

ТРАВЛЕНИЕ

Практическое занятие №5

По курсу ФХОМиНЭ

Жидкостное травление

Травлением в жидких средах (или химическим травлением) называется процесс переноса вещества из твёрдой фазы в жидкую, т.е. растворение вещества подложки или технологических слоев химическими реактивами (щелочами, кислотами и их солями), называемыми **травителями.**

Цели процессов химического травления

- **удаление с поверхности полупроводниковой подложки механически нарушенного слоя;**
- **снятие с полупроводниковой подложки слоя исходного материала определённой толщины;**
- **локальное удаление материала подложки или технологического слоя с определённых участков поверхности;**
- **создание определённых электрофизических свойств обрабатываемой поверхности подложки;**
- **выявление структурных дефектов кристаллической решётки полупроводниковой подложки;**
- **получение мезоструктур.**

Методы травления полупроводников

- Изотропное травление;***
- Анизотропное травление;***
- Селективное травление;***
- Локальное травление;***
- Послойное травление.***

Изотропное травление – растворение полупроводника с одинаковой скоростью травления по всем направлениям монокристаллической подложки. Применяют для удаления нарушенного поверхностного слоя и полирования поверхности.

Анизотропное травление – растворение полупроводника с различной скоростью по разным направлениям монокристаллической подложки. Используют для выявления структурных поверхностных и объёмных дефектов.

Селективное травление – растворение полупроводника с различной скоростью на разных участках поверхности с одной и той же кристаллографической ориентацией (либо с различными скоростями травления слоёв разного химического состава в избирательных травителях). Позволяет выявлять дефекты и несовершенства кристаллической структуры подложек (дислокации, дефекты упаковки, границы зерен и др.), а также p–n–переходы и различные фазовые включения;

Локальное травление – удаление материала со строго ограниченных и заданных участков подложки. Обеспечивает получение элементов требуемой конфигурации и заданного рельефа на поверхности подложек. Позволяет создавать необходимый рисунок микросхемы (создавать заданную конфигурацию технологических слоёв, проводить мезатравление). Для локального химического травления используют изотропные и анизотропные травители.

Послойное травление – равномерное последовательное снятие тонких поверхностных слоёв полупроводника. Применяют для изучения поверхностных и объёмных дефектов кристаллической структуры подложек и эпитаксиальных слоёв. Используют полирующие травители с малой скоростью травления (менее 0,1 мкм/мин).

Типы растворения вещества

По характеру взаимодействия с веществом химическое травление является реакцией растворения. Различают три типа растворения.

1. Молекулярное растворение – химическая формула растворяемого вещества в исходном состоянии и в растворе полностью идентична. После удаления (испарения) растворителя растворённое вещество может быть выделено в химически неизменном виде.

2. Ионное растворение – исходное состояние вещества и его состояние в растворе не идентичны. В растворе происходит растворение ионного кристалла на катионы и анионы, которые окружены сольватационными оболочками (например, полярными молекулами воды), которые обеспечивают устойчивость таких растворов. После удаления растворителя растворённое вещество может быть получено в химически неизменном виде.

3. Реактивное растворение - растворение сопровождается химическим взаимодействием между растворённым веществом и растворителем, в растворе существуют продукты реакции, химически отличные от исходного состояния системы.

Удаление остатков растворителя не позволяет получить растворённое вещество в исходном состоянии.

Кинетика процессов травления

Все процессы травления полупроводниковых материалов являются реактивными. При этом процесс травления может быть представлен в виде пяти стадий:

- 1. Перенос молекул (ионов) травителя из объёма раствора к поверхности полупроводника;**
- 2. Адсорбция молекул травителя на поверхности полупроводника;**
- 3. Кинетическая стадия процесса;**
- 4. Десорбция продуктов реакции с поверхности полупроводника.**
- 5. Удаление продуктов реакции с поверхности полупроводника в объём раствора.**

1. Перенос молекул (ионов) из объёма раствора

В начальный момент травления за счёт интенсивной реакции вблизи поверхности пластины полупроводника образуется слой, обеднённый молекулами травителя. Это приводит к возникновению градиента концентрации травителя и возникновению диффузионного потока этих молекул к поверхности полупроводника.

2. Адсорбция молекул травителя

На данной стадии молекулы травителя вступают в контакт с поверхностью полупроводника. Этот контакт может являться либо **химической** адсорбцией, либо **физической** адсорбцией.

В случае **химической** адсорбции в зависимости от типа поверхности и адсорбированных компонентов между молекулами травителя и поверхностью полупроводника возникают либо **силы обменного взаимодействия**, либо **силы кулоновского притяжения**. В случае физической адсорбции молекулы травителя удерживаются на поверхности **силами Ван-дер-Ваальса**.

3. Кинетическая стадия процесса.

Данная стадия представляет собой собственно химическое взаимодействие адсорбированных молекул травителя с полупроводником. Происходит разрыв химических связей между атомами, расположенными в объёме и поверхностными атомами полупроводника с последующим переходом последних в раствор.

4. Десорбция продуктов реакции

В ходе кинетической стадии на поверхности полупроводника накапливаются продукты реакции, которые могут быть химически или физически связаны с ней. Прежде чем перевести их в раствор, необходимо эти связи разрушить.

5. Удаление продуктов реакции в объём раствора

Вблизи поверхности полупроводника накапливаются продукты реакции, концентрация которых в объёме раствора существенно меньше, чем на границе полупроводник – раствор. Возникает градиент концентрации продуктов травления, обуславливающий возникновение диффузионного потока молекул этих продуктов, направленного от поверхности полупроводника в объём раствора. Данная стадия является аналогичной стадии 1 с той лишь разницей, что происходит диффузионный перенос в объём раствора не молекул травителя, а продуктов его взаимодействия с полупроводником подложки.

Травление с диффузионным контролем

В данном случае скорость процесса травления никак не связана со свойствами поверхности полупроводника. Поэтому травление должно протекать изотропно, независимо от кристаллографического направления, а поверхность полупроводника должна быть гладкой.

Травители являются интегральными, а процесс – полирующим. Усилить полирующие свойства травителей можно уменьшением скорости протекания в них диффузионных процессов за счёт увеличения вязкости раствора (путём добавки гликолей, глицерина, поли спиртов), либо за счёт уменьшения температуры раствора.

