

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Часть 3

**Кинетика процессов реактивного ионно-плазменного
травления полупроводников в галогенсодержащей плазме**

Учебно-методическое пособие для вузов

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2014

Утверждено научно-методическим советом физического факультета 24 апреля 2014 г., протокол № 4

Составители: Л.Н. Владимирова, Ю.И. Дикарев, В.М. Рубинштейн, В.И. Петраков

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. Терехов

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов 3-го курса дневного отделения физического факультета, обучающихся по программе подготовки бакалавров.

Для направлений: 210100 – Электроника и микроэлектроника, 011800 – Радиофизика (профиль подготовки – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть: характеристика низкотемпературной газоразрядной плазмы.....	5
1.1. Механизмы элементарных процессов в низкотемпературной газоразрядной плазме	5
1.2. Классификация процессов плазменного травления	7
1.3. Процесс реактивного ионно-плазменного травления и роль ионной бомбардировки в таких процессах	10
2. Экспериментальная часть.....	16
2.1. Экспериментальная установка	16
2.2. Методика выполнения работы	17
Контрольные вопросы	20
Литература	20

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные технологии в последней четверти XX века совершили настоящую научно-технологическую революцию в микроэлектронике. Придя в мир технологии микроэлектроники в качестве необходимой альтернативы жидкостному травлению, исчерпавшему к тому времени свой ресурс, плазменные или «сухие» технологии стали основным инструментом создания элементов изделий электронной техники. XXI век, несомненно, начался и протекает под знаком совершенствования таких технологий в твердотельной электронике.

Плазменные технологии включают совокупность методов нанесения тонких и сверхтонких слоев на подложку полупроводника, а также комплекс методов размерного травления таких слоев с заданными параметрами травления. Если рассматривать методики размерного травления с использованием сухих технологий, то всегда следует учитывать, что весь спектр таких методов широк.

Одни способы, такие как радикальное и плазмохимическое травление, подразумевают мягкое, чисто химическое взаимодействие плазменной среды с материалом подложки, результатом чего является образование летучего продукта травления и его удаление (откачка) из плазменного объема.

Другая группа «сухих» методик включает способы чисто физического воздействия высокоэнергетических частиц плазмы на поверхность материала и удаление атомов с поверхности только в результате распыления материала. Это методы ионного травления, ионно-лучевого, ионно-химического, где физический фактор является преобладающим.

Но наиболее интересен и перспективен круг методов, сочетающих преимущества мягкого химического воздействия на материал с одновременным физическим распылением поверхности. К таким методам относится реактивное ионно-плазменное травление, которое позволяет управлять вкладом физического и химического факторов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ: ХАРАКТЕРИСТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

1.1. Механизмы элементарных процессов в низкотемпературной газоразрядной плазме

Плазма – состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации и равенством концентраций положительных и отрицательных зарядов (квазинейтральностью).

Плазма – это, прежде всего, ионизированный газ, но ионизированный до такой степени, что электрические силы притяжения между разноименно заряженными частицами уравниваются в нем силами отталкивания между одноименно заряженными частицами.

Следовательно, независимо от плотности газа и его степени ионизации плазменный газовый объем остается электронейтральным. **Условие электронейтральности** плазмы можно записать в виде

$$\sum_n Z_n \bar{n}_n = \bar{n}_e,$$

где \bar{n}_n – концентрация ионов и \bar{n}_e – концентрация электронов, усредненные по времени и пространству; Z_n – заряд иона в плазме.

Сам термин «плазма» заимствован из биологии. Это заимствование произвели в 1923 году американские ученые И. Ленгмюр и Л. Тонкс с целью выделить и обозначить четвертое состояние вещества (от греческого *πλάσμα* – «вылепленное», «оформленное»). Учтем, что каждое вещество в определенных интервалах температур находится в соответствующих этим интервалам температур состояниях.

Плазма в стационарном состоянии может существовать только при наличии факторов, восполняющих убыль заряженных частиц.

Плазма в общем случае состоит из электронов, ионов и нейтральных частиц – атомов и/или молекул (радикалов), находящихся как в основном, так и в возбужденных (вращательных, колебательных, электронных) состояниях. Концентрация заряженных частиц в плазме достигает 10^{17} см^{-3} , и по своей электропроводности плазма приближается к проводникам. Плазму нельзя представлять как механическую смесь компонентов: все частицы плазмы находятся в непрерывном взаимодействии друг с другом и плазма в целом обладает рядом специфических свойств, которые вовсе не присущи отдельным ее составляющим. Различают изотермическую и неизотермическую плазму.

Изотермической плазме отвечает ионизированный газ при высокой температуре, когда энергии (температуры) всех составляющих плазму частиц равны ($T_e = T_i = T_n$) и все процессы обмена являются равновесными.

Неизотермическая плазма характеризуется тем, что средняя энергия (температура) электронов во много раз превышает энергию ионов и нейтральных частиц $T_e \gg T_i \approx T_n$; такое состояние реализуется при относительно небольшом выделении джоулевой теплоты за счет высокой теплоемкости газа тяжелых частиц и быстрого уноса теплоты из зоны разряда.

Низкотемпературная неравновесная газоразрядная плазма (ННГП) представляет собой слабоионизованный газ при давлениях $10^{-1} - 10^{-3}$ Па со степенью ионизации $10^{-5} - 10^{-3}$. Средняя энергия электронов в нем составляет 1–10 эВ (концентрация электронов $10^9 - 10^{12}$ см⁻³), а средняя энергия тяжелых частиц (атомов, молекул и ионов) в среднем на два порядка ниже.

Взаимодействия и обмен энергией в плазме осуществляются путем столкновения частиц и их взаимодействия с излучением. Все столкновительные процессы в плазме подразделяются на упругие и неупругие.

К **упругим** относят такие столкновения, которые не сопровождаются глубоким изменением в состоянии частиц, взаимодействующих путем столкновения, т.е. частицы, обменявшись энергией, разлетаются лишь с изменением траектории первоначального движения. Но именно в процессе упругих столкновений происходят накопление и обмен энергией, получаемой заряженными частицами от электрического поля, что в конечном итоге приводит к появлению неупругих столкновений.

