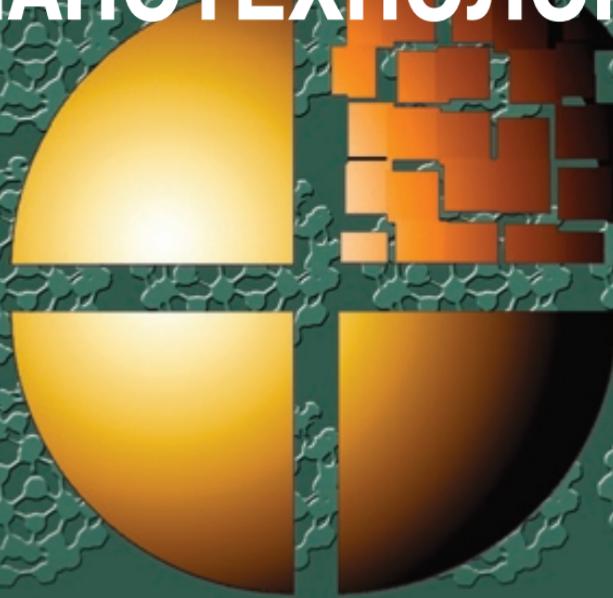


● ● ● НАНОТЕХНОЛОГИИ ● ● ●

В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов

ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО
Бином

● ● ● НАНОТЕХНОЛОГИИ ● ● ●

В. А. Галперин,
Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов

**ПРОЦЕССЫ
ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ
В МИКРО-
И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ**

Учебное пособие

Под редакцией
д.т.н., проф. С. П. Тимошенкова

Допущено

Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации
по образованию в области радиоэлектроники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 210100
«Электроника и микроэлектроника»

3-е издание (электронное)



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2013

УДК 621.38+533.9
ББК 34.55+34.96+32.844.1+30.61+22.333я73
Г15

Серия основана в 2006 г.

Галперин В. А.

Г15 Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов ; под ред. С. П. Тимошенкова. — 3-е изд. (эл.) — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 283 с. : ил. — (Нанотехнологии).

ISBN 978-5-9963-2129-2

В свете современного развития нанотехнологии и микромеханики рассмотрены процессы и системы вакуумно-плазменного травления, находящие широкое применение в производстве современных ультрабольших интегральных схем, изделий микроэлектромеханических систем и наносистем. Проанализированы способы обеспечения вакуумно-технических требований к проведению этих процессов, приведены методы контроля и диагностики, позволяющие достаточно глубоко понять характер протекающих процессов с целью соответствующей оптимизации технологии и оборудования.

Для студентов вузов, изучающих процессы микро- и наноэлектроники, а также аспирантов, инженеров и научных работников, занимающихся вопросами технологии интегральных схем и микромеханики.

УДК 621.38+533.9
ББК 34.55+34.96+32.844.1+30.61+22.333я73

По вопросам приобретения обращаться:
«БИНОМ. Лаборатория знаний»
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-9963-2129-2

© МИЭТ, 2013

© БИНОМ. Лаборатория знаний,
2013

Предисловие редактора

Микро- и нанотехнологиям изготовления полупроводниковых интегральных схем посвящено огромное количество публикаций в зарубежных и отечественных периодических изданиях. Однако в последнее время остро чувствуется потребность в современных учебных изданиях, предназначенных для изучения процессов вакуумно-плазменного травления, которые применяются при изготовлении интегральных схем и микроэлектромеханических систем, ведь большая часть таких учебников датирована 1980–1990 годами, а кроме того, в них не затронута проблема аспектно-независимого травления кремния, необходимого в технологии микроэлектромеханических систем и отдельных направлениях наноэлектроники. Поэтому данный учебник выходит в свет весьма вовремя. Он восполняет отсутствие современных книг по вопросам, касающимся особенностей формирования профилей травления кремния с учетом организации потоков активных частиц в современных реакторах вакуумно-плазменного травления и возможностей математического моделирования, и освещает новые области применения плазменных технологий в микромеханике и других смежных областях.

Учебное пособие имеет ярко выраженную прикладную направленность и охватывает широкий круг практически значимых вопросов, касающихся проблем аспектной зависимости вакуумно-плазменного травления кремния и эффектов микрозагрузки и микромаскирования, особенно при переходе к субмикронным и наноразмерам. В нем приведено описание большинства методов контроля технологических параметров вакуумно-плазменного травления и диагностики плазмы — основных компонентов успешной разработки и управления технологическим процессом. При этом авторами детально рассмотрены физико-химические основы процессов вакуумно-плазменного травления с определением критичных стадий, влияющих на технологические характеристики.

Научный уровень рукописи соответствует задаче подготовки учебного пособия, предназначенного в большей степени для студентов инженерных специальностей, освоения магистерских и аспирантских образовательных программ. Актуальность и практическая значимость освещаемых вопросов не вызывает никаких сомнений, так как формирование в кремнии рельефных структур субмикронного уровня является одним из главных научно-ёмких и высокотехнологичных направлений современной микро- и наноэлектроники.

д.т.н. проф. Тимошенков С.П.

Введение

Начиная с конца 70-х гг. XX в., плазмохимическое и реактивно-ионное травление получили широкое распространение в технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) и ультрабольших интегральных схем (УБИС). По мере того как размеры приборов в интегральных схемах (ИС) продолжают уменьшаться и наступает эра технологии ультрасверхбольших интегральных схем (УСБИС), плазменное травление используется все чаще и чаще. Это связано, в первую очередь, с тем, что данный способ переноса изображения характеризуется высокой анизотропией и осуществляется при относительно низких температурах, вследствие чего повышается качество выпускаемых ИС. В настоящее время — эпоху быстрого развития нанотехнологий — плазмохимическое травление (ПХТ) остается практически единственным инструментом для перенесения рисунка ИС в маскирующем слое в материал подложки. Однако требования к количеству вносимых плазмой дефектов, селективности, управлению шириной линии и однородности травления становятся все более строгими и более сложными для их реализации.

В условиях бурного прогресса технологий микроминиатюризации уже недостаточно оперировать традиционными макропараметрами ПХТ, такими как средняя скорость, анизотропия и равномерность травления по пластине. Важную роль начинают играть форма профиля, аспектное отношение, соотношения концентраций ионов и радикалов. Сильное влияние на процесс травления оказывают и привносимые плазмой дефекты.

С целью подробного изучения и дальнейшей оптимизации параметров технологических процессов, в течение последних 20-ти лет большое внимание уделяется развитию моделирования этих процессов, что позволяет разрабатывать новые методы изготовления нанометровых структур. В пособии методам моделирования технологических процессов сухого травления уделено должное внимание.

Данное пособие посвящено также изучению методов и систем вакуумно-плазменного травления (ВПТ), которые находят широкое применение в производстве современных УБИС, изделий МЭМС (микроэлектромеханических систем) и наносистем. Основное направление развития ВПТ в современной микроэлектронике связано с разработкой и применением процессов ускоренного травления кремниевых структур.

В настоящее время для формирования в кремнии канавок используется несколько технологических процессов:

- непрерывный (с единым вакуумным циклом);
- с переменной модуляцией газа (Bosch- или TMGM-процесс);
- криопроцесс.

Для лучшего понимания особенностей процессов реактивно-ионного травления и возможных путей их применения в пособии рассмотрены вопросы физики формирования плазмы и поведения составляющих ее частиц, механизмы протекания физико-химических процессов в плазме, методы проведения процессов, виды оборудования ВПТ, а также тенденции его развития и применения в производстве современных УБИС, МЭМС и наносистем. Проанализированы способы обеспечения вакуумно-технических требований к проведению этих процессов, рассмотрены методы контроля и диагностики, позволяющие достаточно глубоко понять характер протекающих процессов с целью соответствующей оптимизации технологии и оборудования.

Большую роль в изучении механизмов процессов ПХТ сыграли многие российские ученые (Словецкий Д.И., Киреев В.Ю., Шелыхманов Е.Ф., Валиев К.А., Орликовский А.А. и др.) и ученые западных школ (Флэмм Д., Кобэрн Дж., Винтер Х., Донели В., Хейнике Р., Болингер Д. и др.).

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры материалов и процессов твердотельной электроники Московского государственного института электронной техники (МИЭТ) Мочалову З.А. и Ермакову И.О., а также сотруднице ОАО «Ангстрем» Баженовой Е.И. за помощь в оформлении настоящего учебного пособия и выражают надежду на то, что изложенный материал вызовет живой интерес научных работников и инженеров, а также будет полезен для аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

Глава 1

Физико-химические основы процессов сухого (вакуумно-плазменного) травления

Травление — это процесс удаления вещества с поверхности твердых тел. Удаление может быть осуществлено в результате химического взаимодействия жидкого или газообразного травителя с поверхностью твердого тела, например полупроводниковой пластины (подложки) при изготовлении микросхем. В общем случае травителем (активной средой) может быть жидкость, парогазовая смесь или плазма тлеющего разряда. Травитель является источником частиц, которые удаляют материал с поверхности и определяют характер травления. Типы процессов травления представлены на рис. 1.1.

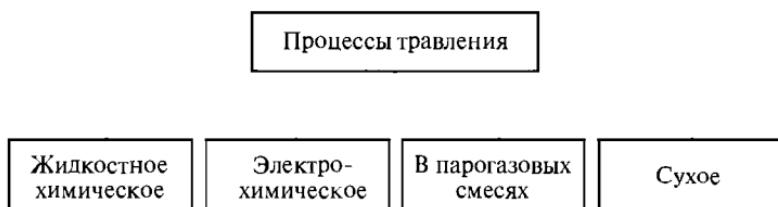


Рис. 1.1. Обобщенная классификация процессов травления

В 1976 г. была найдена возможность травления без жидкого травителя — с использованием газоразрядной плазмы и фторуглеродных газов, и бурное развитие получают методы сухого травления. Дело в том, что за период с 1970 по 1984 гг. требуемая минимальная ширина создаваемых на подложке линий уменьшилась с 6 до 2 мкм, а уход (неконтролируемое отклонение) размеров линии при жидкостном способе травления может достигать 1–2 мкм. Такое несоответствие с одной стороны и развитие методов плазменного травления, а также принятие законов, ужесточающих требования к обезвреживанию жидких ядовитых травителей, с другой стороны, предопределили переход от жидкостного травления к сухому травлению. Вслед за раз-

работкой технологии изотропного травления в баррельном реакторе был предложен метод, в котором применялся напуск тетрахлорметана в ионный источник, что подготовило почву для развития технологии анизотропного реактивно-ионного травления.

В настоящее время сухое травление с применением плазмы низкого давления широко используется для переноса изображения с микронными и субмикронными топологическими размерами элементов при изготовлении современных сверхбольших интегральных схем (СБИС) и ультрабольших интегральных схем (УБИС). Плазменное либо вакуумно-плазменное травление (ВПТ) повсеместно заменило жидкостное вследствие более высокой разрешающей способности (минимальной ширины линий, минимальным размерам вскрываемых отверстий), возможности автоматизации, кластеризации и некоторых других преимуществ.

Важно, что плазменное травление обладает высокой анизотропией и происходит при достаточно низких температурах, так как это благотворно сказывается на качестве выпускаемых интегральных схем (ИС). В настоящее время с развитием нанотехнологий плазмохимическое травление остается практически единственным инструментом для переноса рисунка ИС в маскирующем слое в материал подложки. Однако требования к плазменной технологии: допустимые дефекты, селективность (избирательность к материалу), управление шириной линии, однородность травления — становятся все более жесткими и, как следствие, более сложными в реализации. В частности, при размерах травящихся структур менее 1 мкм и больших аспектных отношениях (отношение глубина/ширина более 10 : 1) возникает целый ряд проблем. Основными из них являются зависимость скорости и профилей травления от размеров элементов.