Интенсивное перемешивание раствора, наоборот, снимает диффузионное ограничение и ухудшает полирующие свойства травителя.

Травление с кинетическим контролем

Скорость травления будет различной для плоскостей кристаллов с различной плотностью упаковки атомов, а само травление будет анизотропным. Для полупроводников с алмазоподобной кристаллической решёткой (Si, Ge), как правило, наблюдается следующее соотношение скоростей травления: $U_{(100)} > U_{(110)} > U_{(111)}$.

Если на поверхности подложки имеются дефекты, то в этих местах происходит локальное увеличение скорости травления. «Дефектное» место растравливается с образованием фигуры (ямки) травления, форма которой определяется кристаллографической ориентацией поверхности подложки. Поэтому в данном случае гладкую поверхность получить не удаётся. Травители с кинетическим контролем называют **дифференциальными**, а процесс травления – **селективным**.

С увеличением времени процесса даже селективные травители проявляют тенденцию к выравниванию поверхности. Кроме того, в начальный момент времени процесса травления отсутствует диффузионное ограничение, т.е. все травители работают селективно.

Механизмы травления полупроводников

При отсутствии электрического поля травление полупроводников в жидких средах может происходить по двум принципиально разным механизмам:

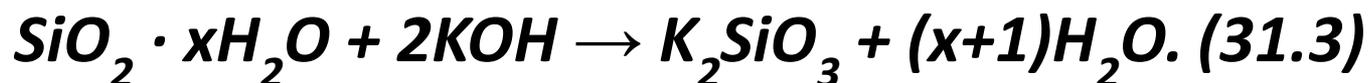
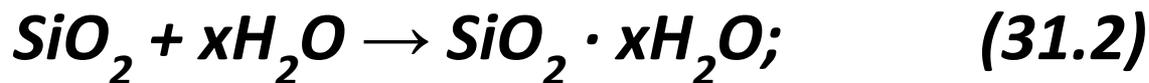
- химическому;***
- электрохимическому.***

Особенности химического механизма травления

При химическом механизме травления на поверхности полупроводника протекают окислительно–восстановительные реакции, обусловленные непосредственным, чисто химическим взаимодействием молекул травителя с поверхностными атомами. При этом все продукты реакции в виде растворимых комплексов полупроводника образуются в травителе одновременно.

Процесс травления полупроводников по данному механизму подчиняется законам химической кинетики гетерогенных реакций.

Травление кремния в щёлочи



Процесс травления кремния в щёлочи включает в себя реакции окисления кремния до его диоксида и восстановления воды при нагревании до молекулярного водорода (31.1). Наряду с этими процессами в системе происходит гидратация SiO_2 (31.2) и взаимодействие со щёлочью гидратированного SiO_2 с образованием метасиликатов (метасиликата калия) (31.3).

Особенности электрохимического механизма травления

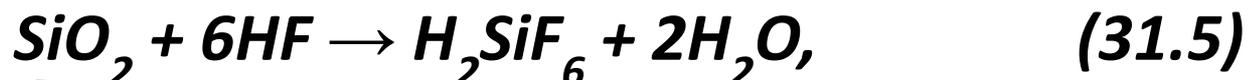
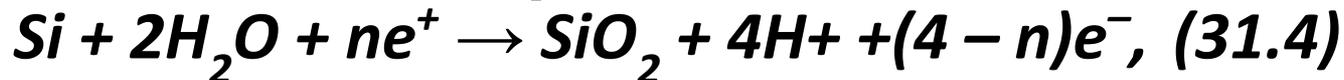
При электрохимическом механизме травления на поверхности полупроводника протекают две сопряжённые реакции: **анодного окисления полупроводника и **катодного восстановления** окислителя. Электрическая связь между анодами и катодами осуществляется через раствор травителя**

Пример: травление кремния в смеси кислот HNO_3 – HF.

Анодные реакции

На микроанодах поверхности протекает анодная реакция окисления кремния, а также комплексообразование и перевод в раствор атомов кремния в виде устойчивых комплексных анионов.

Схема анодной реакции:



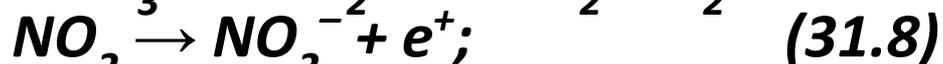
где n – эффективная валентность саморастворения кремния (количество ковалентных связей, удерживающих поверхностный атом), которая в зависимости от условий протекания реакции может изменяться от 2 до 4, e^+ – дырки, e^- – электроны. Анодная реакция сопровождается разрывом ковалентных связей поверхностных атомов, при участии дырок, которые создаются при протекании **катодной реакции**.

Катодные реакции

На микроэлектродах поверхности протекает катодная реакция восстановления основного окислителя (HNO_3):



Реакция (31.6) протекает в несколько этапов:



Наименее медленной стадией является реакция (31.7), в ходе которой из молекул HNO_3 регенерируются молекулы диоксида азота NO_2 . Для начала реакции необходимо присутствие в растворе некоторого количества молекул азотистой кислоты HNO_2 . Затем происходит её накопление в растворе согласно реакции (31.9). В ходе реакции (31.8) происходит генерация дырок за счёт захвата электронов из валентной зоны кремния. Эти дырки затем расходуются в анодном процессе и ответственны за отрыв атомов кремния от поверхности.

Режимы электрохимического травления

В зависимости от самой медленной стадии различают травление под катодным контролем и анодным контролем

Катодный контроль. Скорость реакции связана только со стадией восстановления, определяемой интенсивностью доставки молекул окислителя к катодным участкам и не зависит от свойств полупроводника. **Катодный контроль** является полным аналогом **диффузионного ограничения** реакции. Травители с катодным контролем работают как **полирующие**.

Анодный контроль. Анодный процесс связан с отрывом атомов полупроводника в раствор. Скорость анодной реакции определяется энергией связи поверхностных атомов с решёткой и зависит от плотности упаковки атомов, наличия дефектов, примесей и т.д. Скорость травления при анодном контроле анизотропна. **Анодный контроль** является аналогом **кинетического ограничения**. Травители с анодным контролем работают **селективно**, поэтому подбор их состава в основном определяется свойствами полупроводникового материала.