Неупругие столкновения – это такие столкновения, которые приводят к глубокому изменению внутреннего энергетического состояния частиц. К неупругим столкновениям в первую очередь относятся процессы ионизации и диссоциации. Следует заметить, что частица после ряда упругих столкновений может накопить энергию, соответствующую ее возбужденному, т.е. энергетически пересыщенному, состоянию. Таким образом, **возбуждение** – это процесс, в результате которого образуется метастабильная, т.е. неустойчивая, частица. Такая метастабильная частица может быть передатчиком энергии от поля частицам рабочего газа, а по существу – служить энергетическим катализатором.

Тем не менее, среди процессов неупругих столкновений первостепенное значение имеют процессы ионизации, поскольку без ионизации не существует и самой плазмы. **Ионизация**, т.е. образование заряженных частиц из нейтральных, в плазме осуществляется через электронный удар, т.е. через столкновение тяжелой нейтральной частицы с легкой частицей – электроном, скорость движения которого (T_e) существенно выше. Схему такого взаимодействия для рабочего газа CF₄ можно представить следующим уравнением:



Процесс ионизации количественно характеризуется **степенью ионизации**, представляющей собой отношение числа образовавшихся ионов к начальному числу нейтральных газообразных частиц:

$$\alpha_{\text{ион.}} = n_i / n_n.$$

Наряду с процессами ионизации, определяющими образование плазменной среды, в ней параллельно протекают процессы **диссоциации**. Схему взаимодействия тяжелой частицы с электроном по диссоциативному пути для того же тетрафторида углерода можно представить в следующем виде:



Продуктами такого процесса являются радикалы и свободные атомы, отличительной особенностью которых служит наличие неспаренного электрона, придающего частице высокую химическую активность. Количественной характеристикой этого процесса служит **степень диссоциации**, т.е. отношение количества радикалов и свободных атомов к общему числу нейтральных газообразных частиц:

$$\alpha_{\text{дисс.}} = n_{\text{рад}} / n_{\text{г.}}$$

Изложенными процессами не исчерпывается все многообразие элементарных процессов в плазме. Основные из наиболее распространенных актов элементарных взаимодействий можно представить в следующем виде:

Элементарные процессы в низкотемпературной плазме

Типы процесса	№ процесса	Схема типичного процесса
Ионизация	1	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow 2e + \text{N}_2^+$
	2	$e + \text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+) \rightarrow 2e + \text{N}_2^+$
	3	$2\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+) \rightarrow \text{N}_4^+ + e$
	4	$\text{O} + h\omega \rightarrow \text{O}^+ + e$
Рекомбинация	5	$e + \text{N}_2^+ \rightarrow \text{N} + \text{N}$
	6	$e + \text{N}_4^+ \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2$
	7	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$
	8	$e + \text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$
	9	$e + \text{O}^+ \rightarrow \text{O} + h\omega$
Прилипание	10	$e + \text{O}_2 \text{ N}_2(\text{O}_2) \rightarrow \text{O}_2^- + \text{N}_2(\text{O}_2)$
	11	$e + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^- + \text{O}$
	12	$e + \text{O} \rightarrow \text{O}^- + h\omega$
Возбуждение	13	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + \text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$
	14	$e + \text{N}_2(\text{X}^1\Sigma_g^+) \rightarrow e + \text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$
	15	$e + \text{N}_2(v=0) \rightarrow e + \text{N}_2(v \neq 0)$
Перезарядка	16	$\text{N}_2 + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{O}_2$
	17	$\text{N}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2^+$

1.2. Классификация процессов плазменного травления

Вполне понятный интерес к процессам плазменного травления стимулировал исследования в этой области, причем было показано, что на плазмохимические процессы нельзя автоматически переносить общекинетические представления, в первую очередь положения теории Аррениуса. Необходимо помнить, что мы имеем дело с неизотермической системой частиц,

квазинейтральной (равенство полного заряда нулю), в которой активация химически активных компонентов осуществляется электронным ударом.

Низкотемпературная газоразрядная плазма может служить одновременно и источником участвующих в процессе частиц, и стимулятором процесса, и активатором поверхности, а может использоваться только для какой-то одной из этих целей.

По физико-химическому механизму взаимодействия поверхности твердого тела с частицами плазмы можно условно разделить все процессы «сухого» травления на три группы.

1. Ионное травление (ИТ). Удаление поверхностных слоев материала здесь осуществляется лишь физическим распылением. Распыление ведется с помощью энергетических ($0,1 \div 2$ кэВ) ионов газа. При этом химическая природа газа не играет никакой роли. Обычно это газы, химически совершенно не реагирующие с поверхностью (например, аргон).

Если обрабатываемый материал находится в непосредственном контакте с плазмой (т.е. плазма – источник ионов и среда протекания процесса), то такое травление мы назовем **ионно-плазменным (ИПТ)**.

Если зона протекания процесса отделена от зоны генерации ионов, т.е. у поверхности обрабатываемого материала нет контакта с плазмой, то такое травление называется **ионно-лучевым (ИЛТ)**. В этом случае мы имеем дело с потоком ионов, т.е. с ионным пучком, направленным к поверхности.

Ясно, что при ИПТ на поверхность материалов воздействуют электроны, нейтральные частицы, излучения плазмы, а при ИЛТ – лишь излучения плазмы. Тем не менее, в целом воздействие всех факторов слишком мало, пренебрежимо мало в сравнении с действием высокоэнергетичных ионов. При ИЛТ имеет место направленное движение ионов по отношению к поверхности.

2. Плазменное (плазмохимическое) травление (ПТ – ПХТ). Эта группа процессов по своему механизму воздействия на поверхность противоположна процессам сугубо ионного травления. Здесь мы имеем дело с процессами, в основе которых лежит чисто химическое взаимодействие поверхностных слоев материала с химически активными частицами (ХАЧ), генерируемыми в плазме, сопровождающееся образованием летучих продуктов реакции, их десорбцией и удалением из зоны процесса. В этом случае плазма играет роль генератора ХАЧ. Эти частицы образуются в результате низкоэнергетической электронной и ионной бомбардировки, а также воздействия излучения.