Плазмохимическое (ПХТ) и реактивное ионное травление (РИТ) получили широкое распространение в производстве СБИС. По мере того, как размеры приборов в ИС продолжают уменьшаться и технология входит в эру ультрабольших интегральных схем, плазменное травление используется все чаще и чаще. Если еще в 2006 г. (по итогам Intel Developer Forum 2006) ведущие компании мира выпускали изделия с топологическими размерами 65 нм и проводили исследования по разработке технологии изготовления пластин диаметром 450 мм, то уже в

Травление с использованием низкотемпературной газоразрядной плазмы

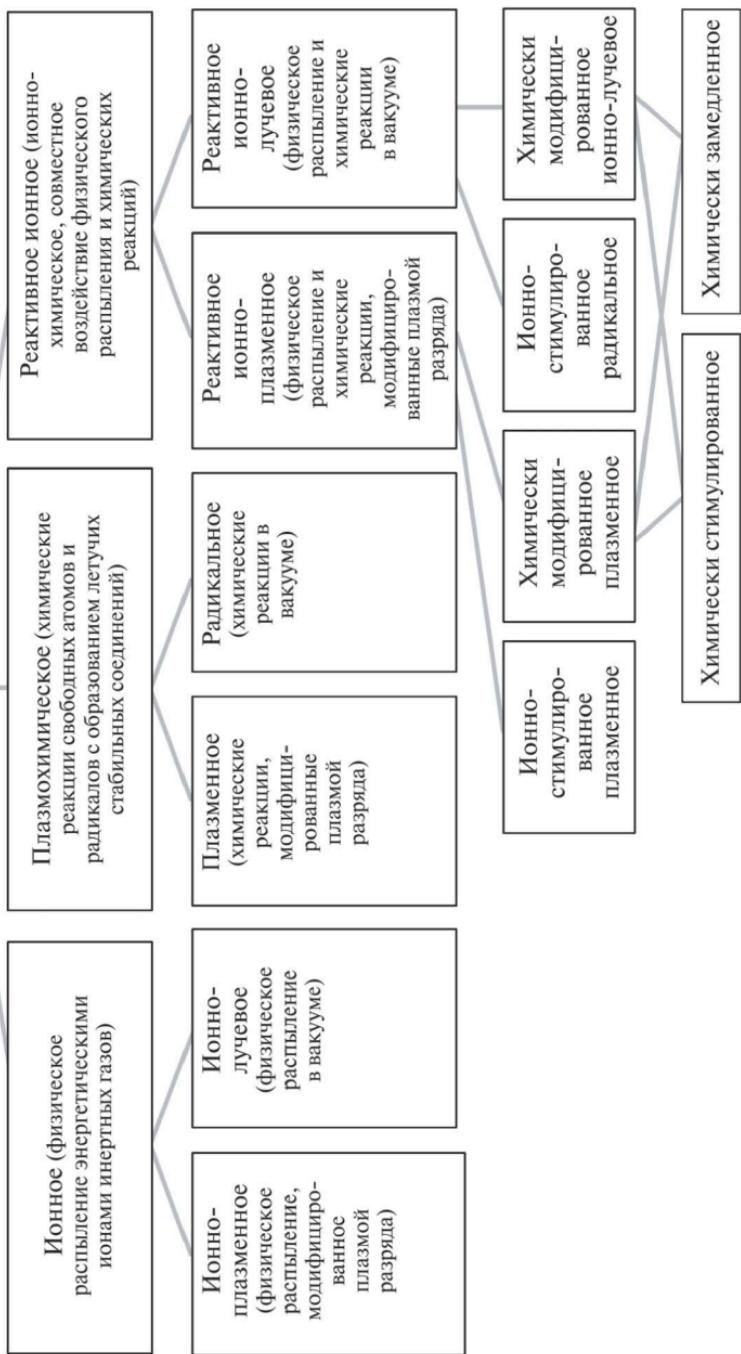


Рис. 1.2. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления [3]

2009 г. Интел запускает массовое производство изделий в 32 нм технологии с использованием иммерсионной литографии DUV при длине волны 193 нм и уже разрабатывает 22 нм технологию производства в 2011 г. на основе той же литографии. В этих условиях недостаточно оперировать традиционными макропараметрами ПХТ, такими как средняя скорость травления, анизотропия, равномерность по пластине. Важную роль начинают играть форма профиля, радиус закругления дна канавки, количество дефектов, вносимых в процессе травления, зависимость скорости травления от размера элемента и состава плазмы.

В процессах ВПТ осуществляется эффективная генерация энергетических и химически активных частиц, которые взаимодействуют с различными материалами. По механизму физико-химического взаимодействия с поверхностью обрабатываемого материала различают три основных вида ВПТ (рис. 1.2).

С точки зрения удовлетворения требований к процессам передачи изображения, ионное травление, осуществляющееся физическим распылением материалов энергетическими частицами, не является перспективным из-за низкой избирательности к материалу травления (низкой селективности), эффектов переосаждения и вытравливания бороздок вдоль края маски [4]. Однако следует отметить, что наивысшая разрешающая способность при травлении тонких металлических слоев (менее 100 нм) была получена именно методом ионно-лучевого травления (ИЛТ) в аргоне (Ar^+). Процессы ионного травления отличаются высокой точностью передачи изображения, но низкой производительностью.

В процессах ПХТ поверхностные слои материалов удаляются в основном в результате химических реакций между химически активными частицами (ХАЧ) плазмы (свободные атомы, возбужденные молекулы, радикалы и, частично, низкоэнергетичные ионы с энергией в диапазоне 20–70 эВ) и поверхностными атомами материалов [4, 5]. Если поверхность материала находится вне области газового разряда, где на нее практически не воздействуют электронная и ионная компоненты и, в слабой степени, фотонная компонента плазмы, травление называется радикальным, так как основными травящими частицами в данном случае являются атомы и радикалы. Характерно, что для всех процессов ПХТ проявляется ярко выраженный изотропный профиль травления при высокой избирательности травления одних материалов по отношению к другим (селективность) и низком уровне радиационных нарушений (дефектов).

Минимальный размер элементов топологии (разрешающая способность), достижимый при изотропном травлении, ограничен толщиной пленки, лежащей под маской, а также отношением глубины вскрываемого окна к его ширине. Следовательно, для прецизионного переноса изображения в первую очередь необходимо травление с явно выраженной вертикальной направленностью, называемое анизотропным травлением. Анизотропность свойственна ионным способам травления, где есть направленное движение ионов в электрическом поле. Как видно из рис. 1.2, ионно-химическое травление отличается от ПХТ совместным воздействием физического распыления энергетическими частицами поверхностных слоев и химических реакций между ХАЧ и поверхностными атомами материала. Если поверхность материала находится в области газового разряда, то осуществляется процесс реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ). В газовом разряде вблизи электродов формируется электрическое поле, которое обеспечивает направленное движение молекулярных либо атомарных ионов, в результате чего ХАЧ взаимодействует с поверхностью материалов вследствие ударной диссоциации молекулярных ионов и нейтрализации атомарных ионов [2–5]. Увеличение ионной составляющей при сохранении или уменьшении газового потока в некоторых системах РИТ обеспечивается введением магнитного поля в область разряда, повышающего вероятность ионизации за счет увеличения энергии электронного удара. Данная система травления получила название РИТ магнетронного типа (РИТ МТ). Повышение плотности ионной составляющей за счет увеличения концентрации электронов в разряде до величины 10^{11} – 10^{13} см $^{-3}$ достигается при использовании СВЧ-разрядов различных типов, источников плазмы индукционного типа (варианты названия — TCP и ICP) и ионных источников, применяющихся в реактивном ионно-лучевом травлении (РИЛТ) [2–5]. Для последних систем характерно разделение зоны основного разряда высокой плотности и зоны обработки, что также повышает прецизионность процессов.

1.1. Плазма: определения, способы получения, основные процессы

Известно, что вещество может находиться в трехфазовых состояниях — твердом, жидким и газообразном, причем эти состояния последовательно сменяют друг друга по мере возрастания температуры. При дальнейшем нагреве молекулы газа распадаются на

атомы, которые в свою очередь распадаются на электроны и ионы, так что газ становится ионизированным, представляя собой смесь из свободных электронов, ионов и нейтральных частиц. Если степень ионизации газа, под которой принято понимать отношение числа ионизованных атомов к их полному числу, достаточно велика, такой сильно ионизированный газ может обладать качественно новыми свойствами по сравнению с обычным газом. Прежде всего он обладает высокой электропроводностью и поэтому, в противоположность нейтральному газу, сильно взаимодействует с электрическим и магнитным полями. Кроме того, заряженные частицы в газе стремятся распределиться таким образом, чтобы установилась локальная квазинейтральность (равенство концентраций положительных и отрицательных частиц), нарушаемая тепловыми флюктуациями только в микроскопических масштабах. Такое состояние ионизованного газа называется **плазмой** и считается четвертым фазовым состоянием вещества.

Под термином «газовый разряд» обычно понимают все явления и процессы, связанные с протеканием электрического тока через газ. Само название «разряд» происходит от названия процесса медленной потери заряда заряженным металлическим телом, расположенным на подставке из изолятора. Это явление известно еще с XVI в.

В конце XVIII в. Ш. Кулон экспериментально доказал, что разряд стекает с проводника через воздух, а не через подставку из изолятора, то есть, пользуясь современной терминологией, имеет место газовый разряд. Разряд при низком давлении воздуха (порядка 1 мбар) был открыт и исследован М. Фарадеем. Этот разряд был назван **тлеющим**. В конце XIX в. исследование проводимости разреженных газов привело Дж. Томсона к открытию первой элементарной частицы — электрона. Дальнейшие исследования физики газового разряда во многом послужили экспериментальной основой развития атомной и квантовой физики. Основателем физики собственно газового разряда считается Таунсенд, ученик Томсона. В начале XX в. он создал теорию пробоя газа и установил закономерности ионизации. Следующий принципиальный вклад в физику газового разряда был внесен И. Ленгмюром, который, исследуя газовый разряд низкого давления вместе с Л. Тонксом в 1923 г., ввел новое фундаментальное понятие физики — «плазма» (от греч. πλασμα — вылепленное, оформленное), а также развил методы исследования плазмы, в частности метод зондов.

В современной физике термин «газовый разряд» трактуется не только как протекание тока через газ, но и как любой процесс ионизации газа под действием приложенного электрического поля. При этом поле может быть как постоянным во времени, так и быстропеременным: высокочастотным (ВЧ-разряд при частотах в несколько мегагерц), сверхвысокочастотным (СВЧ-разряд при частотах в несколько гигагерц) и даже с частотой оптического диапазона (оптический разряд). Не так давно был открыт пучково-плазменный разряд (ППР), загоравшийся при прохождении электронного пучка через газ малой плотности вследствие возникновения в такой системе плазменных колебаний СВЧ-диапазона. Термины «гореть», «зажигание» получили распространение потому, что при возникновении достаточно сильной ионизации газ светится.

При нормальных условиях газы состоят в основном только из электрически нейтральных атомов и молекул и, по сути, являются диэлектриками, то есть изоляторами — заметный электрический ток через них проходить не может. Проводниками могут быть только газы, ионизованные хотя бы в какой-то мере, — газы, содержащие свободные заряды — носители тока (положительные и отрицательные ионы и электроны). Ионы в газах могут возникать в результате действия различных ионизаторов, например, ультрафиолетового излучения, рентгеновских лучей, косического излучения, лучей радиоактивных загрязнений, а также столкновений атомов газа с электронами и другими частицами, энергия которых превышает потенциал ионизации атомов газа.

