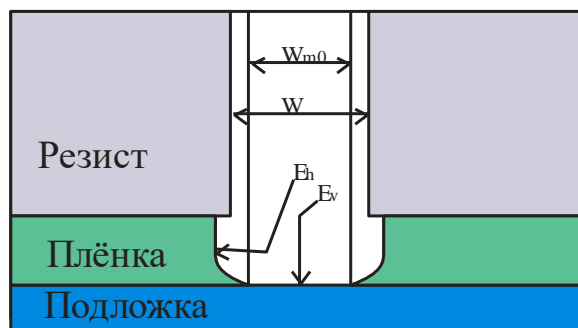


Рисунок 1 – Профили структур в случае изотропного и анизотропного травления

Однако изотропное травление имеет свою область применения. Так, операции селективного удаления фоторезиста, травления топологических элементов больших размеров в кремнии и удаления оксидируемых нитридных масок просто и экономично выполняют, используя изотропные травители. Эти травители также применяют для травления диэлектрических пленок под созданными фоторезистивными масками. В этом случае между металлом, впоследствии напыляемым на маску, и металлом на подложке остается зазор, который облегчает удаление маски и находящегося на ней слоя металла с помощью растворителя методом взрывной литографии. Изотропное травление используют для удаления толстой вертикальной части слоя (например, поликремния) на краю ступеньки и для сглаживания рельефа, что облегчает осаждение покрытия на ступеньку. Если материал верхнего покрытия не травится, а многие элементы топологии необходимо удалить или уменьшить их ширину, то существенным становится подтравливание. Например, для удаления поликремниевых проводников, лежащих под оксидом при создании металл-оксид-полупроводник (МОП)–оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) [2], и уменьшения толщины слоя Мо под золотым контактом при изготовлении высокочастотных полевых (МОП)-транзисторов с узким затвором используют изотропное травление в плазме  $\text{ClF}_3$ .

Селективность травления можно обеспечить путем логически обоснованного подбора типа радикалов, образующихся в разряде. Скорость газификации поверхности с помощью радикалов при отсутствии плазмы служит хорошим индикатором селективности и часто согласуется со

скоростью изотропного плазменного травления. Например, отношение скоростей травления поверхности (100) кремния и термического оксида ( $\text{SiO}_2$ ) атомами фтора составляет 41:1 при комнатной температуре и 26:1 при 100 °C [2]. Сравнимые соотношения скоростей наблюдаются для фторсодержащей плазмы. Подобным образом атомы кислорода при отсутствии и наличии плазмы селективно удаляют органический резист [1]. При анизотропном травлении необходимо учитывать роль ионной бомбардировки, а скорости собственных реакций следует трактовать качественно.

Изотропным травителям присущ загрузочный эффект, который обусловлен истощением активного травителя вследствие взаимодействия с подложкой. Перед окончанием травления площадь обрабатываемой поверхности уменьшается, концентрация активных веществ возрастает, вызывая резкое увеличение скорости травления. Так как травление изотропное, происходит быстрое боковое подтравливание элементов топологии с замкнутым контуром.

При использовании плазменного травления возникают и другие проблемы. Перенос травителя из объема плазмы к поверхности может ограничиваться диффузией при неблагоприятном сочетании давления, скоростей потока и реакций. Тогда локальная концентрация травителя вблизи обрабатываемого материала вследствие обеднения при протекании реакции будет отличаться от объемной концентрации. Степень обеднения будет изменяться локально в зависимости от того, какую долю площади пластины занимает поверхность, участвующая в реакции. Размеры и плотность элементов рельефа влияют на локальную скорость травления, что ведет к различию скоростей травления при разных видах топологии. Ограничения переноса также изменяют скорость травления вследствие обеднения потока травителя при протекании вдоль пластины (эффект «бычий глаз») или вдоль реактора, загруженного пластинами, вызывая более быстрое травление края, на который поток набегает, по сравнению с краем, с которого он сходит.

Такую неоднородность можно свести к минимуму или устранить путем выбора подходящей конструкции реактора, давления и скорости потока. Своевременное прекращение травления уменьшает влияние этих ограничений, поэтому используют различные приборы для обнаружения момента его окончания.

Текстура поверхности после травления зависит от вещества травителя, условий проведения процесса и предварительной обработки поверхности (обезжиривания и/или удаления исходного оксида). Поверхность кремния после травления в плазме фтора или фторсодержащих веществ оказывается тусклой и зернистой, тогда как поверхность оксида травится более

равномерно. Метод резерфордовского обратного рассеяния и другие методы анализа поверхности показывают, что подобное текстурирование существует и на микроскопическом уровне, причем тонкие поверхностные слои кремния становятся аморфными. Макроскопическая неровность более заметна после травления в  $F_2$  при отсутствии плазмы [1]. Если бомбардировка высокоэнергетичными ионами не производится, то хлорсодержащая плазма ( $CF_3Cl$  или  $Cl_2$  при высокой частоте и при давлении выше 10 Па) сохраняет поверхность кремния гладкой, тогда как наличие ионной бомбардировки при низком давлении ( $\leq 10$  Па) или низкой частоте ( $\leq 1$  МГц) ведет к появлению микроскопических неровностей поверхности.

### ***Кинетика изотропного травления кремния***

Плазмохимическое травление (ПХТ) представляет собой гетерогенную химическую реакцию, происходящую на границе двух фаз: твердой и газообразной (или плазмообразной). Это позволяет при анализе ПХТ использовать общие физико-химические положения, разработанные в теории гетерогенных реакций с учетом специфики процесса.