Отметим также два возможных случая осуществления ПТ, приводящих к наличию двух его разновидностей.

Если подвергаемая травлению поверхность находится в контакте с плазмой, то мы имеем дело непосредственно с **плазмохимическим травлением (ПХТ)**. В этом случае нельзя сбрасывать со счета влияние бомбардирующих поверхность электронов, излучения, частиц, непосредственно не участвующих в процессе травления.

В случае разделения реакционного пространства и объема, в котором генерируются ХАЧ, мы имеем дело с **радикальным травлением (РТ)**. При этом происходит сепарация, экстрагирование из разряда радикалов и свободных атомов, которые мы ранее объединили в понятие ХАЧ. Радикальное травление протекает интенсивно без стимуляции излучением или бомбардировкой электронами или ионами, этот процесс зачастую протекает спонтанно.

3. Реактивное ионное и ионно-химическое травление (РИТ и ИХТ). Это промежуточный случай между чисто физическим распылением и чисто химическим взаимодействием. В этих процессах атомные слои удаляются с поверхности вследствие суперпозиции физического и химического факторов воздействия.

Процесс травления здесь можно рассматривать как **физическое распыление** с одновременным протеканием химических реакций между ХАЧ и атомами поверхности, можно определить его и как **процесс химического взаимодействия ХАЧ** с поверхностными слоями при одновременном физическом распылении этих слоев.

Наиболее распространенной разновидностью этого типа травления является **реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ)**. Это сложный процесс, при котором материал подложки погружен в плазму, его поверхность подвергается воздействию энергетических ионов, свободных атомов и радикалов, электронов и излучения. В этом случае, варьируя те или иные технологические параметры, мы можем ускорять или замедлять процесс физического распыления, можем делать его вклад большим или меньшим.

Возможно ускорение или замедление самих химических реакций, которые могут активироваться, в частности, бомбардировкой ионами или излучением.

Отметим, что в случае отсутствия контакта поверхности образца с плазмой мы имеем **реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ)**. Здесь наряду с физическим распылением ионами имеет место и образование в такой плазме ХАЧ, которые чисто химически воздействуют на поверхность. Сами химические реакции на поверхности могут как ускорять, так и замедлять процесс физического распыления.

Из трех охарактеризованных групп процессы плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления осуществляются в плазме химически активных газов, значит на поверхность в этом случае воздействует одинаковый набор частиц: ионы, электроны, радикалы, свободные атомы, а также присутствует излучение.

Поэтому важно уметь различать эти процессы. Граница между ними должна лежать в области, где физическое распыление способно сыграть заметную роль. Условно в качестве критерия отнесенности процесса к ПХТ или к РИПТ используют величину энергии бомбардирующих ионов. Принято процессы с $E_{и} < 100 \text{ эВ}$ относить к ПХТ, а с $E_{и} > 100 \text{ эВ}$ – к РИПТ, в этом случае физическим распылением уже пренебречь нельзя.

Хотя рассмотренная нами классификация процессов травления в плазме и является общей – возможны какие-то разновидности, особенно в части стимулирования либо физических, либо химических процессов, – но в целом эта классификация свидетельствует о соотношении химического и физического факторов в процессе травления, а также о вкладе этих факторов в данный процесс.

1.3. Процесс реактивного ионно-плазменного травления и роль ионной бомбардировки в таких процессах

Этот метод сочетает в себе избирательность чисто химического воздействия с преимуществами физического распыления.

Процесс РИПТ осуществляют путем расположения обрабатываемых пластин на потенциальном электроде, на который подается ВЧ-напряжение. Таким образом, пластина помещена, погружена в плазму, в которой присутствуют как высокоэнергетичные ионы химически активного газа, так и незаряженная часть химически активных частиц – свободные атомы и радикалы. Значит, поверхность обрабатываемых пластин взаимодействует с ХАЧ и одновременно активируется физическим распылением. В отличие от ПХТ ионы в РИПТ обладают внушительной энергией, т.е. они способны не только на активацию процессов десорбции, но и на прямое физическое распыление.

Физический и химический компоненты РИПТ связаны теснейшим образом, вкладом каждого из них можно управлять. Но следует помнить, что процесс РИПТ в целом не является простой суммой химического и физического процессов, т.е. он неаддитивен, если судить по количеству снятого материала. Если бы каждый из них проводился отдельно, то ни физический, ни химический процессы не обеспечили бы такую эффективность травления. Значит, их одновременное протекание приводит к взаимному усилению.

Вклад каждого процесса и соотношение между ними зависят от вида используемого газа, энергии ионов, давления, ускоряющего напряжения и мощности, конструкционных особенностей системы.

Как и для РТ и ПХТ, большое значение для процессов РИПТ имеет химическое сродство используемого газа к материалу подложки. Чем оно выше, тем более высокую активность проявляют незаряженные фрагменты молекул газа – ХАЧ, т.е. радикалы и свободные атомы. Но если используемый газ не является высокоактивным по отношению к подложке или образующие им соединения с материалом подложки не обладают большой летучестью, то в этом случае процесс физического распыления начинает вносить большой вклад в процесс РИПТ.

Проводят РИПТ, как правило, в горизонтальных (диодной или триодной) ВЧ-системах. Возможно применение и вертикальных диодных ВЧ-систем, в которых электроды располагаются коаксиально.