Определяющим свойством плазмы является ее *квазинейтральность*. Это означает, что во всяком сколько-нибудь большом объеме заряды ионов и электронов всегда компенсируют или почти компенсируют друг друга. Если это условие нарушается, то возникает сильное электрическое поле, которое перемещает электроны и ионы и восстанавливает нейтральность плазмы.

Первое описание плазмы И. Ленгмюр дал в 1923 г., исследуя электрический разряд в газе низкого давления (тлеющий разряд). Он назвал плазмой «ярко светящийся газ, состоящий из электронов, ионов разных сортов и нейтральных атомов и молекул». Им же были введены и основные параметры, характеризующие плазму: плотности ее частиц — электронов (n_e), ионов (n_i), нейтральных частиц (n_0) — и их температуры, соответственно, T_e , T_i , T_0 .

Непрерывно происходящая рекомбинация электронов и ионов, то есть переход атомов в нейтральное состояние, сопровождаемый излучением энергии в видимой области спектра (свечение плазмы), ведет к уменьшению концентрации ионов и свободных электронов. Чтобы состояние плазмы было стационарным (принимается при описании физико-химических основ плазменных процессов), требуется достижение динамического равновесия процессов рекомбинации и генерации новых ионов и свободных электронов. Для появления новых ионов и электронов необходим непрерывно действующий источник ионизации. Им может быть электрический разряд в газе (газоразрядная плазма), происходящий в постоянном электрическом поле (обычный газовый разряд, электрическая дуга и т. д.) или в высокочастотном поле, образуемых, например, с помощью индукционных катушек или электродов, запитанных током высокой частоты. Плазма может образовываться и при термической ионизации газа, если газовая среда поддерживается при достаточно высокой температуре (например, вещество звезд, пламя газовой горелки). Плазма образуется в фокальной области мощных лазерных установок и при многих других условиях.

Степень ионизации плазмы обычно невелика. В тлеющем газовом разряде (в люминесцентных лампах) плотность электронов составляет примерно $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, а плотность нейтральных молекул — $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Лишь внутри звезд и в специальных установках, используемых для исследования проблем управляемого термоядерного синтеза, относительное число атомов, находящихся в ионизированном состоянии, приближается к единице (полностью ионизованная плазма). Мощность, необходимая для работы таких установок, измеряется мегаваттами.

Температура плазмы, как правило, измеряется не в градусах, а в электронвольтах ($1 \text{ эВ} \approx 11600 \text{ К}$). Расчеты плазменных явлений обычно ведутся в системе единиц СГС, широко использующейся до принятия международной системы единиц (СИ). Стационарное (не меняющееся со временем) состояние плазмы может быть равновесным или неравновесным. В первом случае компоненты плазмы (электроны и ионы) имеют одну и ту же температуру, а во втором — разную. При достаточно больших давлениях (звезды, пламя газовой горелки) между компонентами плазмы может успевать устанавливаться тепловое равновесие. Если давления небольшие ($\lambda \geq d$, где λ — длина свободного пробега, а d — характерный размер занятой плазмой области),

тепловое равновесие устанавливаться не успевает. Так, в тлеющем газовом разряде мы обычно имеем дело с «горячими» электронами и «холодными» ионами. Электроны быстро ускоряются электрическим полем и почти не теряют энергии при соударении с тяжелыми ионами и атомами газа, а также при столкновении со стенками газоразрядной трубки. Наоборот, ионы быстро отдают полученную от поля энергию нейтральным атомам газа и атомам стенок, поскольку массы их близки. В результате реализуются условия, при которых электроны характеризуются более высокой температурой, а ионы — более низкой.

Как уже говорилось, при нарушении нейтральности в плазме возникают сильные локальные электрические поля. Оценим размер области, внутри которой могут существовать заметные электрические поля. Рассмотрим пространство вокруг иона, имеющего положительный заряд и поэтому притягивающего отрицательно заряженные электроны. Ион «экранируется» электронами, так что его поле убывает с увеличением расстояния r не по закону $1/r^2$, а существенно сильнее. Если бы не тепловое движение электронов, они так «облепили» бы ион, что его поле было бы полностью скомпенсировано (точнее, произошла бы рекомбинация). Тепловое движение мешает такой компенсации. Рассчитаем этот эффект.

Как известно, электрическое поле напряженностью E и плотность электрического заряда ρ в однородной среде связаны между собой соотношением:

$$\operatorname{div} E = 4\pi\rho. \quad (1.1)$$

Переходя от напряженности поля E к электрическому потенциалу ϕ с помощью обычного соотношения:

$$E = -\operatorname{grad} \phi, \quad (1.2)$$

найдем:

$$\Delta\phi = -4\pi\rho, \quad (1.3)$$

где Δ — оператор Лапласа. Поле заряда сферически симметрично, поэтому в сферической системе координат оно зависит только от радиуса r . Оператор Лапласа в этом случае принимает простую форму:

$$\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr},$$

следовательно,

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\phi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1.4)$$

В силу большой инерционности ионов по сравнению с электронами ($M > m_e$), будем считать ионы бесконечно тяжелыми, то есть неподвижными.

Распределение электронов, а значит, и их пространственно-го заряда ρ_e , подчиняется формуле Больцмана:

$$\rho_e = -ne\exp(e\phi/kT_e), \quad (1.5)$$

где n — плотность электронов; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T_e — температура электронов.

Для ионов:

$$\rho_i = ne \quad (1.6)$$

(плазма вдали от источника кулоновского поля квазинейтральна). Подставляя (1.5) и (1.6) в (1.4), найдем

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\phi}{dr} = -4\pi ne \left[1 - \exp\left(\frac{e\phi}{kT_e}\right) \right]. \quad (1.7)$$

Это уравнение является нелинейным и в аналитическом виде не решается. Решение может быть найдено, если

$$\frac{e\phi}{kT_e} \ll 1.$$

В этом случае экспоненту можно разложить в ряд и уравнение (1.7) становится линейным:

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\phi}{dr} = \frac{1}{r_D^2} \phi, \quad (1.8)$$

где

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}} = 743 \sqrt{\frac{T_e (\text{эВ})}{n (\text{см}^{-3})}} \text{ (см)}. \quad (1.9)$$

Путем подстановки нетрудно убедиться, что решение уравнения (1.8) имеет вид:

$$\phi = \frac{Ze}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right), \quad (1.10)$$

где Z — заряд ионов.

Это решение дает правильный результат при малом расстоянии от иона ($\varphi \approx Ze/r$) и обращается в нуль на бесконечности. Таким образом из-за экранирующего действия электронов поле иона экспоненциально убывает с расстоянием, завися от *дебаевского радиуса экранирования* r_D (радиус Дебая, дебаевская длина). Дебай ввел это понятие, рассматривая поле иона в жидким электролите.

Плазму можно считать почти нейтральной (квазинейтральной) в областях, размеры которых существенно превосходят дебаевскую длину. При $T = 10^4$ К (≈ 1 эВ) и $n = 10^9$ см $^{-3}$ $r_D \approx 1,6 \cdot 10^{-2}$ см.

Теперь можно дать количественное определение понятию «плазма».

Плазмой называется ионизованный газ, дебаевский радиус которого существенно меньше характерного размера l объема, занимаемого этим газом, то есть

$$r_D \ll l.$$

Еще одним важным параметром плазмы является *среднее число заряженных частиц в дебаевской сфере* (сфера с радиусом, равным r_D). Примененный при выводе дебаевского радиуса статистический подход (распределение Больцмана) предполагает, что частиц должно быть много. Число частиц N_D в дебаевской сфере можно оценить с помощью формулы (1.10), подставляя в нее вместо истинного среднее число частиц (эти величины мало отличаются):

$$N_D \approx n \frac{4}{3} \pi r_D^3 \approx 0,1 \frac{(kT_e)^{3/2}}{n^{1/2} e^3}. \quad (1.11)$$

Для плазмы газового разряда это число оказывается порядка 10^4 , то есть очень велико. Заметим, что требование того, чтобы число частиц в дебаевской сфере было велико по сравнению с единицей, эквивалентно условию, при котором потенциальная энергия взаимодействия двух заряженных частиц в плазме существенно меньше их тепловой энергии, то есть условию того, что плазма является газом, причем идеальным.

Другой важнейшей характеристикой плазмы является *плазменная* (или *ленгмюровская*) *частота*, выражение для которой и ее смысл можно получить из следующих соображений. Выделим в плазме объем в виде параллелепипеда, изображенного на рис. 1.3. Сместим все электроны на расстояние x относительно

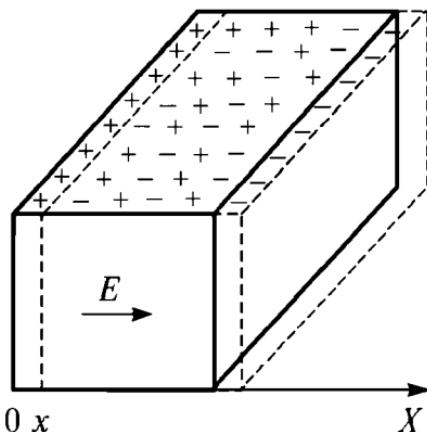


Рис. 1.3. К расчету плазменной (ленгмюровской) частоты колективных колебаний электронов

ионов. Пусть плотность электронов (и ионов) равна n , ионы для простоты будем считать однозарядными. Легко видеть, что в результате такого смещения на гранях параллелепипеда возникнут поверхностные заряды:

$$\sigma = n e x. \quad (1.12)$$

Вследствие этого появится электрическое поле напряженностью:

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi n e x. \quad (1.13)$$

Это поле действует на электроны, придавая им ускорение, равное

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi n e^2}{m} x. \quad (1.14)$$

Плазменная (ленгмюровская) частота колективных колебаний электронов будет определяться как

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}} = 5,65 \cdot 10^4 \sqrt{n}. \quad (1.15)$$

Плазменная частота задает естественный масштаб времени для плазмы. Это — время отклика на флуктуацию плотности заряда в плазме. Учитывая это, дебаевский радиус экранирования можно интерпретировать следующим образом. Пусть какая-то группа электронов получила одностороннюю скорость, рав-

ную тепловую: $v = \sqrt{kT_e/m_e}$. При этом, как легко можно убедиться, обращаясь к формулам (1.10), (1.15), за время, равное ω_p^{-1} , эта группа электронов пройдет в направлении полученной скорости до полной остановки расстояние, как раз равное дебаевскому радиусу, то есть

$$r_D = \frac{v}{\omega_p}. \quad (1.16)$$

Таким образом, дебаевский радиус равен амплитуде ленгмюровских колебаний плазмы, возбуждаемых тепловыми флюктуациями. Эта амплитуда и является масштабом нарушения квазинейтральности плазмы в отсутствие внешнего поля.

Как следует из (1.15), плазменная частота определяется только плотностью электронов и универсальными постоянными. Можно строго доказать, что она не зависит от величины и формы рассматриваемого объема и является, таким образом, локальной характеристикой плазмы. Плазменная частота является не единственной, но важнейшей характерной частотой плазмы. Она определяет коллективное движение электронов относительно ионов.