В ПХТ можно выделить следующие стадии:

- доставка молекул активного газа в зону разряда;
- превращение молекул газа в реакционноспособные радикалы под воздействием электронов разряда;
- доставка радикалов к поверхности материала, подвергаемого травлению;
- адсорбция радикалов на поверхности материала;
- химическая реакция радикалов с поверхностными атомами;
- десорбция продуктов реакции с поверхности материала;
- отвод продуктов реакции из реактора.

### ***Образование радикалов в газоразрядной плазме***

В зоне ВЧ-разряда молекулы галогеносодержащих соединений, которые в обычном состоянии при температурах до 1000 °С не способны травить материалы, под воздействием неупругих ударов электронов диссоциируют и превращаются в реакционноспособные радикалы. Скорость диссоциации молекул газа в электрическом разряде определяется числом столкновений молекул с электронами, энергия которых превышает некоторую пороговую энергию  $\varepsilon_t$ , необходимую для диссоциации молекул. Однако даже электрон с энергией  $\varepsilon > \varepsilon_t$  не всегда способен вызвать диссоциацию молекулы, существует лишь некоторая вероятность диссоциации  $d\omega$ , зависящая от энергии электрона

$$\omega_d = C(\omega - E_d),$$

где  $C$  – константа, связанная с родом газа;

$\omega$  – энергия электрона;

$E_d$  – энергия диссоциации молекул газа.

При наличии максвелловского распределения электронов по энергиям скорость диссоциации молекул газа определяется выражением:

$$G = \left(\frac{8}{\pi m_e}\right)^{\frac{1}{2}} n_r n_e \frac{C_{\leftrightarrow} (kT_e)^{\frac{3}{2}}}{\lambda_e} \left(2 + \frac{E_d}{kT_e}\right) \exp\left(-\frac{E_d}{kT_e}\right), \quad (1)$$

где  $m_e$  – масса электрона;

$\lambda_e$  – средняя длина пробега электронов в газе;

$n_r, n_e$  – соответственно концентрация молекул газа и электронов;

$T_e$  – температура электронного газа.

Из выражения (1) следует, что скорость диссоциации молекул газа увеличивается с ростом концентрации электронов  $n_e$ , их температуры  $T_e$  и уменьшается с увеличением средней длины свободного пробега электронов  $\lambda_e$  и энергии диссоциации молекул газа  $E_d$ . При относительно низких давлениях, когда  $kT_e \ll E_d$

$$\left(\frac{E_d}{kT_e}\right) \approx 0 \text{ и } \exp\left(-\frac{E_d}{kT_e}\right) \approx 1$$

При дальнейшем понижении давления уменьшение  $n_r, n_e$ , и увеличение  $\lambda_e$  преобладают над увеличением  $T_e$ , в результате скорость диссоциации падает. При относительно высоких давлениях, когда  $kT_e \sim E_d$ , с дальнейшим ростом давления множитель  $\exp(-E_d/kT_e)$  стремится к нулю с наибольшей скоростью, скорость диссоциации также уменьшается. Таким образом, зависимость скорости образования радикалов от давления должна иметь максимум. Образование радикалов в газоразрядной плазме является лимитирующей стадией ПХТ. Скорость диссоциации молекул газа зависит от многих факторов, поэтому образование радикалов происходит гораздо медленнее, чем протекание других процессов в плазме.

## 2 МЕХАНИЗМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Плазменные процессы травления можно разделить на четыре основные группы по механизмам их протекания: физическое распыление; химическое травление; травление, стимулированное ионной бомбардировкой; плазмохимическое травление, стимулированное низкоэнергетической ионной бомбардировкой [3].

## 2.1 Физическое распыление

Физическое распыление – это процесс удаления атомов с поверхности под воздействием потока высокоэнергетических ионов. Схематически процесс распыления представлен на рисунке 2.

Установлено, что диапазон энергий, характерных для процессов ионно-плазменной обработки, определяется пороговыми значениями коэффициента распыления материалов. Процесс ионного распыления начинается при пороговых значениях энергий ионов в диапазоне 3–30 эВ в случае падения иона по нормали к поверхности, хотя на производстве общепринято относить к распылению процессы, в которых энергия ионов  $\geq 100$  эВ [4].

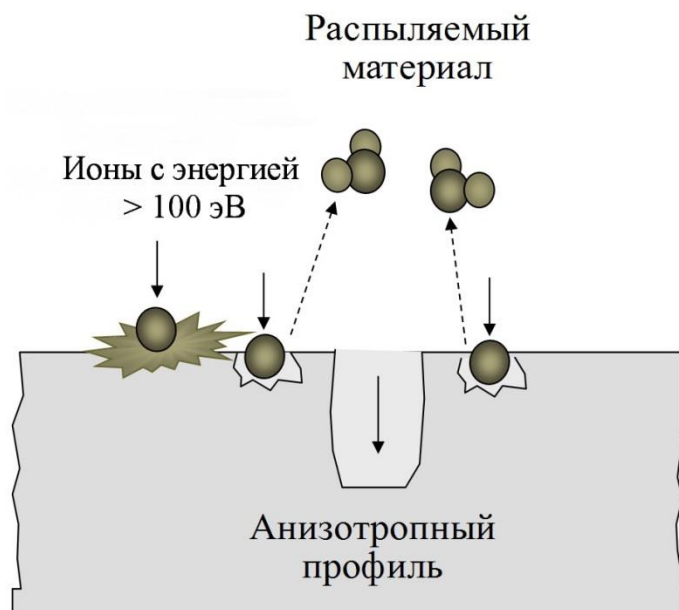


Рисунок 2 – Схематичное изображение процесса физического распыления

Данный процесс не обладает селективностью. Коэффициент распыления зависит только от энергии связи, массы ионов и ориентации поверхности (угла падения) и обычно не больше чем в два раза отличается для различных материалов [3]. Повышение скорости распыления осуществляется увеличением энергии бомбардирующих ионов и изменением угла их падения к поверхности (рисунок 3),