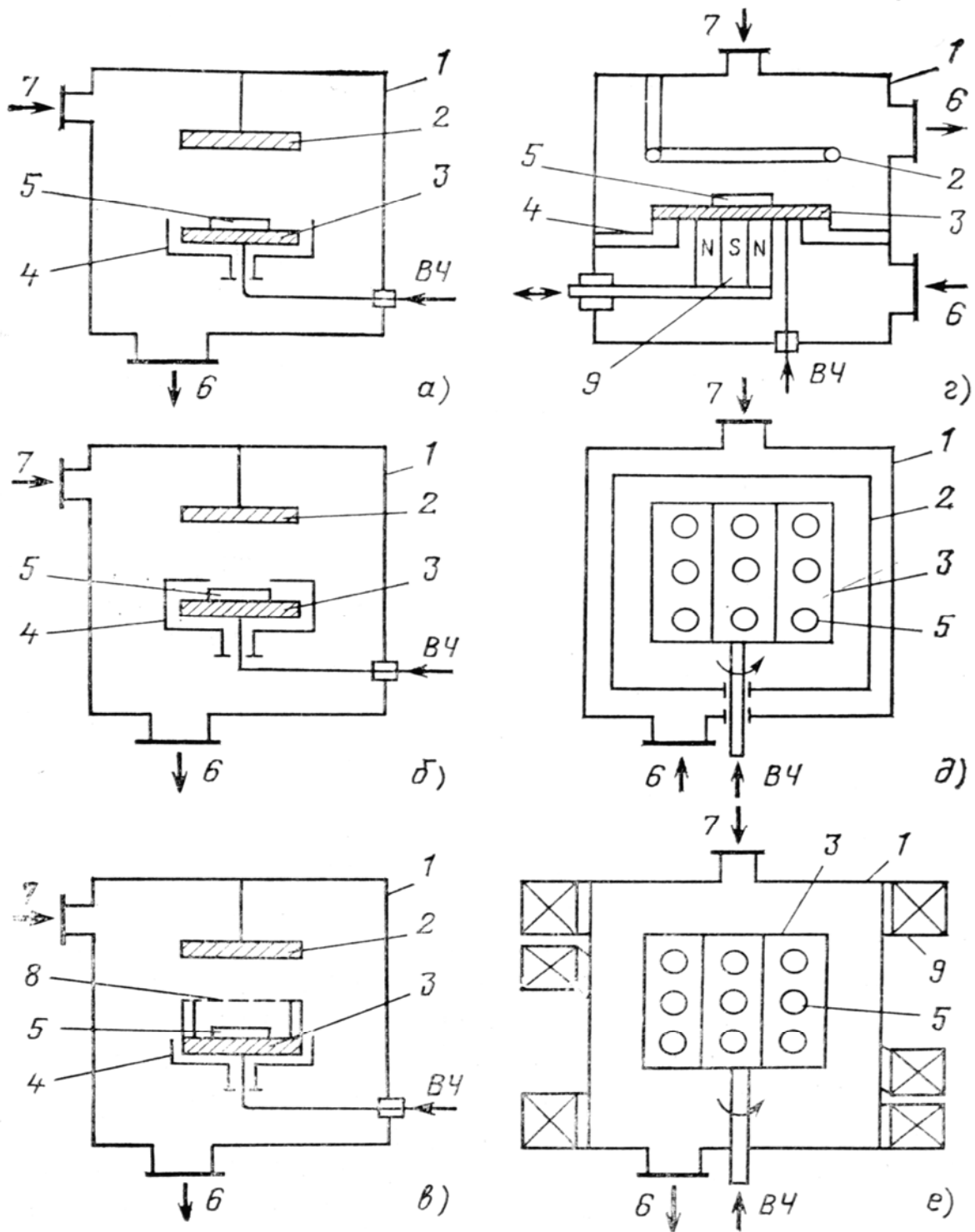


Рис.1. Наиболее распространенные системы РИПТ:
 а) диодная открытая; б) диодная полуоткрытая; в) триодная;
 г) магнетронная; д) вертикальная с шестигранным электродом;
 е) то же с наложением магнитного поля:

1 – рабочая камера, 2 – заземленный электрод, 3 – ВЧ-электрод; 4 – заземленный экран;
 5 – обрабатываемые пластины; 6 – линия откачки; 7 – линия напуска газа; 8 – триодная сетка; 9 – магнитная система

РИПТ предоставляет широкие возможности для управления селективностью как путем изменения операционных параметров, так и подбором газов и материала мишени. Селективность обеспечивается также и при изменении конструктивных параметров.

Большое значение в РИПТ имеет материал подложкодержателя, именно поэтому его чаще всего покрывают специальной пленкой либо SiO_2 , либо Si , либо пленкой какого-либо металла или полимера (фторопласт).

В первом приближении при травлении кремнийсодержащих материалов такие покрытия имеют своей целью изменение в плазме соотношения F / C , но в общем и целом состав и толщина покрытия подбираются экспериментально. Всегда следует помнить, что при изменении некоторых операционных параметров, например расхода газа и уровня мощности, в плазме меняются все концентрационные отношения

Отметим еще один фактор – расстояние между электродами, а также между электродом и сеткой для триодных систем.

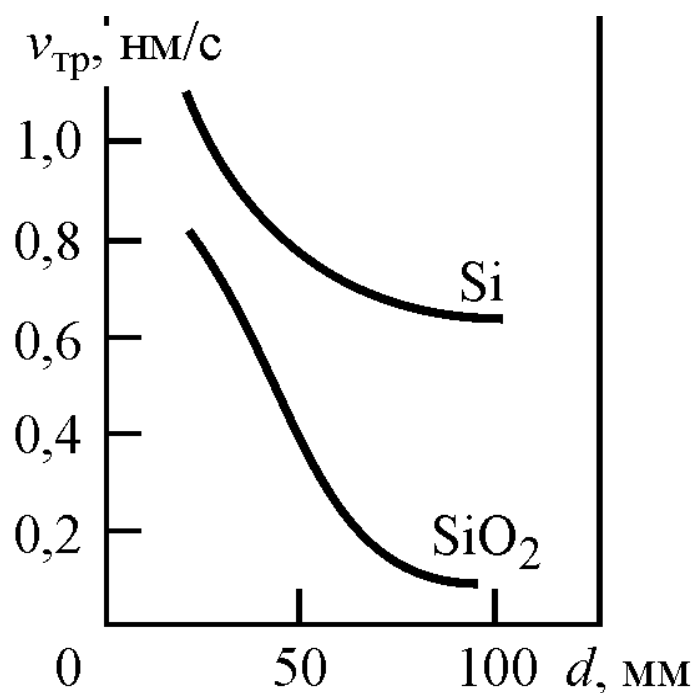


Рис. 2. Зависимость скорости травления от расстояния между ВЧ-электродом и сеткой в триодной системе в CHF_3

Напомним: в РИПТ селективностью можно управлять, но принцип «в плазме все зависит от всего» и здесь соблюдается неукоснительно. Например, селективность травления Si / SiO_2 плавно возрастает при увеличении расстояния между электродом и сеткой (газ – CHF_3), однако при этом растет толщина высаживаемой на поверхности углеродной пленки.