Отметим, однако, что формула для дебаевского радиуса (1.9) не учитывает движение ионов. Если считать, что ионы тоже подчиняются в поле заряда Больцмановскому распределению с температурой T_i , то в приближении $e\varphi \leq kT_i$ вместо формулы (1.9) получим

$$r_D = \sqrt{\frac{k}{4\pi n e^2} \frac{T_e T_i}{T_e + T_i}}, \quad (1.17)$$

где в выражение для дебаевского радиуса вместо T_e войдет приведенная температура. В частности, при $T_e = T_i$ в знаменателе под корнем появляется двойка, а при $T_e \gg T_i$, что имеет место для плазмы газового разряда (тлеющего), в формуле (1.9) вместо T_e будет стоять T_i .

Переход газа в состояние плазмы связан с различными процессами взаимодействия между частицами: между заряженными частицами действуют электростатические и электромагнитные силы, между заряженными и нейтральными частицами — силы квантовомеханической природы. Все процессы в плазме происходят при столкновении частиц между собой или при взаимодействии их с излучением. Наиболее важным является процесс ионизации, то есть отрыв электрона от атома или молекулы газа,

так как без него нельзя получить плазму. В число важнейших процессов также необходимо включить различные процессы диссоциации, выраженные в распаде молекул на составляющие компоненты. В табл. 1.1 представлены основные элементарные процессы, ответственные за образование различных частиц в плазме. Поскольку энергия электронов значительно превышает энергию тяжелых частиц, скорости процессов диссоциации и ионизации, имеющих большие пороговые энергии, определяются, главным образом, электронным ударом. Превращение молекул рабочего газа в активную частицу, помимо диссоциации электронным ударом и прилипания к ним низкоэнергетических электронов, происходит также в результате «тушения» этими молекулами возбужденных электронных состояний атомов инертных или химически нейтральных газов.

В неизотермической низкотемпературной газоразрядной плазме низкого давления происходит возбуждение и ионизация молекул рабочего газа, а также их диссоциация на свободные атомы и радикалы. Общее число частиц в единице объема плазмы определяется следующим образом:

$$N = n_0 + n_i + n_e = n_{00} + n_e, \quad (1.18)$$

где n_0 — концентрация нейтральных частиц в плазме; n_i и n_e — концентрация ионов и электронов соответственно; n_{00} — концентрация нейтральных частиц до образования плазмы. В состав нейтральных частиц, свою очередь, входят просто нейтральные молекулы, возбужденные молекулы, свободные атомы и радикалы.

Количественно состояние ионизации характеризуется степенью ионизации:

$$\alpha_i = n_i / n_{00} = n_e / n_{00}. \quad (1.19)$$

В зависимости от степени ионизации различают слабо ионизированную (степень ионизации составляет доли процента), умеренно ионизированную (α_i составляет несколько процентов) и полностью ионизированную (α_i близко к 100%) плазму. Процессы вакуумно-плазменного травления используют в основном умеренно ионизованную плазму, при этом наиболее часто применяются электродные и безэлектродные высокочастотные разряды (ВЧ-плазма). Используются и сверхвысокочастотные (СВЧ), а также тлеющие и дуговые разряды постоянного тока и низкочастотные (НЧ) разряды. Во всех перечисленных случаях для увеличения плотности плазмы, то есть для увеличе-

Таблица 1.1

**Основные процессы,
происходящие в газоразрядной плазме**

Тип реакции	Схема
<i>Реакции под действием электронного удара (e^-)</i>	
Возбуждение	$AB + e^- \rightarrow AB^* + e^-$
Диссоциативное прилипание	$AB + e^- \rightarrow AB^- \rightarrow A^- + B \rightarrow A^- + B^+ + e^-$
Диссоциация	$AB + e^- \rightarrow AB^* + e^- \rightarrow A + B + e^-$
Ионизация	$AB + e^- \rightarrow AB^+ + 2e^-$
Диссоциативная ионизация	$AB + e^- \rightarrow A^+ + B + 2e^-$
<i>Реакции при неупругих столкновениях между тяжелыми частицами</i>	
Диссоциация Пенningа	$M^* + A_2 \rightarrow 2A + M$
Ионизация Пеннига	$M^* + A_2 \rightarrow A_2^+ + M + e^-$
Перезарядка	$M^+ + A_2 \rightarrow A_2^+ + M$ $M^- + A_2 \rightarrow A_2^+ + M$
Ионизация при столкновении	$M + A_2 \rightarrow A_2^+ + M + e^-$
Ион-атомная рекомбинация	$A^- + A \rightarrow A_2 + e^-$
Ион-ионная рекомбинация	$M^- + A_2^+ \rightarrow A_2 + M$ $M^- + A_2^+ \rightarrow 2A + M$
Электрон-ионная рекомбинация	$e^- + A_2^+ \rightarrow 2A$ $e^- + A_2^+ + M \rightarrow A_2 + M$
Атомная рекомбинация	$2A + M \rightarrow A_2 + M$
Атомный перезахват	$A + BC \rightarrow AB + C$
Атомное дополнение	$C + AB + M \rightarrow ABC + M$
<i>Гетерогенные реакции (S – поверхность твердого тела)</i>	
Атомная рекомбинация	$S - A + A \rightarrow S + A_2$ $S - B + A \rightarrow S + AB$
Стабилизация частиц	$S + A^* \rightarrow S + A$ $S + AB^* \rightarrow S + AB$
Распыление	$S - A + M^+ \rightarrow S + A^+ + M$
<i>Реакции под действием излучения плазмы ($h\nu$)</i>	
Диссоциация	$AB + h\nu \rightarrow A + B$
Ионизация	$AB + h\nu \rightarrow A^+ + B^-$
Возбуждение	$AB + h\nu \rightarrow AB^*$

ния количества заряженных частиц (наиболее химически активных), и снижения рабочего давления может применяться магнитное поле либо электроды специальных конструкций, повышающих степень ионизации. Средние энергии электронов в плазме газовых разрядов, используемых для реализации процессов ВПТ, составляют 1–10 эВ, плотности электронов 10^9 – 10^{12} см $^{-3}$, при этом энергии молекул газа находятся в диапазоне 0,05–0,1 эВ, а их концентрации при давлении 0,1–500 Па составляют 10^{13} – 10^{17} см $^{-3}$ [3–5]. Параметры и классификация плазмы приведены на рис. 1.4.

Очевидно, что высокотемпературная плазма не может быть предметом изучения настоящей книги, так как технологии микропроизводства не используют таких температур. В то же время понимание физико-химических механизмов в низкотемпературной газоразрядной плазме чрезвычайно важно для анализа технологичности процессов ВПТ и их дальнейшего развития.

Физико-химические процессы в низкотемпературной газоразрядной плазме. Низкотемпературная газоразрядная плазма (НГП) — это слабоионизованный газ при давлении 10^{-2} – 10^3 Па со степенью ионизации порядка 10^{-6} – 10^{-2} , в котором электроны имеют среднюю энергию 1–10 эВ ($T_e = 10^4$ – 10^5 К), а средняя энергия тяжелых частиц на два порядка меньше. НГП может генерироваться в разрядах, возбуждаемых постоянным электрическим током, током низкой частоты ($1 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^5$ Гц), электромагнитными полями ВЧ (10^6 – 10^8 Гц) и СВЧ (10^9 – 10^{11} Гц). НГП содержит атомы, электроны, ионы, возбужденные атомы, молекулы и радикалы. Свободные атомы и радикалы имеют неспаренный электрон на внешней валентной оболочке и поэтому проявляют высокую химическую активность, из-за чего их часто называют химически активными частицами (ХАЧ). Хотя химическая активность свободных атомов и радикалов в 4–5 раз ниже активности ионов, вследствие их большого количества ХАЧ часто играют определяющую роль в процессах сухого травления. Количественно состояние диссоциации характеризуется степенью диссоциации

$$\alpha_d = n_{\text{ХАЧ}} / n_{00}, \quad (1.20)$$

где $n_{\text{ХАЧ}}$ — концентрация ХАЧ в плазме; n_{00} — концентрация контрольных частиц до образования плазмы.

Низкая степень ионизации простых объектов НГП (по концентрации электронов) $\alpha_e = 10^{-6}$ – 10^{-4} находится в несоответствии с относительно высокой электронной температурой

Плазма

$$\sum Z_i n_i = n_e, \quad l \gg r_D$$

высокотемпературная (горячая),
 $T_e > 10^2 - 10^3 \text{ эВ}$

низкотемпературная (холодная),
 $T_e = 1,0 - 10 \text{ эВ}$

изотермическая, $T_e = T_i = T_\Gamma$

неизотермическая, $T_e \gg T_i, T_\Gamma$

плотная (коллективная,
бесстолкновительная)
 $(Z_i e)^2 / (4\pi \epsilon_0 r_D) \approx kT_e$

разреженная (газовая,
столкновительная)
 $(Z_i e)^2 / (4\pi \epsilon_0 r_D) \ll kT_e$

Положитель-
ный столб
тлеющего
разряда

ВЧ-разряды
в разрежен-
ных газах

СВЧ-разряды
в разрежен-
ных газах

Завершающая
стадия
оптического
пробоя

Рис. 1.4. Классификация плазмы по основным параметрам

Z_u — заряд ионов; n_u, n_e — концентрация ионов и электронов соответственно;
 T_e, T_u, T_Γ — температура электронов, ионов и газа соответственно

(1–10 эВ). Это связано с тем, что процесс рекомбинации при тройном столкновении с участием двух электронов не уравновешивает скорость ионизации электронным ударом. Существует другой, на несколько порядков более быстрый, процесс гибели свободных электронов — диффузия к стенкам с последующей рекомбинацией на ее поверхности, который препятствует нарастанию степени ионизации до равновесного значения. В молекулярных газах гибель электронов может происходить также в результате диссоциативной рекомбинации в парных столкновениях. Иначе обстоит дело со степенью диссоциации (концентрацией ХАЧ) в НГП, которая в равновесии должна соответствовать низкому значению температуры газа T_Γ . Однако из-за присутствия высокоэнергетических по сравнению с частицами газа электронов в стационарном состоянии концентрация ХАЧ

(а также продуктов их реакций) в плазме может существенно отличаться от термодинамически равновесной, в частности — значительно превышать последнюю.