Материалы, подвергаемые травлению

В качестве материалов, наиболее часто подвергаемых травлению «мокрыми» процессами, выступают различные функциональные слои ИИЭ из:

- диоксида кремния;**
- алюминия и его сплавов;**

вспомогательные технологические слои из:

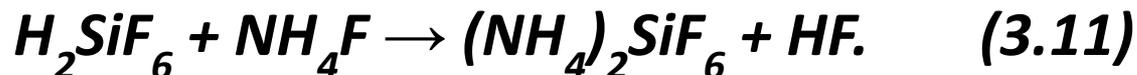
- нитрида кремния;**
- фоторезиста.**

Травление слоёв SiO_2

Для химического травления слоев SiO_2 используют, как правило, травители на основе HF . Однако в технологии ИИЭ водные растворы HF используются, как правило, только для процессов открытого травления SiO_2 (полное или частичное удаление слоя SiO_2 , удаление с поверхности кремния естественного слоя SiO_2 , непосредственно перед нанесением металлизации – т. н. освежение контактов. Это обусловлено интенсивным газыделением SiF_4 , приводящим к отслаиванию маски резиста и искажению геометрии функциональных слоев ИИЭ.

Для локального травления функциональных слоев ИИЭ через фоторезистивную маску используют так называемые буферные травители, получаемые добавлением в растворы HF фторида аммония NH_4F .

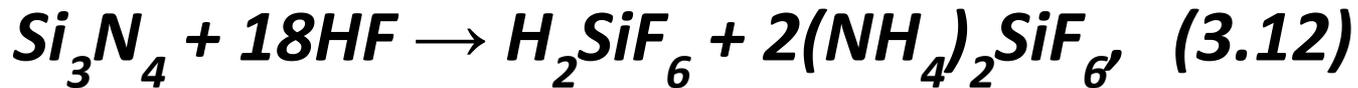
Травление слоев SiO_2 в буферном травителе описывается следующими реакциями:



Добавление NH_4F к HF увеличивает скорость травления благодаря образованию бифторид ионов HF_2^- , обладающих более высокой реакционной способностью по сравнению с HF .

Травление нитрида кремния

Химическое травление применяют для полного удаления слоев Si_3N_4 после процессов локального окисления. Для данной целью используют плавиковую и ортофосфорную кислоты либо их смеси. Химические реакции при удалении Si_3N_4 данными травителями :



Травление плёнок алюминия

Жидкостное химическое травление алюминиевых слоев осуществляют, как правило, в травителе, состоящем из концентрированной азотной, ортофосфорной, уксусной кислоты и воды. Процесс травления состоит из двух стадий - формирования Al^{3+} и образования $AlPO_4$ согласно схеме:

(3.19)

$Al \xrightarrow{-3e; HNO_3} Al^{+3} \xrightarrow{\text{ортофосфорная кислота}} AlPO_4$

Вода в ортофосфорной кислоте препятствует растворению Al_2O_3 и способствует растворению $AlPO_4$. Скорость процесса ограничена скоростью растворения Al_2O_3 в H_3PO_4 . В качестве конечных продуктов реакции выделяется газ, состоящий из смеси H_2 , NO и NO_2 .

Жидкостное удаление фоторезиста

Выбор метода снятия резиста и параметров процесса определяется исходя из следующих факторов:

1) чувствительности поверхности нижележащего слоя к воздействию растворителя (окисление, коррозия, загрязнение ионами, полное растворение);

2) стоимости удаления;

3) типа резиста;

4) предшествующей последовательности операций формирования слоя резиста, включая характеристики нижележащего слоя, параметры термообработки после экспонирования, задубливания, травления, ионной имплантации.

Удаление фоторезиста в кислотных составах

На стадиях формирования активной структуры ИИЭ в фотолитографическом процессе участвуют химически неактивные слои: моно-Si, SiO₂, Si₃N₄, полиSi. Для снятия фоторезиста в данном случае используют **кислотные составы.**

Кислотные составы для удаления фоторезиста, содержат сильные кислоты и сильные окислители, преобразуют полимерную пленку фоторезиста в эмульгированную или растворимую форму.

Наиболее широкое распространение для снятия фоторезиста получила смесь H₂SO₄ и H₂O₂ (10:1)-травитель КАРО**. Механизм удаления фоторезиста в смеси КАРО аналогичен механизму удаления органических загрязнений.**

Удаление фоторезиста в кислотных растворителях

На заключительных стадиях изготовления ИИЭ (формирование металлических слоев, вскрытие контактных окон в межслойной диэлектрике и пассивирующем покрытии) использование кислотных составов неприемлемо. Для снятия фоторезиста на данных этапах используют **органические растворители**. Как правило, в данных случаях фоторезист снимают в растворе диметилформамида при температуре 130–150 °С.

Недостатки использования органических растворителей :

- высокая стоимость растворителей,
- необходимость сбора и обезвреживания отходов, - высокая взрыво- и пожароопасность,
- высокая токсичность.

Недостатки жидкостного химического травления

- капиллярные процессы в тонких щелях и проколах;**
- проблемы адгезии фоторезистивных масок и их стойкости к травителям;**
- ускоренный характер травления по границам зерен;**
- необходимость применения различных травителей для травления многослойных и многоуровневых структур;**
- трудность контроля в процессе травления.**

МЕТОДЫ СУХОГО ТРАВЛЕНИЯ

ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ (ИПТ)

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ТРАВЛЕНИЕ (ИЛТ)

С ФОКУСИРОВКОЙ И БЕЗ ФОКУСИРОВКИ ИОННОГО ЛУЧА

С КОМПЕНСАЦИЕЙ И БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА

ИОННО-ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

РЕАКТИВНОЕ ИПТ

РЕАКТИВНОЕ ИЛТ

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ (ПХТ)

ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

РАДИКАЛЬНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Особенности ионного травления