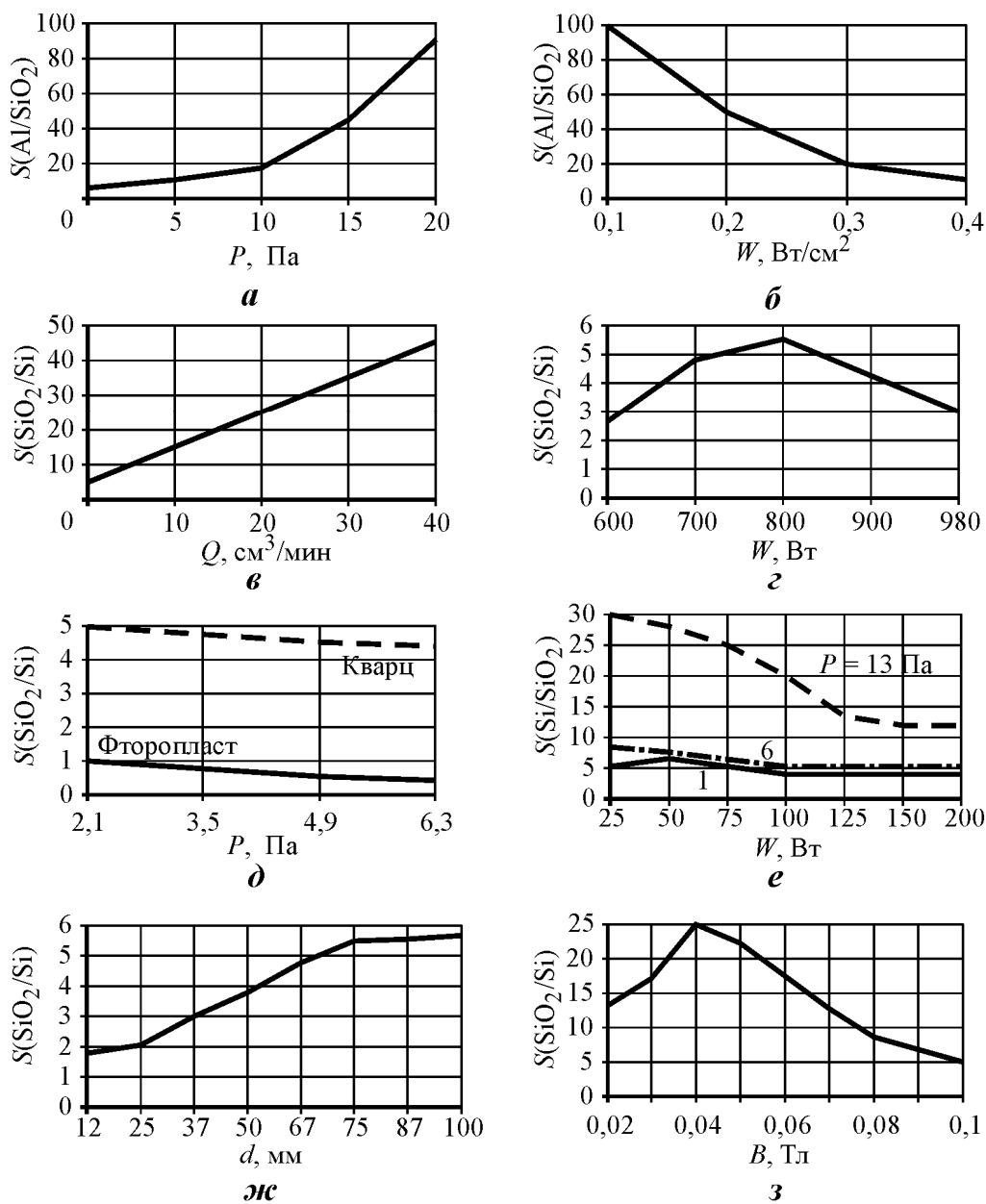


Рис. 3. Зависимость селективности травления S от операционных параметров РИПТ и конструктивных параметров системы:
 а – давления P SiCl_4 ; б – плотности W ВЧ-мощности в SiCl_4 ; в – расхода смеси $\text{CF}_4 + \text{H}_2$; г – ВЧ-мощности W в смеси $\text{C}_2\text{F}_6 + \text{CHF}_3 + \text{H}_2$; д – давления P CF_4 при различных материалах электрода; е – ВЧ-мощности W в триодной системе при различных давлениях SF_6 ; ж – расстояния d между ВЧ-электродом и сеткой; з – магнитной индукции B в планарной системе

Анизотропия в РИПТ в 3–5 раз выше, чем при ПХТ. Системы РИПТ дают и довольно приличное разрешение: $\sim 0,2$ мкм при $A = 20$ и $0,2 \div 0,1$ мкм при A до ~ 100 (с магнитным полем).