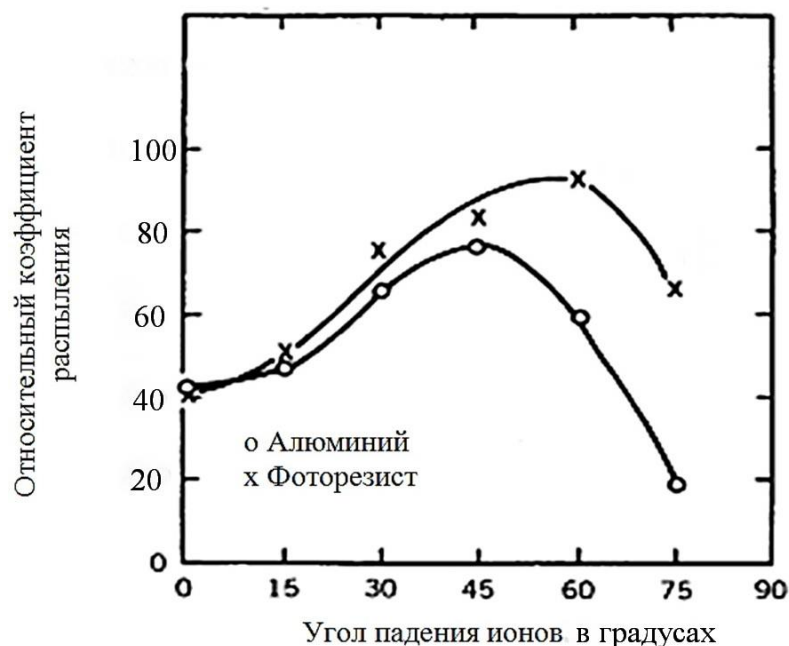


Рисунок 3 – Схематичное изображение процесса физического распыления

что при энергиях свыше 250 эВ приводит к повреждению обрабатываемой поверхности. Поэтому при производстве кристаллов интегральных микросхем такие процессы могут использоваться очень ограниченно. Распыление – это единственный из четырёх механизмов, обеспечивающий удаление нелетучих компонентов, что широко используется в процессах нанесения тонкопленочных структур методом распыления.

## 2.2 Химическое (изотропное) плазменное травление

Химическое травление в плазме (рисунок 4) обусловлено протеканием реакций газификации между частицами травителя и материалом поверхности. Низкоэнергетическая плазма (энергия ионов ниже 15 эВ) является только источником травящего вещества. При отсутствии каких-либо кристаллографических дефектов [5] этот вид травления может быть приравнен к изотропному вследствие закругленного профиля стенок структуры [1], который образуется, если травление происходит с одинаковой скоростью по всем направлениям.

Классическим примером химического травления является газификация кремния атомами фтора, как чистого, так и в смесях, например  $\text{CF}_4\text{--O}_2$ ,  $\text{NF}_3$ ,  $\text{SF}_6\text{--O}_2$ . Если производится травление углублений через маску, и стенки углублений подвергаются травлению в боковом направлении в течение

длительного времени, то наблюдается подтравливание. Стенки приобретают закругленный профиль [1] радиусом, примерно равным глубине травления.

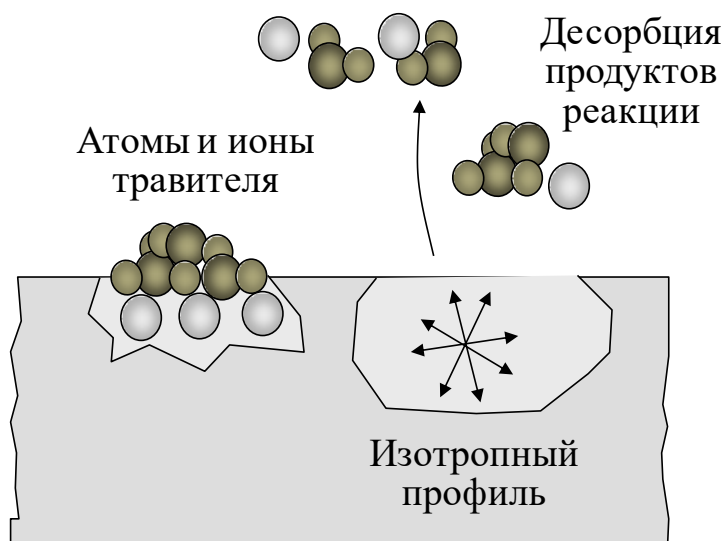


Рисунок 4 – Химическое (изотропное) травление

Следует отметить, что химическое травление необязательно является изотропным. Примером этого может служить травление GaAs в плазме брома: оно осуществляется с помощью химического механизма, однако боковые стенки рельефа могут быть получены вертикальными, параллельными друг другу или наклонными [5]. Это объясняется ориентационной зависимостью травления кристаллографических плоскостей с малыми индексами. Такие явления также присутствуют при плазменном травлении монокристаллического кремния в хлор- и бромсодержащей плазме.