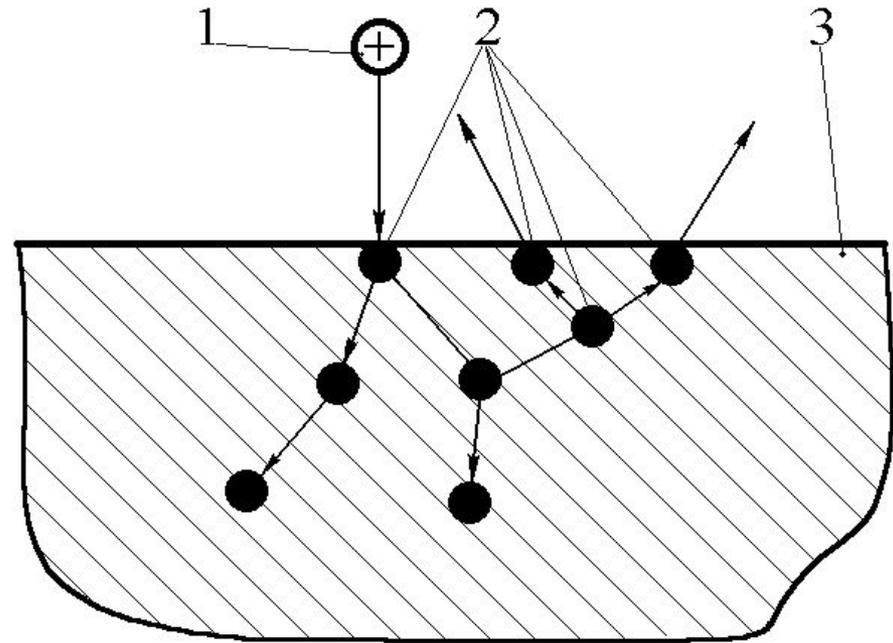
При **ионном травлении** для удаления материала используется **кинетическая энергия ионов инертных газов**, т.е. имеет место физическое распыление материала ионами.

Ионно–плазменное травление (ИПТ) образцы помещаются на отрицательный электрод разрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы.

Ионно–лучевое травление (ИЛТ), образцы являются мишенью, бомбардируемой ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника.

Ионное распыление

При распылении вещества 3 ион 1 передает импульс энергии атому распыляемого вещества, который передает импульс другим атомам, образуя каскад столкновений. Если поверхностный атом 2 распыляемого вещества 3 получит достаточный для разрыва связи с соседними атомами импульс энергии, направленный от поверхности, то он покидает ее.



**1 – ион, 2 –
поверхностный атом, 3
– распыляемое
вещество**

Коэффициент распыления

Эффективность процесса ионного распыления характеризуется **коэффициентом распыления**, который определяется числом удаленных частиц распыляемого вещества, приходящихся на один ион:

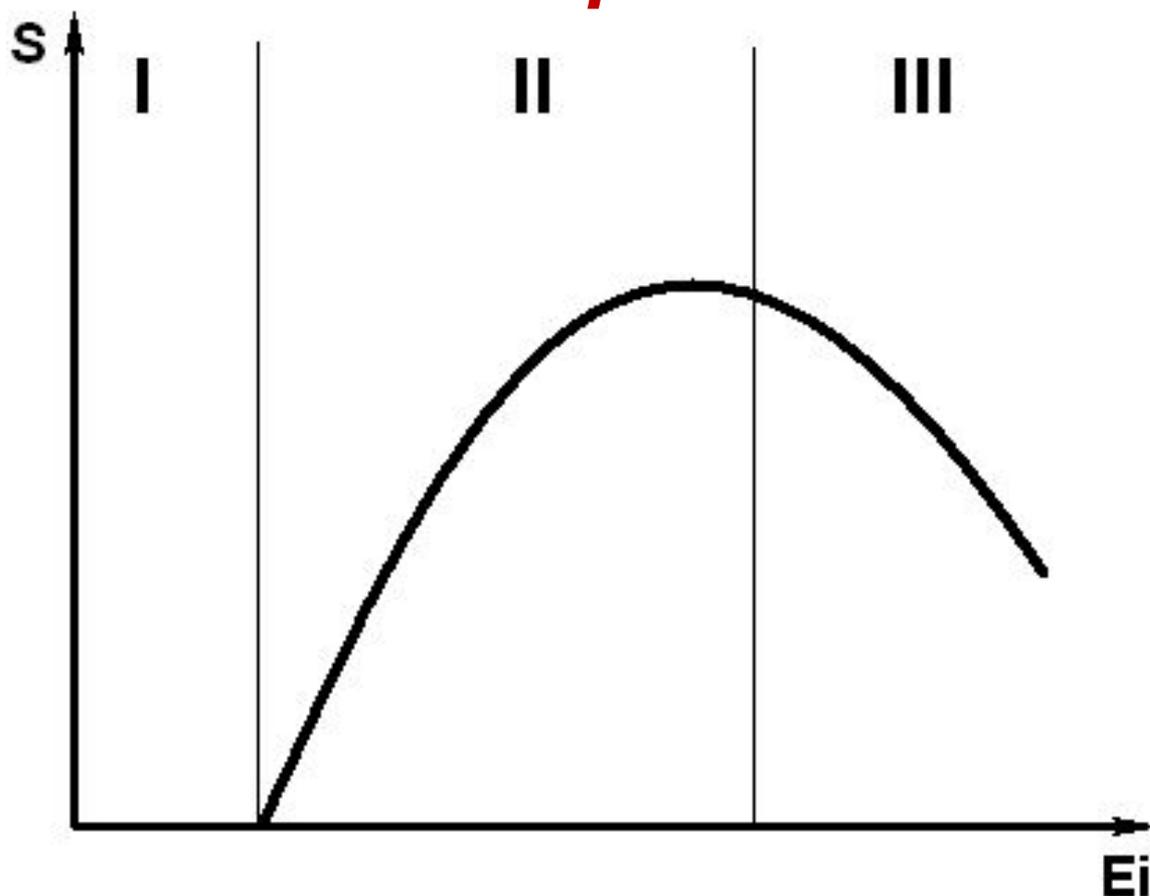
$$S = k \frac{m_I m_A}{\lambda(m_I + m_A)} E_I \cos \theta$$

S – коэффициент распыления, **k** – константа, учитывающая состояние поверхности, **m_I**, **m_A** – масса иона и атома мишени, **E_I** – энергия первичного иона, **θ** – угол между направлением движения иона и нормалью к поверхности, **λ** – средняя длина пробега иона в мишени:

$$\lambda = \frac{1}{\pi d_{I,A}^2 n_0}$$

d_{I,A} – диаметр столкновения иона и атома, **n₀** – концентрация атомов мишени.

Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов



- I – область энергий, где распыления отсутствует;***
- II - область распыления;***
- III - область энергий, где преимущественно имеет место имплантация***

Особенности ионно-химического травления

При ионно-химическом травлении используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала.

Особенности плазмохимического травления

При **ПХТ** для удаления материала используется **энергия химических реакций** между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием стабильных летучих соединений.