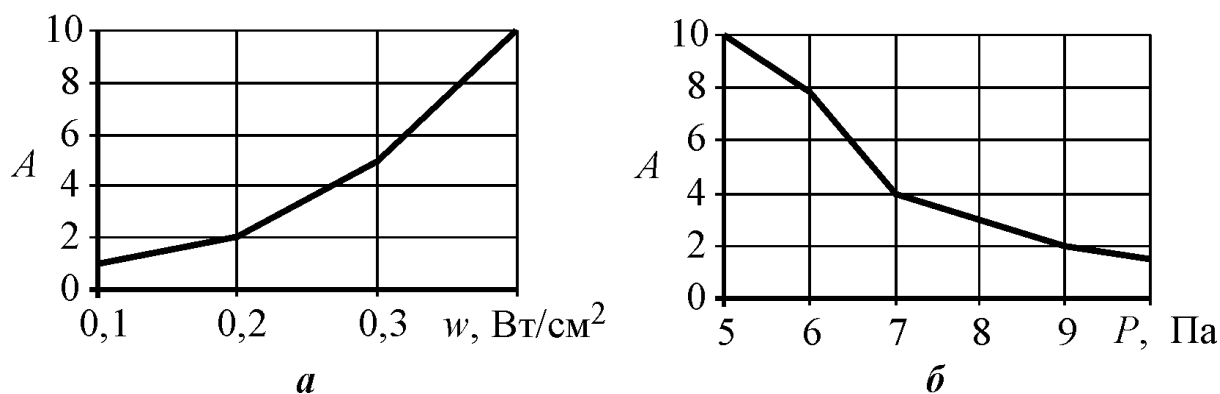


Рис. 4. Зависимость показателя анизотропии травления Al от операционных параметров в плазме SiCl₄:
 а – плотности ВЧ-мощности; б – давления

В РИПТ мы имеем дело с ярко выраженной зависимостью анизотропии от плотности мощности и давления, что закономерно. Рост мощности сопровождается закономерным ростом энергии ионов, движущихся перпендикулярно к поверхности. При понижении давления растет длина свободного пробега ХАЧ, поэтому вероятность их попадания на боковые стенки резко снижается. Одновременно возрастает импеданс приэлектродного слоя, уменьшается рассеяние ионов и растет их энергия, а следовательно, и анизотропия РИПТ.

Наконец, именно методика РИПТ дает возможность управления степенью вертикальности стенок – за счет изменения угла травления Si и SiO₂ от 90 до 50°, т.е. получения V-образного профиля (полый ВЧ-катод, P = 20 Па, газ CF₄, напряжение смещения 1,6 кВ, газовый поток изменяется).

Равномерность РИПТ зависит от распределения нейтральных ХАЧ по поверхности материала, а также от распределения ионов, электронов, фотонов, которые производят физическое распыление и стимулируют гетерогенные процессы.

Поскольку общей тенденцией при проведении процесса РИПТ является снижение риска внесения радиационных повреждений, постольку понятен поворот в сторону использования триодных (рис. 1в) и магнетронных (рис. 1г) систем. Цель одна – при сохранении высокой эффективности процесса повысить степень ионизации используемого газа и уменьшить энергию падающих ионов.

В катодной системе сетка, находясь под плавающим потенциалом и будучи изолированной от катода, образует полый катод. В нем можно в несколько раз увеличить плотность ионов и уменьшить их энергию.

Стабильность горения разряда наряду с одновременным снижением плотности радиационных дефектов относят к преимуществам триодных систем.

Как мы помним, магнетронная система, увеличивая электронную плотность вблизи мишени, способствует увеличению степени диссоциации и ионизации газа.

Скорость травления в системах РИПТ зависит практически от тех же факторов, что и при ПХТ: состава газа, мощности, давления, степени загрузки реактора, конструктивных особенностей системы и материалов оснастки, особенно электродов.

Однако скорость процесса РИПТ не зависит от температуры, что мы наблюдали при ПХТ. В системах РИПТ обязательно применяется водяное охлаждение, но только с целью предотвращения деструкции масок и материала оснастки. Абсолютные скорости процесса РИПТ не очень велики, они средние. В системах РИПТ травятся почти все материалы микроэлектроники; правда, много сложностей возникает с алюминием и его сплавами. До сих пор этот процесс воспроизводимо не освоен и тормозит создание замкнутой системы обработки пластин.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Экспериментальная установка

Получить задание и образцы у преподавателя и перед выполнением работы ознакомиться с методическими пособиями по устройству и принципу работы механических и диффузионных насосов, с методикой измерения давления в вакуумных системах.

Категорически запрещается самостоятельно производить включения и выключения на блоках управления (кнопки, тумблеры) и выполнять регулировки по установлению режимов процесса.

В зависимости от задач, поставленных преподавателем, изучить принцип работы микроскопа-интерферометра МИИ-4, аналитических весов и правила работы на них.

На рис. 5 представлена блок-схема установки РИПТ.