### 2.3 Анизотропное травление, стимулированное ионной бомбардировкой

Анизотропное травление стимулируют бомбардировкой обрабатываемой поверхности положительными ионами (рисунок 5). Например, при травлении кремния в плазме фтора и аргона выход атомов из подложки на один падающий ион аргона с энергией 1 кэВ превышает 25 атомов кремния (100 атомов фтора) [3]. Эти значения намного больше типичных коэффициентов распыления (менее 2 для большинства материалов при энергии ионов аргона 400 эВ) [6].

Для объяснения взаимодействий между ионами, нейтральными частицами и подложкой, подвергаемой травлению, предложены различные механизмы. Ионы могут распылять адсорбированные продукты реакции;



примером такого механизма является травление InP в плазме  $\text{Cl}_2$  очень низкого давления [1].

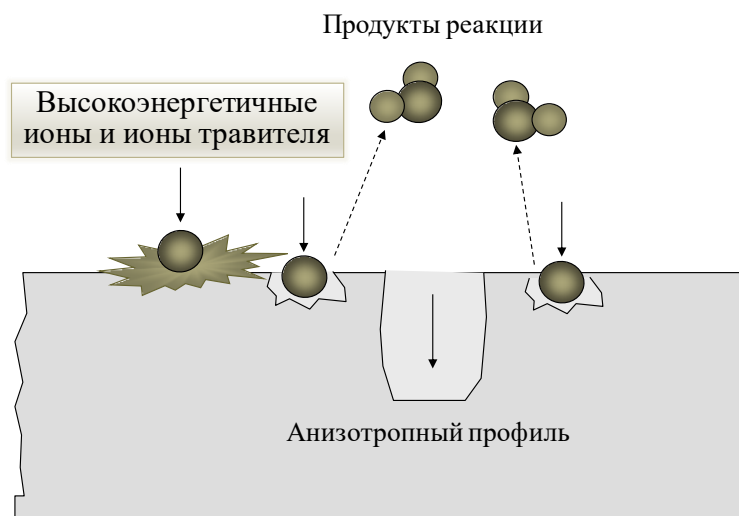


Рисунок 5 – Плазменное травление, стимулированное ионной бомбардировкой

Термин «химическое распыление» для частного случая десорбции продуктов распыления был предложен с целью объяснения повышенной химической активности взаимодействия  $\text{XeF}_2$  с кремнием, одновременно бомбардируемым ионами Ar (рисунок 6) [7, 8]. Полагают, что ионы распыляют или «счищают» продукты взаимодействия фтора с поверхностью, вызывая селективное химическое диспропорционирование  $\text{SiF}_4$ . Несмотря на то, что кинетические и термодинамические условия не благоприятствуют селективному диспропорционированию [9], существование аналогичного механизма «очистки» подтверждается экспериментальными данными по травлению  $\text{SiO}_2$  атомами фтора, стимулированного ионной бомбардировкой. При обычных параметрах плазмы последний механизм эквивалентен механизму радиационных нарушений поверхности, в частности экспериментальные данные по анизотропному травлению  $\text{SiO}_2$  атомами F подтверждают действие механизма радиационных нарушений.

Ионы, бомбардирующие кремний, создают радиационные нарушения в кристаллической решетке, простирающиеся в глубину на несколько монослоев от поверхности. Химическая реакция с нарушенной областью кристалла протекает с повышенной скоростью, причем глубина и количество радиационных нарушений зависят от вида, угла падения, энергии и плотности потока ионов. В связи с переходом отечественных предприятий к субмикронным технологиям (0,5 мкм и менее) для изготовления интегральных микросхем толщина функциональных слоев может составлять десятки

нанометров, что значительно ограничивает использование процессов плазменного травления с бомбардировкой поверхности высокоэнергетическими ионами (с энергиями 100–500 эВ), так как это приводит к созданию заведомо нерабочей структуры.

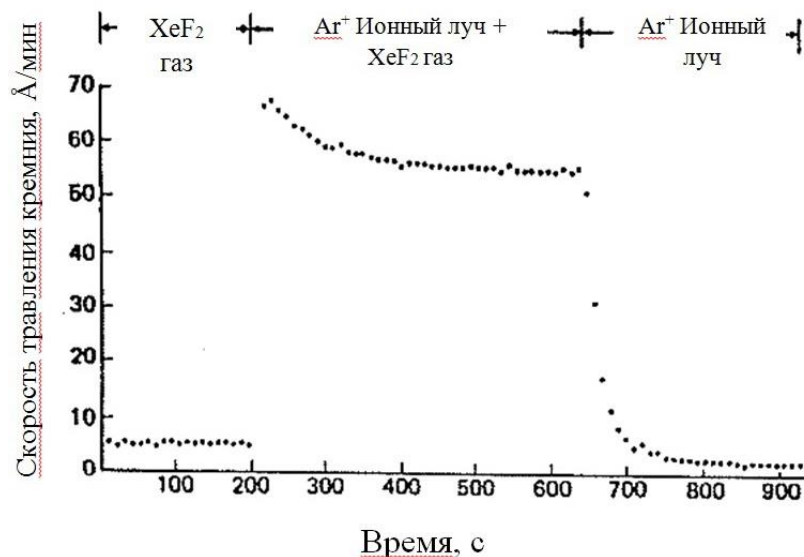


Рисунок 6 – Синергетический эффект ионного пучка аргона с потоком атомов фтора из горячего XeF<sub>2</sub>

Кроме этого, в некоторых случаях сложно обеспечить строгую вертикальность стенок, получаемых канавок, так как при угле падения ионов близком к 90°, происходит их отражение, и реакция происходит только на дне структуры. В результате получается профиль структуры, изображенный на рисунке 7. Поэтому требуются механизмы, обеспечивающие высокую скоростью и анизотропию удаления материала с поверхности, в которых энергия ионов не превышает 20 эВ.