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

- **Плазменное травление**: образцы помещаются в плазму химически активных газов;
- **Радикальное травление**: образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами, или электрическими или магнитными полями, а травление осуществляется химически активными частицами (свободными атомами и радикалами), поступающими из плазмы.

Реактор для плазменного травления с емкостным разрядом

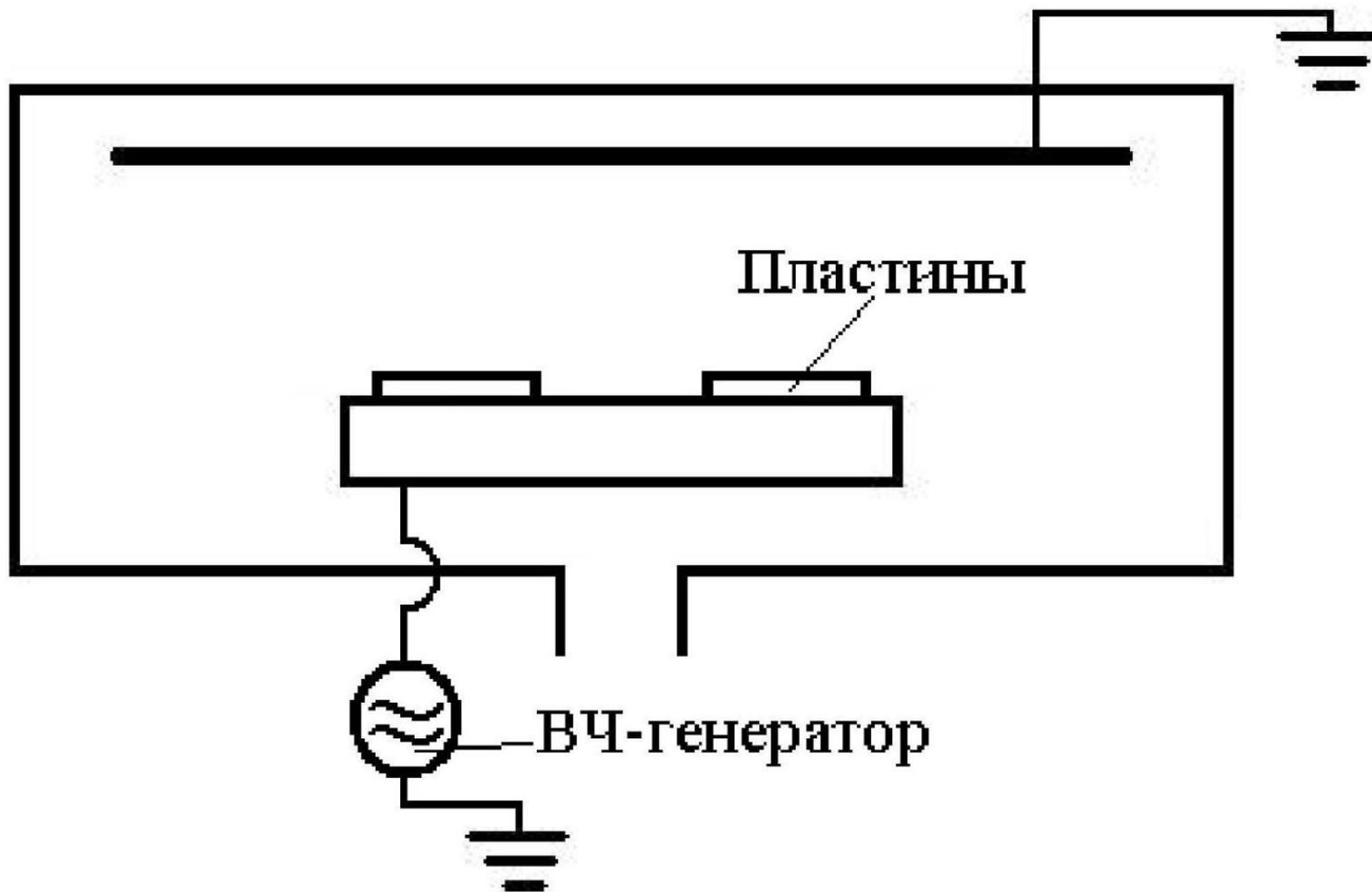
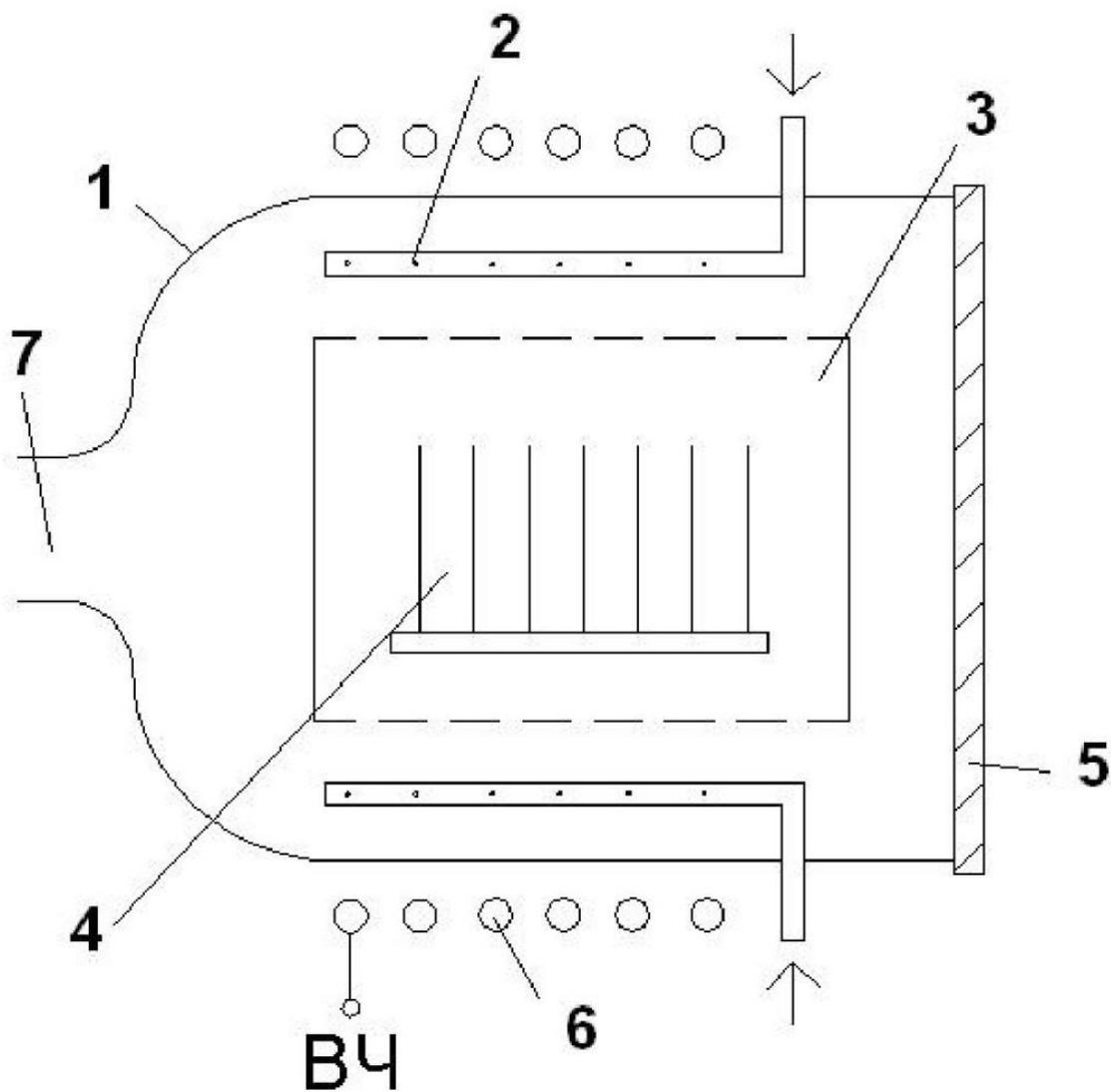