В образовании ионов и ХАЧ в НГП помимо электронов могут принимать участие возбужденные атомы и радикалы, находящиеся в метастабильном состоянии. Они служат передатчиками энергии от электронного газа плазмы к активируемым атомам и молекулам (рис. 1.5). Возбужденные атомы и молекулы выполняют функцию энергетического катализатора, ускоряя передачу энергии от электронного газа к частицам газа и повышая концентрацию ионов, ХАЧ и продуктов травления. Роль энергетического катализатора чаще всего играют возбужденные атомы или молекулы добавок к основному газу, но могут использоваться и возбужденные молекулы основного газа. В общем случае, в плазме молекулярного газа образуются заряженные частицы (электроны, положительные и отрицательные ионы), ХАЧ (свободные атомы и радикалы), возбужденные молекулы,

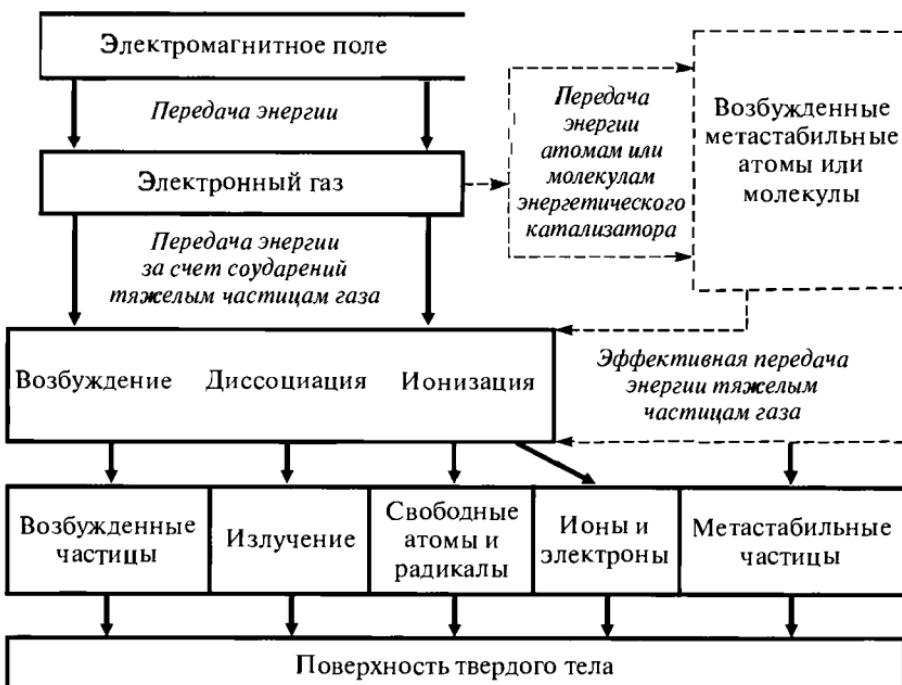


Рис. 1.5. Схема передачи энергии электромагнитного поля в низкотемпературной газоразряженной плазме

в том числе в метастабильном состоянии, а также генерируется излучение в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового.

Обозначим скорости генерации ионов и ХАЧ электронным ударом соответственно $G_{и\ э}$ и $G_{ХАЧ\ э}$, скорости генерации возбужденными молекулами $G_{и\ м}$ и $G_{ХАЧ\ м}$. В то же время рекомбинация заряженных частиц и ХАЧ может происходить как внутри плазмы (гомогенная рекомбинация), так и на поверхности (гетерогенная рекомбинация). Обозначим скорости гомогенной рекомбинации $R_{и\ гом}$ и $R_{ХАЧ\ гом}$, скорости гетерогенной рекомбинации на ограничивающих плазму поверхностях $R_{и\ гет}$ и $R_{ХАЧ\ гет}$, а скорости гетерогенной рекомбинации на обрабатываемых поверхностях $R_{и\ п}$ и $R_{ХАЧ\ п}$. Соответственно, можно записать два основных уравнения баланса для заряженных частиц и ХАЧ:

$$G_{и\ э} + G_{и\ м} = R_{и\ гом} + R_{и\ гет} + R_{и\ п}, \quad (1.21)$$

$$G_{ХАЧ\ э} + G_{ХАЧ\ м} = R_{ХАЧ\ гом} + R_{ХАЧ\ гет} + R_{ХАЧ\ п}. \quad (1.22)$$

Анализ решения этих уравнений приведен в известной работе [3]. В следующем разделе мы рассмотрим уравнение непрерывности для химически активных частиц в плазме, так как генерация и рекомбинация ионов является более простой линейной задачей, зависящей в основном от способов передачи электромагнитного поля в газовый разряд.

1.2. Уравнение непрерывности для химически активных частиц в плазме

Как уже отмечалось, в неизотермической низкотемпературной газоразрядной плазме концентрация ХАЧ (свободных атомов и радикалов) определяется не термодинамическим равновесием, а стационарным состоянием, возникающим вследствие конкуренции различных процессов образования (генерации) и гибели (рекомбинации) ХАЧ. Выведем уравнение для изменения концентрации ХАЧ в элементе объема плазменной зоны реактора.

Пусть в зоне плазмы цилиндрического реактора (рис. 1.6) в направлении оси X существует положительный градиент концентрации ХАЧ $dn_p/dx > 0$. Предположим далее, что в направлении X из-за перепада давлений $P_1 > P_2$ существует газовый поток со скоростью v_r . Выделим в плазменной зоне реактора слой толщиной dx , расположенный перпендикулярно оси X с единичной площадью поперечного сечения. Тогда объем слоя также равен dx . Обозначим концентрацию ХАЧ в слое в момент времени t

через $n_p(x, t)$, а в момент $t + dt$ как $n_p(x, t + dt)$. Тогда изменение числа ХАЧ в слое за время dt составляет

$$[n_p(x, t + dt) - n_p(x, t)]dx = (\partial n_p / \partial t) dt dx.$$

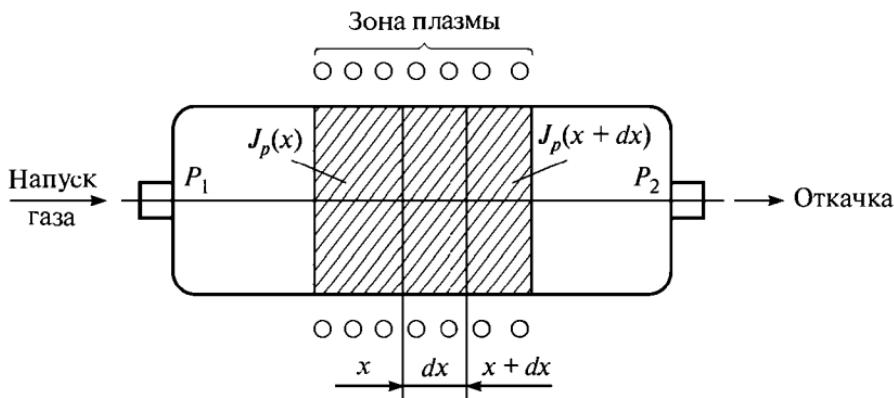


Рис. 1.6. К выводу уравнения непрерывности для химически активных частиц в плазменной зоне реактора

Изменение числа ХАЧ в слое обусловлено протеканием в нем процессов генерации и рекомбинации, а также диффузии из-за градиента концентрации и газового потока, вызванного градиентом давления. Пусть скорость генерации ХАЧ в единице объема плазменной зоны равна G , тогда за время dt в слое объемом dx создается $G dt dx$ активных частиц. Скорость рекомбинации (гибели) ХАЧ в единице объема плазменной зоны равна R . Тогда за время dt в объеме dx убыль ХАЧ составит $R dt dx$. Наличие градиента концентрации и газового потока со скоростью v_r приводит к тому, что поток ХАЧ $J_p(x)$, втекающий в слой dx , не равен потоку ХАЧ $J_p(x + dx)$, вытекающему из слоя. Изменение числа ХАЧ в слое за время dt , вызванное различием этих потоков, составляет $[J_p(x) - J_p(x + dx)]dt = -(\partial J_p / \partial x) dx dt$. Полное изменение числа ХАЧ в слое dx за время dt :

$$(\partial n_p / \partial t) dt dx = [(-\partial J_p / \partial x) + G - R] dx dt. \quad (1.23)$$

Сокращая правую и левую часть выражения (1.23) на $dt dx$, получаем уравнение непрерывности для ХАЧ в плазме:

$$\partial n_p / \partial t = (-\partial J_p / \partial x) + G - R. \quad (1.24)$$

Преобразуем выражение (1.24). Поток ХАЧ J_p удобно выразить в виде двух составляющих: газового $J_{p\text{г}}$ и диффузионного $J_{p\text{д}}$ пото-

ков, которые определяются как $J_{pr} = v_r n_p$ и $J_{pd} = -D_p (dn_p / dx)$, где D_p — коэффициент диффузии ХАЧ. Тогда полный поток ХАЧ:

$$J_p = -D_p (dn_p / dx) + v_r n_p. \quad (1.25)$$

Подставляя (1.25) в (1.24), получаем

$$dn_p / dt = D_p (\partial^2 n_p / \partial x^2) - v_r (\partial n_p / \partial x) + G - R. \quad (1.26)$$

В стационарном случае, когда $\partial n_p / \partial t = 0$, уравнение непрерывности принимает вид

$$D_p (\partial^2 n_p / \partial x^2) - v_r (\partial n_p / \partial x) + G - R = 0. \quad (1.27)$$

Для трехмерного случая и случая, когда газовый поток является функцией координат, уравнение непрерывности (1.26) имеет вид

$$\partial n_p / \partial t = D_p \nabla^2 n_p - \text{grad}(n_p v_r) + G - R, \quad (1.28)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ и $\text{grad} = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ (i, j, k — единицные векторы вдоль осей координат).

Отметим, что в уравнениях (1.26)–(1.28) под R подразумевается скорость гибели ХАЧ в единице объема плазменной зоны реактора обусловленной процессами гомогенной рекомбинации в объеме плазмы, гетерогенной рекомбинации на стенках и электродах реактора и реакции травления рабочего материала. Решение уравнения непрерывности с расчетом скоростей протекания основных процессов генерации, переноса и гибели ХАЧ позволяет определить стационарную концентрацию ХАЧ в элементе объема реактора [9], а в конечном счете — потоки частиц на подложку.

1.3. Основные стадии процессов сухого травления

В процессах сухого травления можно выделить несколько основных стадий, а именно:

- доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда;
- переход молекул рабочего газа в газовом разряде в энергетические и химически активные частицы;
- доставка энергетических и химически активных частиц к поверхности обрабатываемого материала;

- взаимодействие энергетических и химически активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала;
- отвод продуктов взаимодействия от поверхности обрабатываемого материала.

Скорость гетерогенных многостадийных процессов определяется скоростью наиболее медленной (лимитирующей) стадии. Следовательно, для нахождения закономерностей процессов плазмохимического (ПХТ) и ионно-химического травления (ИХТ) материалов надо выявить лимитирующую стадию и определить, какие параметры влияют на ее скорость. А для этого необходимо подробно проанализировать каждую из вышеперечисленных стадий.

1.3. 1. Доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда

Осуществление этой стадии реализуется газовым блоком с регуляторами расходов газов, устройством смешивания газовой смеси, газовой магистралью с распределенным либо точечным вводом в реактор и откачным постом с дроссельной заслонкой, обеспечивающих протекание газового потока при заданном давлении с определенной скоростью. Не касаясь в данный момент используемых рабочих газов, затронем вопросы режимов течения газа и зависимости скорости травления от расхода газа. Известно, что молекулярный режим течения газа в реакторах сухого травления устанавливается при давлении $P < 2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$ Па, а вязкостный режим — при $P > 6-8$ Па. В соответствии с этим, в большинстве процессов ПХТ газ движется в вязкостном режиме, в большей части реакторов ИХТ режим течения газа молекулярно-вязкостный, а в реакторах типа РИЛТ, ТСР, ЭЦР (на электронном циклотронном резонансе) течение газа становится чисто молекулярным. В зависимости от типа реактора поток рабочего газа составляет от нескольких единиц до 100 см³/мин. В реакторах ПХТ высокого давления ($P \geq 90$ Па) при использовании высокопроизводительных химически стойких насосов применяют потоки рабочих газов до 500–600 см³/мин.

Расходы газов, или газовые потоки, $Q_{\text{р.г.}}$ в международной системе единиц (СИ) измеряются в м³ · Па/с. Однако в подавляющем большинстве теоретических и экспериментальных работ газовые потоки определяются в более привычных внесистемных единицах (табл. 1.2): л · мм рт. ст./с и см³ · атм/мин (объем в кубических сантиметрах, приведенный к нормальному атмосферному давлению, в минуту).