Для решения такой задачи необходимо оборудование, которое обеспечит создание плазмы высокой плотности (концентрация ионов более  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ), что обеспечивает высокую скорость травления, и специально организованная контролируемая химическая среда и электрические потенциалы, которые обеспечат анизотропию травления. Примером такого процесса является плазмохимическое травление, стимулированное низкоэнергетической ионной бомбардировкой с использованием источника плазмы высокой плотности.



Рисунок 7 – Профиль структуры, обусловленный отражением ионов от стенок

Существование этого механизма следует учитывать для объяснения анизотропии травления, обусловленной бомбардировкой низкоэнергетичными ионами ( $< 50$  эВ). Определенные газы (например,  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CClF}_3$ ) или смеси газов ( $\text{CF}_4\text{--H}_2$ ) распадаются в плазме, образуя частицы с ненасыщенными связями и радикалы, способные к полимеризации. Эти частицы, ударяясь о поверхность, формируют адсорбированный слой, а в некоторых случаях – сплошную пленку. В частности такая пленка активно образуется на боковых поверхностях вытравливаемых канавок, что значительно (в десятки раз) снижает скорость бокового подтравливания. Адсорбированный слой замедляет травление, взаимодействуя с частицами травителя (рекомбинационный механизм) либо препятствуя доступу частиц травителя к подложке. Травление дна канавки, стимулированное низкоэнергетической ионной бомбардировкой (до 20 эВ), вследствие подаваемого на подложку ВЧ-смещения, происходит благодаря постоянному разрушению слоя из ингибиторов, что и обеспечивает высокую анизотропию травления (рисунки 8, 9).

Данный процесс имеет анизотропию, сравнимую с процессом физического распыления, и высокую селективность (хотя и ниже, чем при химическом травлении) [3].

Рассмотренные процессы имеют свои особенности в применении: при изготовлении изделий субмикронной и наноразмерной электроники, а также в МЭМС существует потребность в применении как анизотропного, так и изотропного плазменного травления с промышленно приемлемыми скоростями процессов. Причем последнее определяется концентрацией плазмы, что требует применения источников плазмы высокой плотности. Для обеспечения направленности процесса травления кроме добавки специальных

веществ в плазменную среду, также оперативно управляют ВЧ-смещением на подложке.

В настоящее время в промышленном производстве используется ряд сложных процессов плазменного травления. При их проведении используются достоинства изотропного механизма (высокая селективность) и стимулированного ионной бомбардировкой механизма (высокая анизотропия). Основная идея таких процессов заключается в циклическом последовательном изменении химического состава реактивной среды с одновременным изменением энергии ионов плазмы.

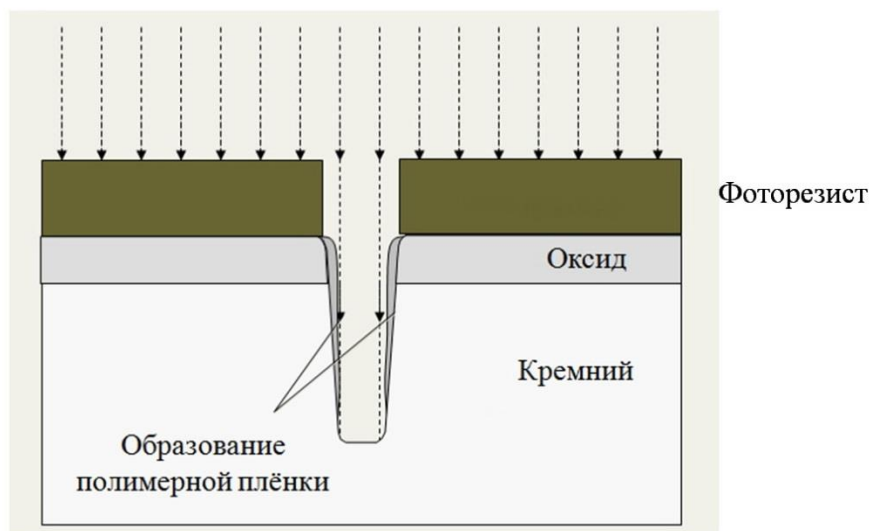


Рисунок 8 – Плазмохимическое травление, стимулированное низкоэнергетической ионной бомбардировкой

Процесс травления проводится в два этапа: на первом этапе проводится анизотропное травление, стимулированное ионной бомбардировкой, длящееся несколько секунд, затем изменяется состав газовой смеси и отключается подача электрического смещения на подложку, энергия ионов, бомбардирующих подложку, сильно уменьшается, и начинается процесс осаждения полимерной пленки, преимущественно в области, подверженной травлению, затем подается смещение, и ионы распыляют полимерную пленку преимущественно на дне канавки (из-за анизотропии процесса распыления), опять изменяется состав газовой смеси и производится травление по изотропному механизму. Реализация такого процесса стала возможна благодаря появлению безынерционных вибрационных регуляторов расхода газа, и источникам плазмы высокой плотности на основе индукционного разряда с подачей ВЧ-смещения на подложку.