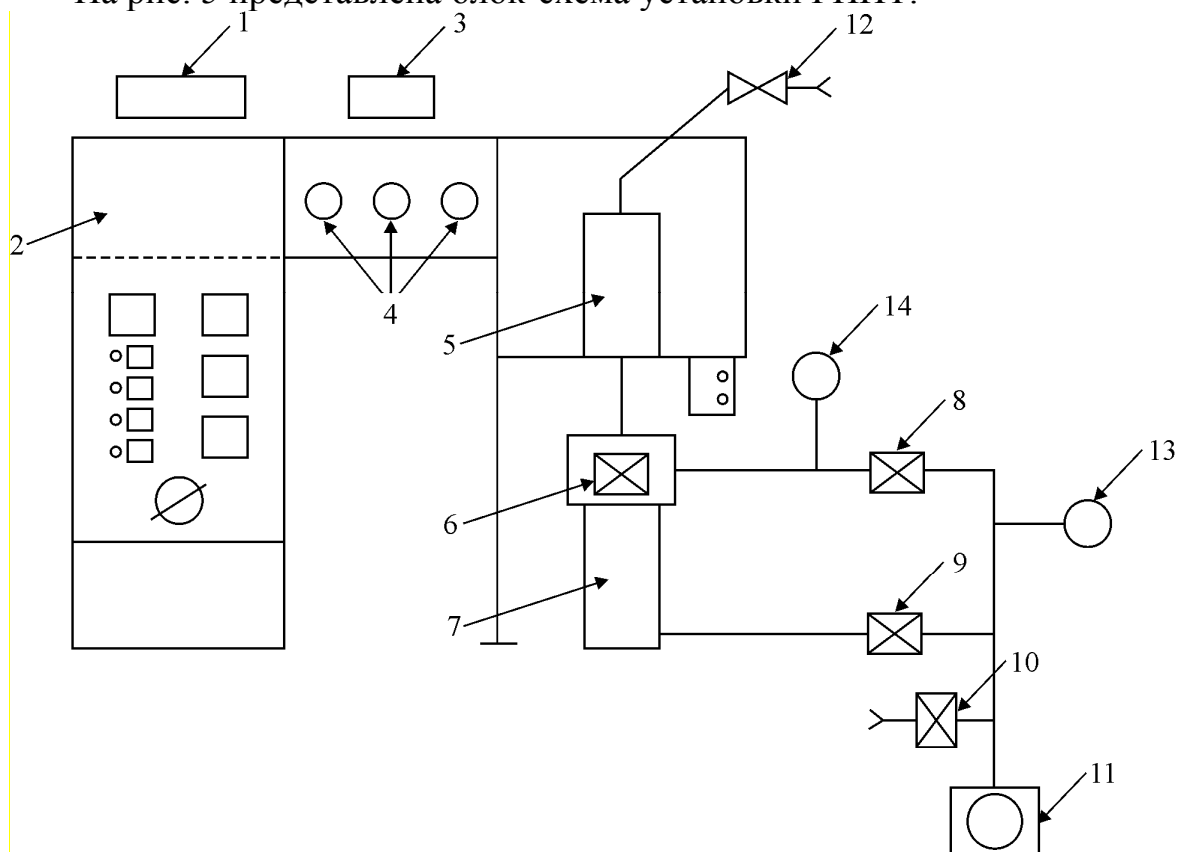


Рис. 5. Блок-схема установки РИПТ:

1 – задающий генератор; 2 – ВЧ-генератор и его блок управления; 3 – индикатор ВЧ-напряжения; 4 – регулировки блока согласования; 5 – реакционно-разрядная камера; 6 – главный клапан диффузионного насоса; 7 – диффузионный насос; 8, 9 – краны коммутации вакуумной системы; 10 – кран напуска воздуха в вакуумную систему; 11 – форвакуумный насос; 12 – натекатель; 13 – терморпарный преобразователь ПМТ-2; 14 – ионизационный преобразователь ПМИ-2

На рис. 6 и 7 представлены схемы блоков управления ВЧ-генератором и включения насосов вакуумной системы.

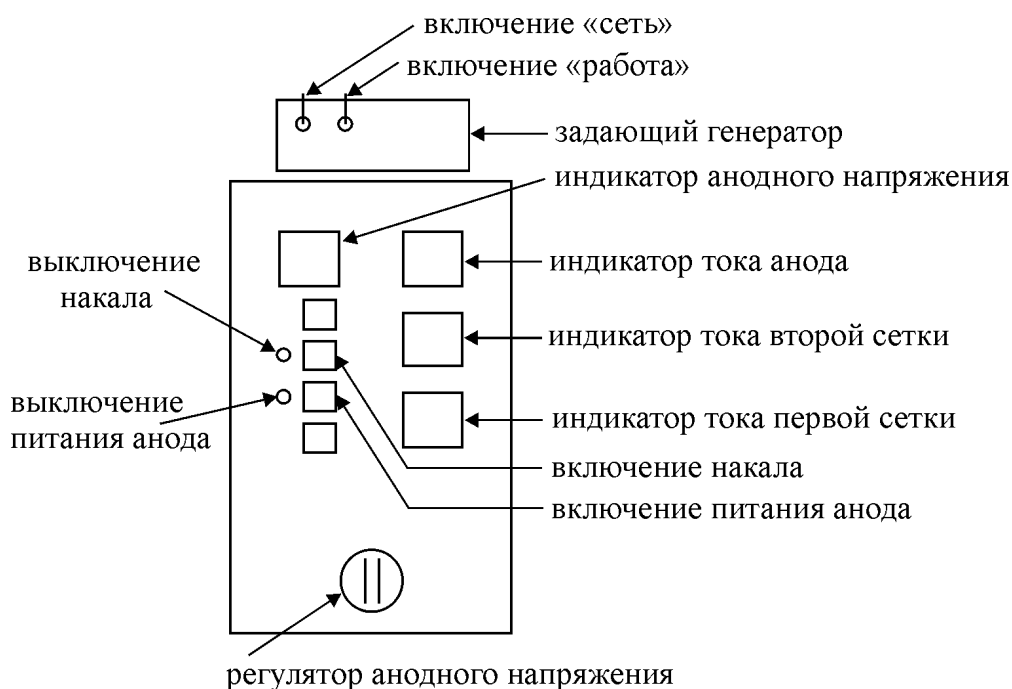


Рис. 6. Блок управления ВЧ-генератором

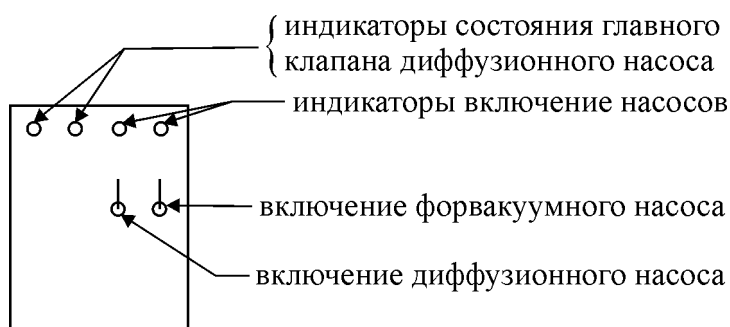


Рис. 7. Блок включения насосов вакуумной системы

2.2. Методика выполнения работы

I. Порядок приведения вакуумной системы в рабочее состояние:

1. Подготовить исследуемый образец (взвешивание, измерение линейных параметров топологии на поверхности с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4).
2. Разместить образец на рабочем столе реакционно-разрядной камеры.
3. Проконтролировать состояние вакуумных кранов: 6, 8, 9 – закрыты, 10 – открыт.
4. Закрыть кран 10.