Таблица 1.2
Соотношение между единицами расхода газа

Единица	$\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$	$\text{л} \cdot \text{мм рт. ст.}/\text{с}$	$\text{см}^3 \cdot \text{атм}/\text{мин}$
$\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$	1	7,5	600
$\text{л} \cdot \text{мм рт. ст.}/\text{с}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	1	80
$\text{см}^3 \cdot \text{атм}/\text{мин}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	1

Для повышения эффективности травления материалов во всех системах ВПТ необходимо независимо регулировать рабочее давление в камере p и расход рабочего газа $Q_{\text{р.г.}}$. Это достигается установкой на откачных магистралях затворов с регулируемыми размерами пропускных отверстий или напуском в магистрали контролируемого потока балластного газа, например, осущененного азота. Кривая зависимости скорости травления $v_{\text{тр}}$ материала от расхода рабочих газов $Q_{\text{р.г.}}$ при постоянной мощности разряда $W_{\text{раз}}$ и постоянном давлении p обычно имеет максимум. Увеличение $Q_{\text{р.г.}}$ вначале способствует эффективной доставке молекул рабочего газа в зону плазмы разряда, повышению стационарной концентрации энергетических частиц и ХАЧ, а следовательно, и скорости травления. Однако при дальнейшем увеличении $Q_{\text{р.г.}}$ время нахождения молекул газа в зоне плазмы разряда $\tau_{\text{пл}} = pV_{\text{пл}}/Q_{\text{р.г.}}$ ($V_{\text{пл}}$ — объем плазменной зоны) и время нахождения ХАЧ у поверхности обрабатываемого материала $\tau_{\text{обр}} = pV/Q_{\text{р.г.}}$ (V — объем зоны обработки) становятся настолько малыми, что молекулы газа откачиваются из реактора, не успев превратиться в энергетические частицы и ХАЧ, а ХАЧ откачиваются, не успев вступить в реакцию с обрабатываемым материалом. Часто вместо $\tau_{\text{пл}}$ и $\tau_{\text{обр}}$ пользуются средним временем нахождения частиц газа в реакторе (средним остаточным временем)

$$\tau_{\text{ост}} = pV_p/Q_{\text{р.г.}},$$

где V_p — объем реактора.

Значение $\tau_{\text{ост}}$ в зависимости от $Q_{\text{р.г.}}$ при постоянной мощности разряда и постоянном давлении газа может существенно изменяться (в 3–10 раз). Кроме того, расход рабочего газа оказывает большое влияние на селективность травления — отношение скоростей травления различных материалов. Например, увеличение потока газовой смеси $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ (9 : 1) от 5 до

40 см³/мин (в результате чего $\tau_{\text{ост}}$ уменьшается с 8,3 до 1 с) увеличивает селективность реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) SiO₂ относительно Si с 2,5 до 45 [6]. Высокая и стабильная скорость травления может быть получена только при постоянном значении потока газа. При этом скорость откачки регулируется таким образом, чтобы работать в том диапазоне давлений и потоков, при которых скорость травления имеет наибольшее значение и практически не зависит от давления.

Поскольку скорости молекул газа и ХАЧ малы по сравнению со скоростями заряженных частиц, которые, по существу, определяют анизотропию травления, последняя в используемом для процессов ВПТ диапазоне давлений практически мало зависит от $Q_{\text{р.г.}}$. В то же время значение и направление потока рабочего газа во многом определяют равномерность процессов РИПТ и ПХТ в цилиндрических и планарных реакторах. При увеличении $Q_{\text{р.г.}}$ от центра к краям планарного реактора максимум плотности электронов, а следовательно, и ХАЧ, сдвигается к краям электродов, изменяя равномерность травления.

Для оценки эффективности процессов ВПТ служит коэффициент использования рабочего газа ϕ , равный отношению скорости удаления атомов материала с поверхности к потоку молекул рабочего газа на эту поверхность:

$$\phi = \rho N_A v_{\text{тр}} F_m / A_m Q_{\text{р.г.}}, \quad (1.29)$$

где ρ — плотность материала; N_A — число Авогадро; $v_{\text{тр}}$ — скорость травления материала; F_m — площадь поверхности обрабатываемого материала; A_m — атомная масса материала; $Q_{\text{р.г.}}$ — расход рабочего газа.

Учитывая, что расход 1 см³/мин эквивалентен потоку молекул $2,69 \cdot 10^{19}$ мин⁻¹, легко получить значение ϕ для различных материалов, например для кремния:

$$\phi(Si) = 1,11 \cdot 10^{-2} \frac{v_{\text{тр}} [\text{нм}/\text{с}] F_m [\text{см}^2]}{Q_{\text{р.г.}} [\text{см} \cdot \text{атм}/\text{мин}]} . \quad (1.30)$$

При $\phi > 20\%$, то есть когда поток продуктов реакции составляет больше 20% $Q_{\text{р.г.}}$, в процессе травления происходит изменение состава рабочего газа, а следовательно, скорости и селективности травления материалов [5]. В ряде случаев может наблюдаться высадка пленок на стенках реактора из-за разложения продуктов реакции (например, высадка пленки кремния при разложении SiF₂). Площадь поверхности кремниевой пластины диаметром 100 мм

составляет $78,5 \text{ см}^2$, для $v_{\text{тр}} = 6 \text{ нм/с}$ поток продуктов реакции при травлении одной пластины составляет $5,3 \text{ см}^3/\text{мин}$. Следовательно, поток рабочего газа должен быть больше $27 \text{ см}^3/\text{мин}$ [5].

Одним из возможных путей преодоления противоречия между низким коэффициентом использования рабочего газа ϕ и требуемым большим значением его потока $Q_{\text{р.г.}}$ является «разбавление» рабочего газа специально подобранным инертным газом или азотом. Как известно, в условиях тлеющего разряда прямая диссоциация молекул активного газа за счет столкновений с электронами весьма неэффективна. Поскольку молекулы содержат большое число электронных уровней, ступенчатое возбуждение молекул активного газа в определенных условиях может вызвать их диссоциацию.

Согласно предложенной модели, подтвержденной экспериментальными данными, если энергия электронно-возбужденных метастабильных атомов инертного газа близка к энергии нестабильного возбужденного состояния молекул активного газа, то гашение энергии метастабильных атомов, имеющих значительное время жизни, может вызвать диссоциацию молекул активного газа. Поэтому увеличение в определенных пределах содержания инертного газа в активном газе вызывает рост концентрации возбужденных метастабильных атомов, способных повысить степень диссоциации молекул активного газа. Причем скорость генерации ХАЧ и, как следствие, скорость травления ими материала практически не меняются при разбавлении активного газа инертным. Однако наличие атомов инертного газа при подаче электрического смещения позволяет существенно увеличить анизотропию и, следовательно, разрешающую способность процессов РИТ.

1.3.2. Переход молекул рабочего газа

в энергетические и химически активные частицы

Энергетические и химические активные частицы образуются в газовых разрядах в результате процессов, которые подразделяются на четыре основные группы:

- реакции под действием электронного удара;
- реакции при неупругих столкновениях между тяжелыми частицами;
- гетерогенные реакции;
- реакции под действием излучения плазмы.

Перечень возможных реакций приведен в табл. 1.1. Важно понять, что источником энергии для энергетических и химически активных частиц в основном являются электроны с достаточной энергией, частично энергия других молекул и атомов и в некоторой степени энергия излучения плазмы. В газоразрядной плазме низкого давления (особенно в плазме магнетронного или индукционного типа) энергия электронов значительно превышает энергию других частиц, поэтому процессы диссоциации и ионизации, имеющие большие пороговые энергии, в основном определяются электронным ударом. Диссоциация молекул рабочего газа электронным ударом определяет скорость генерации энергетических и химически активных частиц в плазме разряда. Согласно источнику [5] скорость генерации определяется выражением

$$G = n_e n_r (2/m_e)^{1/2} \int_{E_{p3}}^{\infty} \sigma(E_e) f(E_e) E_e^{1/2} dE_e, \quad (1.31)$$

где n_e и n_r — соответственно концентрации электронов и молекул газа, из которых образуются энергетические и химически активные частицы; m_e — масса электрона; E_e — энергия электронов; $\sigma(E_e)$ — сечение взаимодействия электронов и молекул; $f(E_e)$ — функция распределения электронов по энергиям; E_{p3} — пороговая энергия процесса образования энергетических и химически активных частиц вследствие ударов электронов.

Из выражения (1.31) видно, что значение G может быть аналитически определено только при условии известных функций распределения электронов по энергиям $f(E_e)$ и сечения процесса генерации частиц $\sigma(E_e)$. Вид функций распределения находят из системы уравнений, основным в которой является кинетическое уравнение Больцмана. Для определения правой части этого уравнения должны быть известны законы взаимодействия между частицами, а эти взаимодействия, как видно из табл. 1.1, очень разнообразны. Кроме того, не существует аналитических выражений для всех функций возбуждения и ионизации. Поэтому задача в общем виде не решается — ее можно решать только в определенных приближениях.

В настоящее время сведения о функции распределения электронов по энергиям имеются только для нескольких видов разрядов в одноатомных и двухатомных газах. В остальных случаях пользуются приближениями. Интересны два особых случая. В первом случае распределение по энергиям возникает при по-

тери энергии электронов только в результате упругих столкновений при длине свободного пробега λ_3 , не зависящей от энергии. Этот случай дает распределение Дройвестайна [3, 63]

$$f_D(E_3) = 1,04(\bar{E}_3)^{-3/2} \exp[-0,55(E_3/\bar{E}_3)^2] E_3^{1/2}, \quad (1.32)$$

где $\bar{E}_3 = 1/2m_3 v_3^2$ — средняя энергия электронов.

Второй случай — максвелловское распределение, которое учитывает только столкновения между электронами, а именно их взаимное отталкивание, приводящее к изменению их энергии:

$$f_M(E_3) = (27/2\pi)^{1/2} (\bar{E}_3)^{-3/2} \exp(-1,5E_3/\bar{E}_3) E_3^{1/2}. \quad (1.33)$$

Для максвелловского распределения можно ввести понятие электронной температуры

$$T_3 = \frac{2}{3} \frac{\bar{E}_3}{k}$$

и переписать (1.32) в виде

$$f_M(E_3) = (2/\pi^{1/2})(kT_3)^{-3/2} \exp[-E_3/(kT_3)] E_3^{1/2}. \quad (1.34)$$

Термин «электронная температура» часто используется для описания средней энергии и других энергетических распределений.

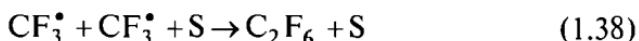
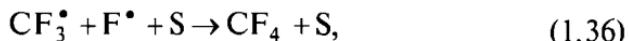
При одной и той же средней величине энергии в случае максвелловского распределения в плазме содержится значительно больше быстрых электронов, чем при распределении Дройвестайна. Следует отметить, что явления переноса, а именно диффузия и дрейф электронов, зависят от их средней энергии, а ионизация и возбуждение — от числа электронов с большой энергией на «хвосте» распределения. Согласно источнику [2], максвелловское распределение является хорошим приближением для распределения электронов в плазме молекулярных газов, поскольку в этих газах уровни возбуждения широко разбросаны от основного состояния до потенциала ионизации. Следовательно, потери при неупругих столкновениях происходят при относительно низких энергиях. В инертных газах уровни возбуждения находятся намного ближе к потенциальному ионизации и, таким образом, при малых величинах отношения E/p (где E — напряженность электрического поля, p — давление газа) важны только потери, являющиеся результатом упругих столкновений.