Схема ПХТ с индукционным (разрядом)



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

Процессы, протекающие в плазме

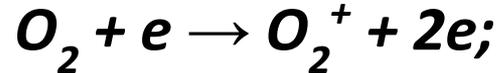
**Процессы, протекающие в плазме
очень сложны и состоят из
элементарных реакций между
следующими частицами:**

- электронами и молекулами;**
- электронами и радикалами;**
- электронами и ионами;**
- ионами и молекулами;**
- ионами и ионами.**

Явления в газовых разрядах

Возникновение ионов, атомов, радикалов

Простая ионизация: $Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e;$

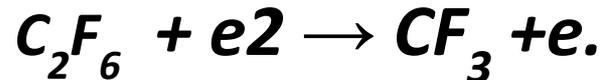
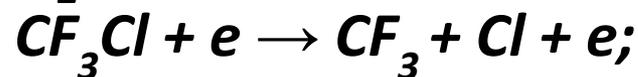


Диссоциативная ионизация: $CF_4 + e \rightarrow CF_3^+ + F + 2e;$

Диссоциативная ионизация с прилипанием:



Молекулярная диссоциация:



Потеря электронов

Диссоциативная рекомбинация: $e + O_2 \rightarrow 2O^-;$

Диссоциативное прилипание: $e + CF_4 \rightarrow CF_3^+ + F^-.$

Кинетика ПХТ

В общем случае кинетика состоит из следующих стадий:

- 1. Доставка молекул активного газа в зону разряда;**
- 2. Превращение этих молекул в активные радикалы;**
- 3. Доставка радикалов к поверхности обрабатываемых материалов;**
- 4. Взаимодействие радикалов с активными центрами обрабатываемого материала;**
 - 4.1 Адсорбция радикалов на поверхности;**
 - 4.2 Химическая реакция;**
 - 4.3 Десорбция продуктов реакции;**
- 5. Удаление продуктов реакции из разрядной камеры.**

Основные параметры процессов травления

Скорость травления

Равномерность травления

Селективность травления

Анизотропия травления

Скорость травления

$$g = \frac{d_0 - d_1}{t}$$

**d_0 - исходная толщина
слоя;**

**d_1 - конечная толщина
слоя;**

t - время травления.

Равномерность травления

Скорость травления, как правило, неоднородна по площади пластины и лежит в пределах $\pm \delta$, где u_f - средняя скорость травления, φ_f - безразмерный параметр.

С учетом неравномерности толщины удаляемого слоя общее время, необходимое для полного его вытравливания должно составлять:

$$t_c = \frac{h_f (1 + \delta)}{g_f (1 - \varphi_f)}$$

где h_f - средняя толщина удаляемого слоя, δ - неоднородность толщины.