*Преимущества сухого травления:*

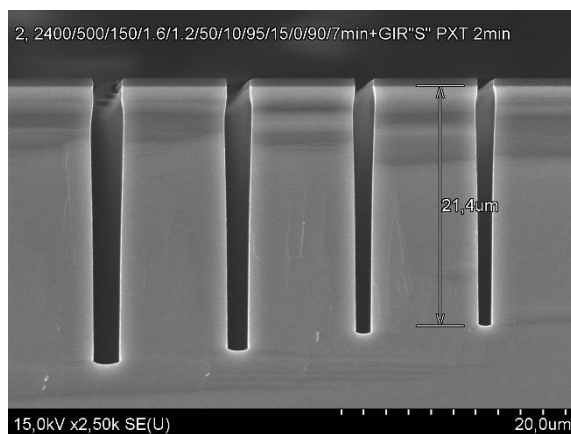
исключение оперирования с опасными травителями и растворителями;

- использование малого количества химикатов;
- возможность получения изотропного и анизотропного профиля;
- независимость скорости травления кремния от кристаллографической ориентации;
- строгая передача литографического рисунка на поверхность образца;
- высокая точность и чистота;
- хорошая контролируемость;
- возможность автоматизации для кассетной загрузки.

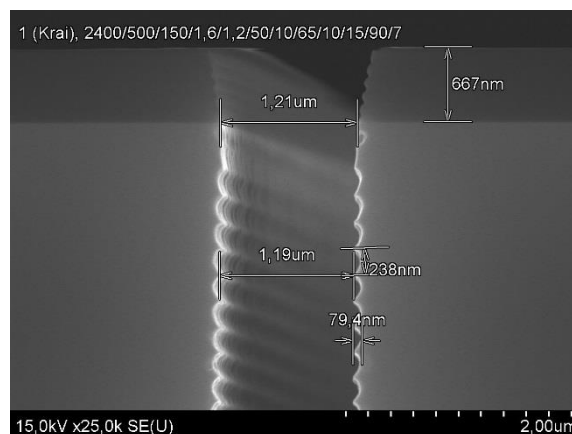
*Недостатки сухого травления:*

- токсичность используемых газов;
- перенапыление нелетучих компонентов;
- дорогостоящее оборудование.

Для плазмохимического травления, стимулированного низкоэнергетической ионной бомбардировкой, характерны: гребешковое искажение краёв (может быть уменьшено оптимизацией параметров (рисунок 9, б)), микрозагрузочный эффект (узкие канавки травятся медленнее широких (рисунок 9, а)), чёрный кремний (микромаскировочные, небольшие области Si, защищенные от травления, формируют сталактитовую структуру, поглощающую свет (рисунок 10) [10]).



а



б

а – микрозагрузочный эффект; б – гребешковое искажение краёв  
Рисунок 9 – Структура, полученная плазмохимическим травлением, стимулированным низкоэнергетической ионной бомбардировкой

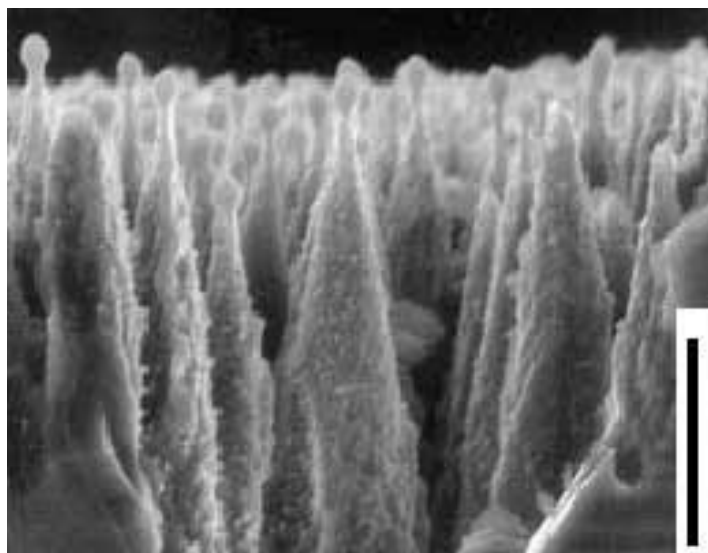


Рисунок 10– Сталактитовая структура на поверхности, защищённой ингибитором

### 3 ОБОРУДОВАНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Для обеспечения успешного проведения процесса глубокого плазмохимического травления необходима генерация плазмы с плотностью вплоть до  $10^{11}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> при соблюдении однородности  $\pm 3\%$  на подложках диаметром более 200 мм, снижение рабочего давления в реакционной камере до 0,1–10 Па [10].

Требованиям к процессам глубокого травления удовлетворяют безэлектродные системы плазмообразования (то есть плазма генерируется без прямого соприкосновения с электродами), например: СВЧ-системы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР); ВЧ-системы, использующие плазму «геликонового» разряда; ВЧ индуктивно связанные (трансформаторные) разряды [11] (рисунок 11).