Средняя энергия электронов \bar{E}_e в разряде инертных газов намного выше, чем в молекулярных газах при том же значении E/p , и в этом случае приближенно применимо распределение Дрюйвестейна. Значение E_e является характеристикой функции распределения электронов по энергиям и определяется только отношением E/p . Величину E/p контролировать значительно проще, чем определять E_e , поэтому это отношение является важным практическим параметром, позволяющим оценивать скорость генерации энергетических и химически активных частиц в газоразрядной плазме. Другими параметрами, необходимыми для вычисления скорости генерации энергетических и химически активных частиц, являются сечения процессов ионизации и диссоциации. Для наиболее часто используемых при травлении газов — четырехфтористого углерода (CF_4) и аргона (Ar) сечения диссоциации σ_{dis} и ионизации σ_i приведены в табл. 1.3 [3].

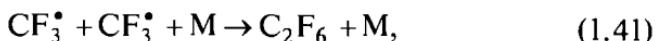
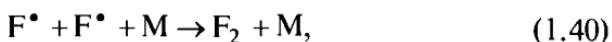
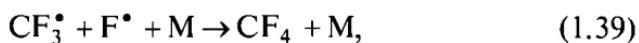
Подставляя в (1.31) максвелловскую функцию распределения из (1.34) и аппроксимируя зависимость сечения диссоциации молекул CF_4 электронами из табл. 1.3 двумя прямыми, можно получить выражение для скорости генерации ХАЧ CF_3 и F :

$$G = n_e n_r \exp(-1,45 \cdot 10^5 / T_e) [7,74 \cdot 10^{-17} T_e^{1/2} + 1,03 \cdot 10^{-2} T_e^{3/2}] \quad (1.35)$$

Одновременно с реакциями диссоциации молекул CF_4 в плазме происходят реакции рекомбинации радикалов CF_3^\bullet и фтора. Реакции рекомбинации можно разделить на гетерогенные



и гомогенные



где M — третья частица, роль которой обычно играет молекула CF_4 ; а S — поверхность твердого тела, роль которого играют стенки реактора и электроды.

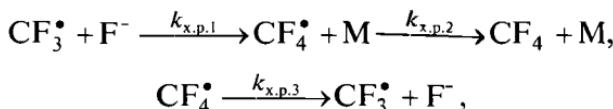
Таблица 1.3

Сечения диссоциации и ионизации для CF_4 и Ar

$E_o, 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	$\sigma_{\text{дис}} \text{ для } \text{CF}_4, 10^{-16} \text{ см}^2$	$\sigma_i \text{ для } \text{CF}_4, 10^{-16} \text{ см}^2$	$\sigma_i \text{ для Ar}, 10^{-16} \text{ см}^2$
12,5	0	0	0
14,3	0,078	0	0
16,3	0,23	0	0,05
20	0,74	—	0,63
70	5,25	3,66	2,77
90	5,5	—	—
300	4,7	—	1,98
600	3,26	—	1,30

Как показано в работе [6], в плазме CF_4 без добавки кислорода количество образующегося C_2F_6 очень мало, поэтому реакциями (1.38) и (1.41) можно пренебречь. Реакции (1.37) и (1.40) также несущественны по сравнению с реакциями (1.36) и (1.39), так как время жизни возбужденной молекулы фтора F_2^* до стабилизации ее при ударе третьей частицей или о стенку на 3–5 порядков меньше времени жизни возбужденной молекулы с F_4^* , в которой возможна времененная самопроизвольная стабилизация из-за перераспределения энергии по связям. И, наконец, вероятность реакции (1.36) возрастает с понижением давления CF_4 , а вероятность (1.39) — с его повышением.

Скорость рекомбинации свободных атомов фтора и радикалов CF_3^* по реакции (1.39) определяется произведением числа тройных столкновений на аррениусов экспоненциальный множитель $\exp[-E_{\text{акт}}/(kT)]$. Однако радикалы CF_3^* и ионов F^- обладают очень высокой реакционной способностью, поэтому энергия активации $E_{\text{акт}}$ их рекомбинации очень мала и экспоненциальный множитель близок к единице. Реакция (1.39) протекает в три стадии:



где $k_{x,p}$ — константа скорости химической реакции.

На первой стадии из-за перераспределения энергии по связям образуется временно существующая стабильная квазимолекула CF_4^* ; на второй избыточное количество энергии передается третьей частице М с образованием стабильной молекулы CF_4 . Третья

стадия — спонтанный распад квазимолекулы, если в течение ее времени жизни не произойдет столкновение с третьей частицей. Скорость реакции образования стабильных молекул CF_4 :

$$d[\text{CF}_4]/dt = k_{x.p.2}[\text{CF}_4^\bullet][\text{M}]. \quad (1.42)$$

Согласно принципу стационарности Боденштейна через некоторое время после начала процесса в течение некоторого конечного интервала времени концентрация промежуточного продукта постоянна. Поэтому

$$\begin{aligned} d[\text{CF}_4^\bullet]/dt &= \\ &= k_{x.p.1}[\text{CF}_3^\bullet][\text{F}^-] - k_{x.p.2}[\text{CF}_4^\bullet][\text{M}] - k_{x.p.3}[\text{CF}_4^\bullet] = 0. \end{aligned} \quad (1.43)$$

Отсюда следует

$$[\text{CF}_4^\bullet] = k_{x.p.1}[\text{CF}_3^\bullet][\text{F}^-] / (k_{x.p.2}[\text{M}] + k_{x.p.3}). \quad (1.44)$$

Подставляя (1.44) в (1.42), получаем

$$d[\text{CF}_4]/dt = (k_{x.p.1}k_{x.p.2}[\text{CF}_3][\text{F}^-][\text{M}]) / (k_{x.p.2}[\text{M}] + k_{x.p.3}). \quad (1.45)$$

Величина $1/k_{x.p.3}$ представляет собой среднюю продолжительность жизни стабильной квазимолекулы CF_4^\bullet , которая велика по сравнению с временными интервалами со временем между соударениями с частицами M . Поэтому величиной $k_{x.p.3}$ в знаменателе (1.45) можно пренебречь:

$$d[\text{CF}_4]/dt = k_{x.p.1}[\text{CF}_3^\bullet][\text{F}^-]. \quad (1.46)$$

Таким образом, для случая гомогенной рекомбинации ее скорость согласно источнику [5] определяется следующим выражением:

$$R_{\text{ром}} = 1,69 \cdot 10^{-19} T_p^{1/2} n_p^2, \quad (1.47)$$

где T_p — температура ХАЧ, а n_p — концентрация ХАЧ.

Однако основным процессом гибели ХАЧ может являться их гетерогенная рекомбинация на стенках реактора. Этот процесс состоит из двух стадий: диффузии ХАЧ к стенкам и захват ХАЧ стенкой. Наиболее медленная из этих стадий определяет скорость гетерогенной рекомбинации.

Гетерогенная рекомбинация бывает кинетической и диффузионной. Кинетическая гетерогенная рекомбинация на поверхности (рп) реализуется, когда вероятность взаимодействия ХАЧ со стенкой мизерная ($\alpha_{\text{рп}}$ меньше 10^{-3}). В этом случае концен-

трация ХАЧ (n_p) в объеме плазменной зоны реактора стационарна, то есть не зависит от времени. Скорость гибели ХАЧ в единице объема плазменной зоны реактора определяется следующим выражением:

$$R_{\text{гет}} = \alpha_{\text{пп}} n_p (kT_p / 2\pi m_p)^{1/2} (S/V_{\text{пз}}), \quad (1.48)$$

где S — площадь стенки; m_p — масса ХАЧ; $V_{\text{пз}}$ — объем плазменной зоны. Так как в стационарном состоянии скорость генерации ХАЧ в единице объема плазменной зоны равна скорости их гибели за счет гетерогенной рекомбинации, то концентрация ХАЧ определяется следующим образом:

$$n_p = (G/\alpha_{\text{пп}}) (kT_p / 2\pi m_p)^{-1/2} (S/V_{\text{пз}})^{-1}. \quad (1.49)$$

При диффузионной гетерогенной рекомбинации скорость гибели ХАЧ на стенках велика и вероятность взаимодействия близка единице. В этом случае концентрация ХАЧ в объеме плазменной зоны определяется из решения уравнения непрерывности.

Отношение стационарной концентрации ХАЧ в плазменной зоне к исходной концентрации молекул рабочего газа определяет степень плазмохимической диссоциации:

$$\beta_{\text{дис}} = n_p / n_{\Gamma}. \quad (1.50)$$

Степень плазмохимической диссоциации или степень превращения молекул рабочего газа в ХАЧ в плазменной зоне реактора зависит от времени нахождения молекул рабочего газа в плазменной зоне, энергии и концентрации электронов, вида и состава рабочего газа, материала стенок реактора и варьируется от долей до десятков процентов. Максимальные значения диссоциации достигаются в современных реакторах плотной плазмы (TCP, ICP, ЭЦР) с высокими значениями энергии электронов и их плотности и с прогреваемыми стенками.

1.3.3. Доставка энергетических и химически активных газовых частиц к поверхности обрабатываемого материала

Нормальный ход гетерогенной химической реакции травления материала обеспечивается только при непрерывной доставке ХАЧ к поверхности обрабатываемого материала и непрерывном отводе продуктов реакции от поверхности. Доставка ХАЧ к поверхности подвергаемого травлению материала в зависимости

от давления в реакторе может осуществляться либо вследствие молекулярного потока при $l_p \ll \lambda_r$ (l_p — характерный размер реактора, λ_r — длина свободного пробега молекул газа), либо вследствие диффузии при $l_p \gg \lambda_r$. В переходной области, при $l_p \approx \lambda_r$, для описания процесса доставки ХАЧ может быть использован метод сложения сопротивлений.

Отметим, что в диффузионной области скорость и равномерность процесса травления материалов определяются величиной и распределением концентрации ХАЧ у поверхности обрабатываемого материала и слабо зависят от значения и распределения температуры и концентрации активных центров на поверхности материала; в кинетической области эти характеристики травления материалов в основном определяются уровнем и распределением температуры и концентрации активных центров на поверхности материала.

Если подвергаемый травлению материал находится за областью плазмы, через которую продувается рабочий газ, то концентрация ХАЧ по мере движения от задней границы плазменной зоны к материалу будет уменьшаться из-за рекомбинации. Стационарную концентрацию ХАЧ у поверхности материала на расстоянии x от задней границы плазмы можно определить из уравнения непрерывности вида

$$D_p \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - v_r \frac{\partial n_p}{\partial x} - \frac{n_p}{\tau_p} = 0 \quad (1.51)$$

где $R_{\text{пек}} = n_p / \tau_p$ — скорость гибели ХАЧ в результате процессов гомогенной и гетерогенной рекомбинации; v_r — скорость газового потока; n_p — концентрация ХАЧ; τ_p — время жизни ХАЧ.

В системах ИХТ доставка заряженных ХАЧ к поверхности материала, подвергаемого травлению, осуществляется путем их ускорения в электрическом поле. В системах РИЛТ плотность ионного тока на подложкодержатель будет определять скорость травления материала. Заряженные ХАЧ выбивают атомы материала и при этом сами диссоциируют. Например, молекулярный ион CF_3^+ может диссоциировать либо на CF_2^{2+} и F^\bullet , либо на CF^{3+} и 2F^\bullet , либо на C и 3F^\bullet .

1.3.4. Взаимодействие энергетических и химически активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала

Взаимодействие ХАЧ с активными центрами материала включает в себя хемосорбцию свободных атомов и радикалов на активных центрах, химическую реакцию и последующую десорбцию образующихся продуктов реакции с поверхности материала. Процесс десорбции усиливается дополнительным воздействием электронами, ионами и электромагнитным излучением, в частности ультрафиолетовым, молекулы рабочих газов не образуют ХАЧ и не могут производить травление материалов.