Селективность травления

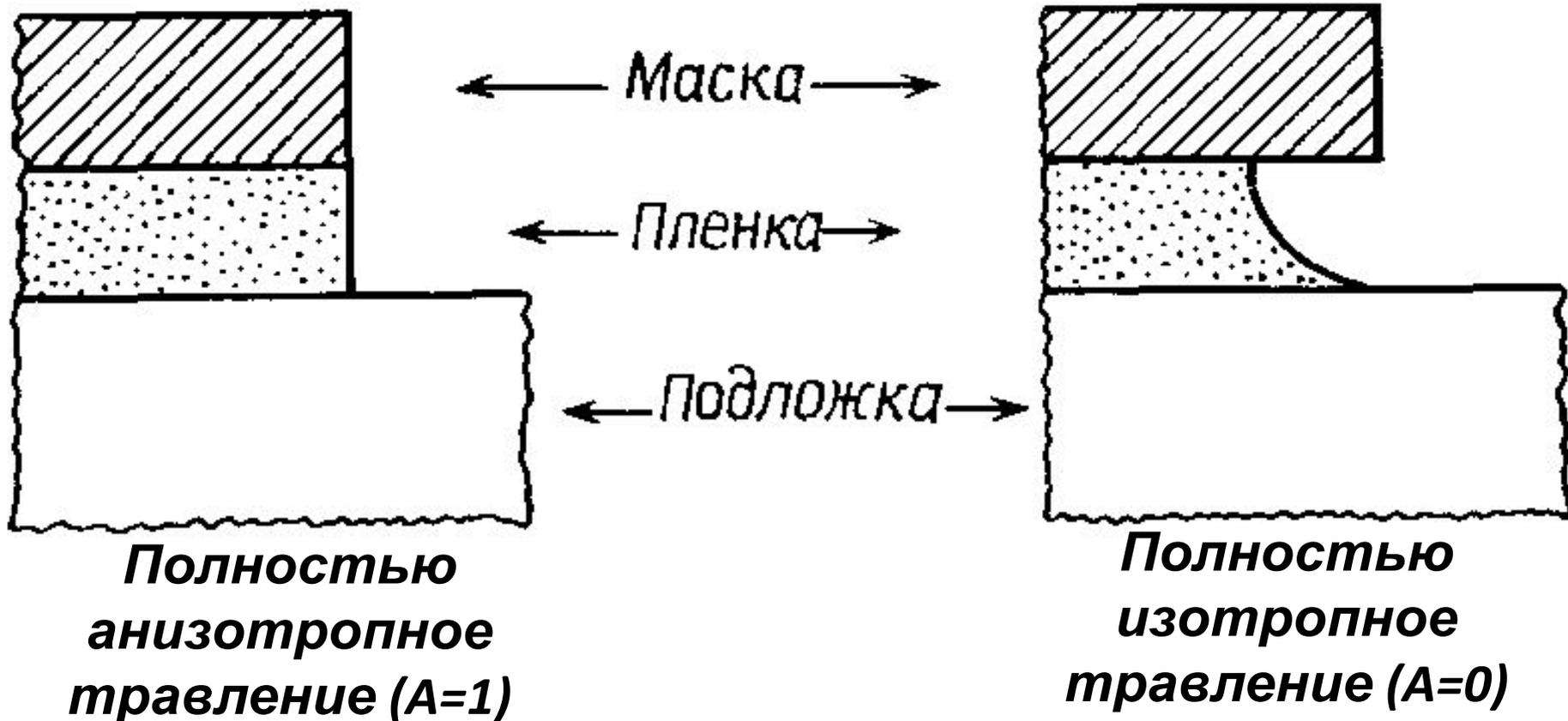
На практике все материалы, контактирующие с травителем, характеризуются конечным временем травления.

Селективность (избирательность) – отношение скоростей травления различных материалов.

Анизотропия травления

Анизотропия - разность скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Степень анизотропии: $A = 1 - \vartheta_L / \vartheta_V$, где u_L и u_V - скорости травления в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.



Сравнительные характеристики методов сухого травления

Параметр процесса	ИТ	ИХТ	ПХТ
Скорость травления	низкая	средняя	высокая
Равномерность процесса	низкая	средняя	высокая
Селективность	низкая	средняя	высокая
Анизотропность	высокая	средняя	низкая

Пути повышения анизотропии ПХТ

Чистое ПХТ при отсутствии каких-либо кристаллографических эффектов является изотропным.

Для получения анизотропии процесса травление стимулируют бомбардировкой положительными ионами. Известны два механизма стимуляции анизотропного травления ионной бомбардировкой:

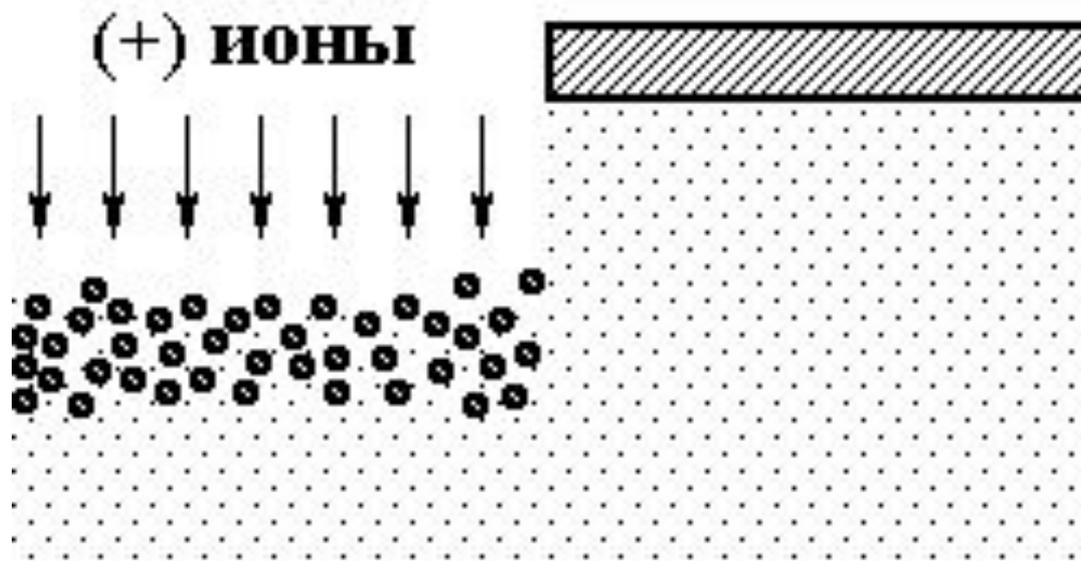
- 1. Создание радиационных нарушений.**
- 2. Формирование пассивирующего слоя на боковых стенках.**

Создание радиационных нарушений

Ионы, бомбардирующие кремний, создают радиационные нарушения в кристаллической решетке, простирающиеся в глубину на несколько монослоев от поверхности.

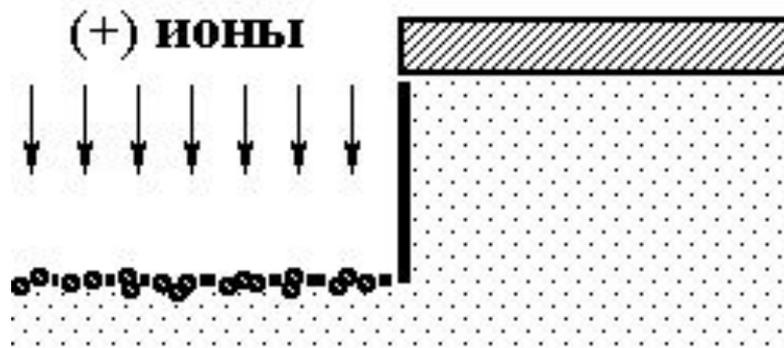
Радиационные повреждения катализируют процесс хемосорбции травителя.

Кроме того, химическая реакция с нарушенной областью кристалла протекает с повышенной скоростью, причем глубина и количество радиационных нарушений зависят от энергии ионов.