СВЧ-системы дорогостоящи, имеют высокие требования по согласованию нагрузки и СВЧ-источника, а также требуют больших значений внешних магнитных полей (1–2 кГс), что приводит к неравномерности формируемой плазмы. Менее сложны устройства «геликонового» разряда, однако они также требуют наличия внешнего источника магнитного поля и цилиндрической формы разрядного реактора, что затрудняет равномерность обработки по большой площади. Обеспечить высокую скорость и однородность процесса травления позволяют устройства, использующие плазму ВЧ ёмкостного и индуктивного газового разряда низкого давления [12].

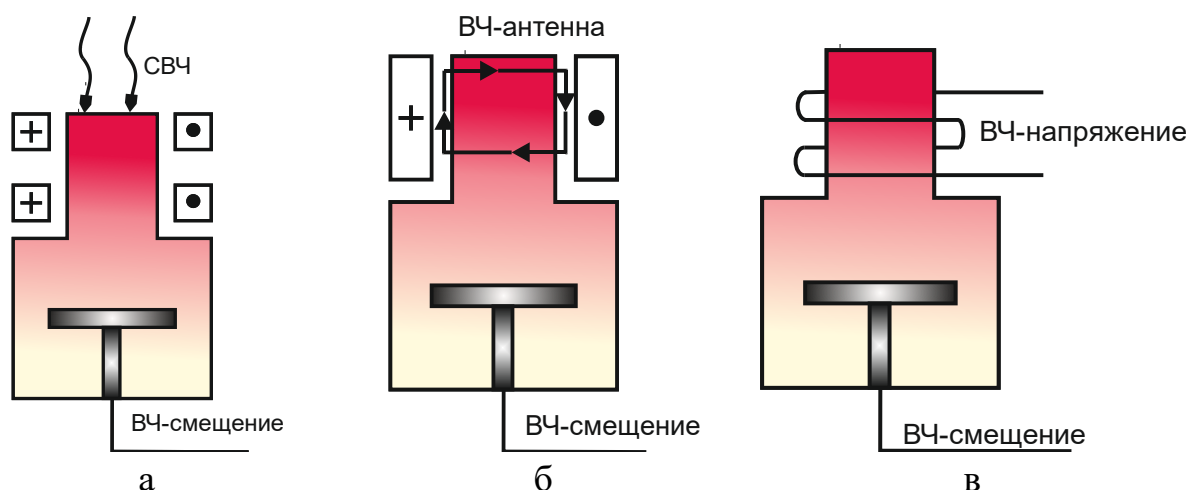


Рисунок 11 – Разрядная система

а – на основе электронно-циклотронного резонанса; б – на основе геликоновой волны; в – на основе индуктивно-связанной плазмы

ВЧ-разряд – это разряд, в котором плотность ионов в плазме и слоях не меняется за период поля ( $f \geq 1 \text{ МГц}$ ), но длина волны в плазме превышает размеры системы. К разрядам низкого давления относятся разряды, в которых не происходит релаксации энергии электрона за время пробега разрядного промежутка [12]. Первой промышленно применяемой системой генерации ВЧ-разряда из-за простоты конструкции стала диодная система (рисунок 12).

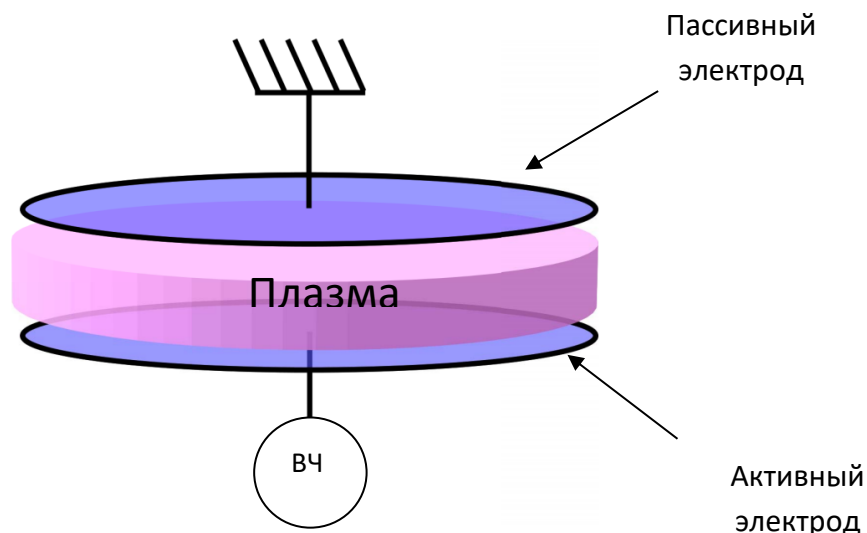


Рисунок 12 – Диодная ВЧ-система для получения ВЧЕ-разряда

Для получения высокочастотного ёмкостного разряда (ВЧЕ) переменное напряжение прикладывается к плоскопараллельным электродам. Между ними зажигается разряд. Электроды либо помещают в разрядную камеру, наполненную рабочим газом или смесью газов при давлении 0,1–10 Па, либо располагают снаружи камеры с диэлектрическими стенками. При проведении травления расстояние между электродами 4–8 см, ВЧ-напряжение 1–5 кВ,  $f = 1,76\text{--}13,56 \text{ МГц}$ , скорость травления 0,1–1 мкм/с. В отличие от постоянного, для переменного тока присутствие диэлектрика в цепи не препятствие, поскольку ток протекает через такое устройство и при отсутствии разряда. Система электродов в этом случае представляет собой конденсатор, что и определило название такого типа разряда – ёмкостный [13].