5. Включить тумблер форвакуумного насоса (рис. 7).
 6. Включить вакуумметр и проконтролировать изменение давления на входе форвакуумного насоса.
 7. Открыть кран 9 откачки из диффузионного насоса и проконтролировать изменение давления в нем.
 8. Установить реакционно-разрядную камеру (РРК) на переходной узел диффузионного насоса.
 9. Закрывать кран 9 и открыть кран 8 откачки газа из объема РРК и проконтролировать изменение давления в ней.
 10. После достижения разрежения не хуже $p_0 \sim 7 \div 9 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. открыть кран 9.
 11. После получения (при открытых кранах 8, 9) давления p_0 открыть кран 6 и закрыть кран 8.
 12. Открыть кран поступления воды в охлаждающую систему диффузионного насоса и проконтролировать слив воды на выходе.
 13. Включить тумблер нагрева диффузионного насоса (рис. 7).
 14. Проконтролировать изменение давления по показателям вакуумметра. После установления стрелки вакуумметра на последнем делении шкалы включить ионизационный преобразователь измерения давления ПМИ-2 в режим прогрева.
 15. После 15-минутного прогрева произвести измерение давления в вакуумируемом объеме. Оно должно быть не хуже $p_v \sim 10^{-4}$ мм рт. ст.
- II. Проведение процесса:
1. Включить тумблер «Сеть» задающего генератора и нажать кнопку «Накал» (рис. 6).
 2. После 15-минутного прогрева ВЧ-источник энергии будет готов к работе.
 3. С помощью натекателя 12 (рис. 5) установить необходимое давление рабочего газа, контролируя его величину по ионизационному датчику.
 4. Включить ионизационный датчик давления.
 5. Нажать кнопку «Анод» (рис. 6) и регулятором анодного напряжения установить его требуемую величину.
 6. Элементами блока согласования установить максимальную величину высокочастотного напряжения на потенциальном электроде РРК, контролируя его величину по индикатору ВЧ-напряжения.
 7. В случае использования ВЧ-напряжения в качестве контрольной величины установить его исходное значение регулятором анодного напряжения и регулировочными элементами блока согласования в режиме оптимального согласования с нагрузкой.
 8. Включить секундомер и проконтролировать необходимое время процесса.

Замечание: при проведении процесса выключение вакуумметров обязательно!

III. Завершение процесса:

1. Регулятором анодного напряжения установить на 0 значение анодного напряжения (рис. 6).
2. Нажать кнопку выключения анодного напряжения.
3. Выключить тумблер «Работа» задающего генератора.
4. Перекрыть натекатель.
5. Закрыть краны 6, 9 вакуумной системы.
6. Выключить форвакуумный насос тумблером, указанным на рис. 7, одновременно открывая кран 10 (рис. 5).
7. Плавно открыть кран 8 (рис. 5) для разгерметизации РРК.
8. После разгерметизации РРК закрыть краны 8, 10 (рис. 5) и включить форвакуумный насос тумблером (рис. 7).
9. Открыть кран 9 (рис. 5).
10. Извлечь обработанный образец из РРК.

IV. Повторное проведение процесса (после выполнения условий пункта III):

1. Разместить обрабатываемый образец на рабочем столе РРК.
2. Закрыть кран 9 и открыть кран 8 (рис. 5).
3. После достижения необходимого уровня разрежения (не хуже $7 \div 9 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) в РРК открыть кран 9 и затем кран 6.
4. Выполнить условия пп. II.1÷II.8, при этом предварительный прогрев узлов ВЧ-генератора (п. II.2) необязателен.
5. После завершения процесса выполнить все условия п. III.

V. Полное выключение установки:

1. Выполнить все условия п. III.
2. Выключить нагрев диффузионного насоса тумблером, указанным на рис. 7.
3. После 30-минутного остывания диффузионного насоса проверить в нем остаточное давление, оно должно быть не менее $5 \cdot 10^{-2}$ мм. рт. ст.
4. Закрыть кран 9 (рис. 5).
5. Выключить форвакуумный насос тумблером (рис. 7), одновременно открывая кран 10 (рис. 5).
6. Перекрыть кран поступления воды в систему охлаждения диффузионного насоса.

VI. Обработка и оформление полученных результатов:

1. Полученные экспериментальные результаты представить в виде таблицы, рассчитать скорости травления материала и коэффициент анизотропии (при осуществлении размерного травления), оценить показатель селективности (в случае травления с использованием осажденных на поверхности масок из фоторезиста или диоксида кремния).
2. Сделать обоснованные выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение плазмы. Какую плазму можно назвать неравновесной?
2. Какие виды неупругих столкновений в плазме вы знаете?
3. В чем заключаются основные преимущества реактивного ионно-плазменного травления?
4. Как можно добиться повышения степени анизотропии процесса РИПТ?
5. Сравните способы плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления. В чем сходство и отличие?
6. В чем основные преимущества магнетронной и триодной системы РИПТ?
7. Как зависит анизотропия в РИПТ от мощности и давления?

Литература

1. Ефремов А.М. Вакуумно-плазменные процессы и технологии : учебное пособие / А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин. – Иваново : Изд-во Иван. гос. хим.-технол. ун-та, 2006. – 260 с.
2. Плазменная технология в производстве СБИС / под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. – М. : Мир, 1983. – 469 с.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б.С. Данилин, В.Ю.Киреев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
4. Протасова Ю.С. Основы плазменной электроники / Ю.С. Протасова, С.Н. Чувашев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 632 с.

Учебное издание

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Часть 3

Кинетика процессов реактивного ионно-плазменного
травления полупроводников в галогенсодержащей плазме

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:

Владимирова Людмила Николаевна,
Дикарев Юрий Иванович,
Рубинштейн Владимир Михайлович,
Петраков Владимир Иванович

Корректор В.П. Бахметьев

Компьютерная верстка Е.Н. Комарчук

Подписано в печать 17.06.2014. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,2. Тираж 50 экз. Заказ 421

Издательский дом ВГУ.
394000, г. Воронеж, пл. Ленина, 10

Отпечатано в типографии Издательского дома ВГУ.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3