Формирование пассивирующего слоя на боковых стенках

Определенные газы (например, CHF_3 , CClF_3) или смеси газов (CF_4 - H_2) распадаются в плазме, образуя элементы с ненасыщенными связями и радикалы, способные к полимеризации. Эти элементы, взаимодействуя с поверхностью, формируют адсорбированный слой, а в некоторых случаях - сплошную пленку. Адсорбированный слой замедляет травление, адсорбируя элементы травителя либо препятствуя доступу частиц травителя к подложке. Ионная бомбардировка поверхности удаляет покрытие из ингибиторов, что вызывает анизотропию травления



БОШ – процесс

Для глубокого анизотропного травления используют так называемый БОШ-процесс, который представляет собой чередование двух стадий:

- изотропного ПХТ;**
- осаждения полимера.**

Достоинства:

- высокая скорость травления (до 20 мкм/мин);**
- возможность управления степенью анизотропии;**
- высокая воспроизводимость процесса.**

Травление кремния

Плазмохимическое травление кремния осуществляют во фторсодержащей плазме. Атомы фтора реагируют с кремнием *n* и *p* типа проводимости, а также с SiO_2 и Si_3N_4 , образуя летучие соединения.

В качестве источников фтора могут служить молекулы: F_2 , CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , SF_6 , SiF_4 , NF_3 , ClF_3 , которые при диссоциации в плазме могут образовывать атомарный фтор, а также различные фторсодержащие радикалы. В результате химических реакций с кремнием образуются летучие продукты такие, как SiF_2 и SiF_4 .

Для улучшения эффективности процесса в плазму добавляют кислород, который в атомарном состоянии окисляет углерод до CO и CO_2 .

ПХТ слоёв SiO_2

Используемые газы: C_3F_8 , CHF_3 , O_2 , He. C_3F_8 диссоциирует, образуя химически активные радикалы CFX , а также атомарный фтор: $\text{C}_3\text{F}_8 + e \rightarrow 2\text{CFX} + 2\text{F} + e$. Радикалы CFX (главным образом CF_3^+) взаимодействуют с SiO_2 с образованием таких летучих продуктов, как SiF_4 , CO , CO_2 , COF_2 :



Кислород способствует лучшему удалению из зоны травления нелетучих углеродсодержащих соединений за счет образования таких газов, как COF_2 , CO и CO_2 .

CHF_3 при диссоциации образует радикалы CF_3^+ , а также атомарный водород, связывающий атомы фтора: $\text{CHF}_3 \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{H}$,

$\text{H} + \text{F} \rightarrow \text{HF}$. При добавлении в газовую смесь CHF_3 происходит увеличение скорости травления SiO_2 за счет увеличения концентрации радикалов CF_3^+ и уменьшения скорости травления чистого кремния из-за уменьшения концентрации атомов фтора. Это позволяет обеспечить селективность травления SiO_2 по отношению к Si на уровне 10:1.

Добавка в газовую смесь гелия позволяет эффективно охлаждать стенки реактора и пластину во время, и после травления, что необходимо для сохранения геометрии фоторезистивной маски.

ПХТ слоёв Si_3N_4

Используемые газы: SF_6 , He.

Травление осуществляется атомами фтора, которые освобождаются в плазме гексафторида серы. Поскольку атомы фтора быстрее вступают в реакцию с Si_3N_4 , чем с SiO_2 , то данный процесс характеризуется селективностью травления Si_3N_4 по отношению к SiO_2 . Добавка гелия выполняет функцию хладоагента.

ПХТ алюминия

Используемые газы: BCl_3 , Cl_2 , SiCl_4 , He.

Травление алюминия осуществляется в плазмообразующей смеси $\text{BCl}_3 + \text{Cl}_2$ согласно схеме:

$\text{Al}_2\text{O}_3 + 12 \text{ эВ} \rightarrow$ разрушение решетки;

$2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6 \text{Cl}_2 \rightarrow 4 \text{AlCl}_{3(\text{тв.})} + 3\text{O}_{2(\text{газ.})}$;

$\text{Al} - \text{Al} > 6 \text{ эВ} \rightarrow$ разрушение решетки;

$\text{Al}_{(\text{тв.})} + 3\text{Cl} \rightarrow \text{AlCl}_{3(\text{тв.})}$;

$\text{AlCl}_{3(\text{тв.})} \rightarrow \text{Al}_2\text{Cl}_{6(\text{газ.})}$

Таким образом, чистый хлор обеспечивает удаление оксида алюминия, который всегда содержится на поверхности пленки алюминия, а также по границам кристаллических зерен.

Улучшение эффективности удаления



Процесс травления проводится в две стадии:

- **первые 60 секунд процесса (индукционный период)** происходят при более высокой мощности. Это обуславливает увеличение ионной составляющей плазмы и дополнительное травление поверхности пленки физическим распылением, характеризующимся малой селективностью травления Al по отношению к Al_2O_3 .
- **вторая стадия (травление слоя)** проводится с уменьшенной мощностью для более высокой селективности процесса

Анизотропия процесса

Добавка в газовую смесь SiCl_4 производится для исключения бокового подтравливания под маску фоторезиста. После разложения в плазме SiCl_4 образуются атомы **хлора, участвующие в реакции травления **Al**, а освободившийся **кремний** осаждается на боковых стенках и дне канавки травления. Осажденный **кремний** удаляется со дна канавки бомбардировкой положительными ионами, в то время как на боковых стенках этого не происходит из-за малого угла их падения.**

Таким образом, **кремний, осажденный на боковых стенках, блокирует реакцию с алюминием, поскольку не образует в плазме летучих соединений с хлором**

Удаление фоторезиста

Основным газом для «сухого» удаления резиста в плазме является **кислород**. При микроволновом возбуждении кислорода образуются различные нейтральные и заряженные частицы: O^3 , O^+ , O^{2+} , O^- , O^{2-} , **атомарный кислород** и **синглетный кислород**. Физическая химия процесса сравнима с химией горения с образованием летучих соединений (**CO_2** , **CO** , **H_2O** и **радикалов**). Для стабилизации кислородной плазмы в нее обычно добавляют инертный газ.

Недостатки «сухих» методов удаления материалов

- 1) осаждение полимеров на поверхности подложек;**
- 2) радиационные повреждения, приводящие к образованию дефектов кристаллической структуры и изменению параметров ИС;**
- 3) загрязнение поверхности подложек примесями, содержащимися в конструктивных элементах реактора и полимерах, осажденных на его внутренних поверхностях.**