Важнейшей областью применения, обуславливающей интерес к ВЧЕ-разрядам, является их использование при низком давлении ( $p \sim 0,1\text{--}100 \text{ Па}$ ) для травления и нанесения тонких пленок в микро- и нанoeлектронике. Большой интерес вызывает разряд в метане и смесях метана с инертными газами, в котором возможно получение алмазоподобных тонких пленок, применяемых в электронике, оптике и оптоэлектронике [14]. Существуют три основных способа подключения ВЧЕ разрядных систем. В первом случае ВЧ-смещение подается на верхний электрод, пластина кладется на заземленный



электрод. В данной ситуации энергия бомбардируемых на подложку ионов минимальна, травление может осуществляться только по изотропному механизму. Во втором случае ВЧ подается на подложкодержатель, энергия бомбардирующих ионов увеличивается, осуществляется анизотропный режим травления. В третьем случае ВЧ-смещение подается как на верхний, так и на нижний электрод, в результате на верхнем электроде задается вкладываемая в разряд мощность и, следовательно, концентрация плазмы, а на нижний электрод подается смещение, которое определяет энергию ионов, бомбардирующих подложку.

Однако ВЧЕ разрядная система имеет ряд недостатков [15–18].

Во-первых, плотность плазмы пропорциональна энергии ионов. Это значит, что увеличение плотности активных частиц (при неизменной концентрации (давлении) рабочего газа) происходит посредством увеличения мощности разряда. А увеличение вкладываемой в разряд мощности приводит к росту как концентрации заряженных частиц, так и энергии ионов в плазме, из-за чего увеличивается количество дефектов на обрабатываемой подложке.

Увеличение рабочего давления приводит к росту концентрации активных частиц, одновременно снижая концентрацию и энергию ионов плазмы. В результате в ВЧЕ-разряде можно получать химически активную низкоэнергетичную плазму, пригодную только для проведения травления по химическому (изотропному) механизму, или плазму низкой плотности с высокой энергией ионов, которая травит по физическому механизму и обладает малой селективностью и скоростью травления. Поэтому повышение скорости даже изотропного травления, в таких системах невозможно исходя из физических ограничений системы генерации плазмы.

Во-вторых, системы ВЧЕ-разряда работают при форвакууме 1–100 Па, рабочее давление ниже 1 Па практически не используется, (конечно предельное рабочее давление определяется конструкцией реактора, давлением, мощностью и т. д.). Концентрация ионов при давлении 1 Па достигает величины  $10^9 \text{ см}^{-3}$ . Для повышения скорости травления и управления направленностью процесса необходимо отсутствие соударений в «темной» приэлектродной области, то есть увеличение длины свободного пробега активных частиц, что достигается снижением рабочего давления до 0,1–1 Па и при этом повышение концентрации ионов низкой энергии до  $10^{10}$ – $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

В-третьих, системы ВЧЕ-разряда из-за большого рабочего давления, обычно в диапазоне 10–100 Па, требуют повышенного расхода дорогостоящих рабочих газов, коэффициент использования которых достигает 65 %.

В-четвертых, системы ВЧЕ-разряда подразумевают наличие электродов в рабочей камере, что требует юстировки их параллельности и постоянной очистки, которая усложняет замену и наладку таких промышленных систем.

Исходя из вышесказанного, начиная с конца 80-х годов прошлого столетия на передовых производствах микроэлектроники в США и странах Европы стали внедряться системы травления на основе безэлектродного высокочастотного индукционного разряда (ВЧИ), в которых реализована генерация и поддержание низкоэнергетичной (энергия ионов  $E_i < 25$  эВ) плазмы с концентрацией ионов до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> при рабочем давлении 0,1–10 Па.

Существует два основных типа систем ВЧИ-разряда: с цилиндрическим и плоским (для равномерной обработки больших площадей) индуктором (рисунок 13). ВЧ-мощность, приложенная к индуктору, создаёт вихревое электрическое поле и генерирует плазму в реакторе.

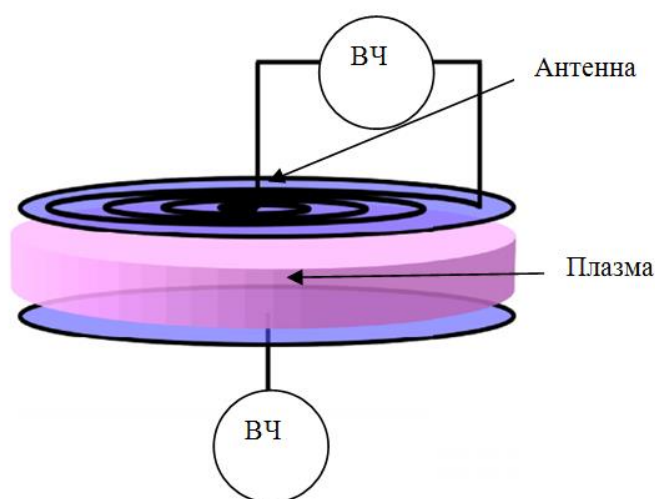


Рисунок 13 – Схема разрядной системы плоского источника индуктивно-связанной плазмы

Дополнительно к подложке можно подключить ВЧ или постоянное смещение, что увеличивает интенсивность ионной бомбардировки обрабатываемой поверхности и позволяет либо увеличивать скорость изотропного травления, либо осуществлять анизотропное травление. Это напряжение не обеспечивает генерацию плазмы, а только управляет энергией ионов. В результате появляется возможность независимого управления плотностью плазмы и энергией ее ионов.