Необходимым условием травления материала ХАЧ является возможность образования летучих и стабильных при температуре процесса (температуре поверхности материала в процессе травления) продуктов реакции. Термин «летучий» означает, что при температуре процесса $T_{\text{пр}}$ давление паров образующихся продуктов реакции должно быть достаточно высоким, чтобы эти продукты испарялись с поверхности материала.

В настоящее время отсутствуют данные по температурам испарения $T_{\text{исп}}$ продуктов реакции (галогенидов, оксигалогенидов, сульфидов, гидридов материалов и др.), образующихся при травлении различных материалов в диапазоне давлений, характерном для процессов ПХТ и ИХТ. Однако в первом приближении оценить летучесть продуктов реакции можно по их температурам кипения $T_{\text{кип}}$ при нормальном давлении, которые приводятся в химических справочниках. Процессы ПХТ и ИХТ являются низкотемпературными, и $T_{\text{пр}}$ не превышает 400 °C, а при использовании электронно-резистивных или фоторезистивных масок ее стабилизируют на уровне 100–150 °C.

По соотношению температуры процессов $T_{\text{пр}}$ и температуры испарения $T_{\text{исп}}$ или кипения $T_{\text{кип}}$ образующихся продуктов реакции можно выделить три основных условия травления материалов:

1. $T_{\text{пр}} \ll T_{\text{исп}} (T_{\text{кип}})$. В этом случае невозможно травление материала ХАЧ данного вида в системах ПХТ, так как в результате реакции на поверхности материала образуется нелетучее соединение, которое маскирует материал. Например, алюминий нельзя травить атомами фтора, потому что в результате реакции образуется фторид алюминия с $T_{\text{кип}} = 1256$ °C. По аналогичной причине атомами фтора не травятся никель, хром, железо, медь, магний, свинец. В системах ИХТ, где наряду с

химическим воздействием поверхность обрабатываемого материала подвергается энергетической ионной бомбардировке, возможно травление материалов путем распыления, даже если образуются продукты с $T_{\text{исп}} (T_{\text{кип}}) \gg T_{\text{пр}}$. Если коэффициент распыления образующегося продукта реакции будет выше коэффициента распыления исходного материала, то скорость ионно-химического травления будет больше скорости ионного травления.

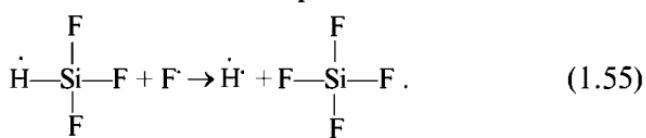
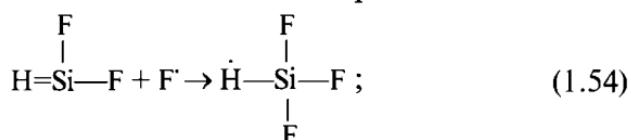
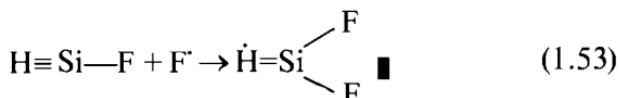
2. $T_{\text{пр}} \approx T_{\text{исп}} (T_{\text{кип}})$. При образовании стабильных продуктов реакции возможно травление материала ХАЧ в системах ПХТ. Однако низкая скорость удаления образующихся продуктов реакции способствует тому, что процесс травления протекает в кинетической области (то есть ограничивается скоростью стадии химической реакции). С увеличением температуры процесса скорость травления материала должна возрастать. Ионная бомбардировка будет оказывать сильное влияние на скорость травления материала. Если образующиеся продукты реакции нестабильны (разлагаются), то травление таких материалов в системах ПХТ невозможно. В системах ИХТ эти материалы можно травить распылением. Например, золото не травится в CF_4 в системах ПХТ, а в системах ИХТ хорошо травится.
3. $T_{\text{пр}} \gg T_{\text{исп}} (T_{\text{кип}})$. Травление материалов в любых системах ПХТ и ИХТ осуществляется в основном в результате химических реакций. Высокие скорости химических реакций приводят к тому, что процессы травления материалов протекают в диффузионной области. Небольшие изменения температуры процесса и ионная бомбардировка, если она не способствует повышению скорости доставки реагента, мало влияют на скорость травления материалов.

Если материал не образует летучих двухкомпонентных соединений с ХАЧ, то необходимо рассматривать его трехкомпонентные соединения, чтобы окончательно решить вопрос о возможности химического травления такого материала. Например, все галогениды хрома не летучи ($T_{\text{кип}} > 1000^\circ\text{C}$), однако оксихлорид хрома CrO_2Cl_2 имеет $T_{\text{кип}} = 118^\circ\text{C}$. Поэтому хром следует травить в смеси хлорсодержащего газа и кислорода, причем оптимальное соотношение хлора и кислорода в смеси нужно выбирать по соотношению их атомов в оксихлориде. Это положение хорошо подтверждается экспериментальными данными по травлению пленок хрома в плазме хлорсодержащего фреона (хладона) и кислорода.

На примере свободных атомов фтора F^\bullet и активных центров монокристаллического кремния $H\equiv Si^\bullet$ процесс травления можно представить в виде [5, 6]:



где H — решетка монокристалла кремния. Процесс (1.52), в котором осуществляется хемосорбция атома фтора на активном центре монокристалла кремния с объединением неспаренных электронов в прочную ковалентную связь, является основополагающим при травлении кремния. Связь атома кремния с решеткой ослабевает из-за высокой электроотрицательности фтора, который оттягивает на себя электронное облако атома кремния. Индуктивный эффект приводит к смещению в этом же направлении электронных облаков атома кремния в его связях с решеткой, что уменьшает их перекрытие с электронными облаками атомов решетки и, следовательно, ослабляет связи. Добавление следующих атомов фтора легко превращают такой ослабленный кремний в летучее соединение:



В процессах (1.53)–(1.55) образуются новые активные центры на поверхности кремния, которые, в свою очередь, вступают в реакцию с атомами фтора по механизму (1.52). Таким образом, осуществляется цепная реакция травления кремния атомами фтора; суммарная же химическая реакция обычно записывается как



но такая запись не отражает особенностей механизма травления.

При плазменном и ионно-химическом травлении поверхность материала подвергается воздействию электронной и (или) ионной бомбардировки. Под действием бомбардировки:

- происходит диссоциация адсорбированных молекул рабочих газов и радикалов типа CF_x и CCl_x (где $x = 1, 2, 3$) с образованием свободных атомов галогенов и углерода;
- увеличивается скорость десорбции молекул продуктов реакции;
- происходит физическое распыление материала, промежуточных продуктов реакций и малолетучих соединений;
- образуются новые активные центры на поверхности материала.

Вышеперечисленные факторы увеличивают скорость травления материалов при ПХТ и ИХТ по сравнению с радикальным травлением. Отметим, что процессы физического распыления материала и удаления материала вследствие химических реакций в процессах ИХТ складываются не аддитивно, то есть суммарная скорость травления материала в результате двух процессов намного больше суммы скоростей травления материала в каждом процессе. Например, в работе [5] отмечено, что скорость травления кремния в XeF_2 без бомбардировки ионами аргона равна 10^{-2} нм/с, скорость травления кремния ионами аргона без воздействия XeF_2 — $5 \cdot 10^{-3}$ нм/с, а при совместном воздействии XeF_2 и ионов аргона скорость увеличивается до 10^{-1} нм/с.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить, что изучение механизмов каждой из стадий процесса травления позволяет выявлять определенные зависимости технологических характеристик процессов от физических факторов и условий их проведения. Выявление лимитирующей стадии травления важно как для разработчиков процессов, так и для производителей оборудования.

Глава 2

Технологические основы сухого (вакуумно-плазменного) травления

Процессы сухого травления находят все более широкое применение в технологиях СБИС, микромеханики, нанотехнологиях. Традиционные жидкостные химические методы обработки полупроводниковых пластин из-за низкой разрешающей способности уходят в прошлое. Жидкостное травление по своей природе является изотропным, тогда как получение рисунков ИС с линиями шириной менее 1 мкм возможно только с помощью анизотропного травления с коэффициентом анизотропности начиная от 10 до 100 и более. Такая анизотропность может быть обеспечена только путем применения специальных методов сухого травления. Сухое травление называют также плазменным травлением, подразумевая использование плазмы газового разряда при низком давлении.

В настоящее время технология формирования каждого элемента в сложных СБИС в сильной степени определяется взаимосвязями различных процессов. Основные технологические операции могут быть представлены в виде трех групп [7]:

- 1) процессы получения, обработки и легирования тонких пленок;
- 2) литографическая обработка;
- 3) задание и воспроизведение топологического рисунка элементов.

Группы 2 и 3 отражают процессы формирования изображения и переноса в функциональные слои. При реализации этих процессов наиболее важным и сложным параметром является минимально воспроизводимый размер элементов микроэлектронных структур, задаваемый на стадии литографии. Термин «перенос рисунка» относится к переводу рисунка, создаваемого в маскирующем слое, на пленку или подложку с использованием химических, физических либо физико-химических методов, обеспечивающих формирование поверхностного рельефа. Наиболее широко распространен в современной технологии субтрактивный

метод переноса рисунка, при котором осуществляется удаление травлением немаскированных участков пленки.

2.1. Основные технологические характеристики процессов травления и их взаимосвязь с физико-химическими параметрами

Технологический процесс травления характеризуется определенными параметрами, такими как скорость травления, анизотропность, селективность травления, равномерность, предельно разрешенный размер, текстура поверхности и др. Определения этих технологических характеристик будут даны ниже. Здесь же важно подчеркнуть, что все они непосредственно взаимосвязаны с физико-химическими параметрами применяемых процессов травления. Для управления технологическими характеристиками процесса плазменного травления наряду с давлением, частотой ВЧ-питания, мощностью, скоростью потока, температурой и геометрией реактора могут использоваться и химические переменные, в частности состав подаваемых газовых сред.

Давление в системе, плотность мощности и частота прикладываемого электрического поля связаны со степенью ионизации газа и энергией ионов. Снижение давления, частоты и повышение плотности мощности приводят к увеличению средней энергии электронов и ионов, падающих на поверхность, подвергающуюся травлению. Повышение плотности мощности помимо увеличения степени ионизации приводит к увеличению плотности свободных радикалов в плазме. Как результат, снижение давления, частоты электрического поля и увеличение плотности мощности позволяют повысить степень анизотропии травления.

С увеличением прикладываемой мощности скорость травления, как правило, возрастает. Однако интенсивное рассеяние энергии в виде теплоты и разогрев подложек могут привести к нежелательным последствиям, например к подгоранию фоторезистивной маски и потере селективности травления. Оптимальный диапазон частот прикладываемой мощности составляет от 10 кГц до 30 МГц.

Состав рабочей смеси — основной фактор, определяющий скорость и селективность травления.

Скорость потока рабочей смеси определяет максимально возможный приток к поверхности подложек реакционноспособных компонентов плазмы. Это связано с тем, что один из ме-

ханизмов потерь травящих компонентов — унос их газовым потоком. В обычных условиях травления скорость газового потока оказывает незначительное воздействие на скорость травления. Это влияние проявляется в экстремальных условиях, когда скорость потока настолько мала, что доставка реагентов к поверхности подложки становится доминирующим механизмом потерь.

Температура подложек влияет главным образом на скорость химических реакций. Как правило, увеличение температуры приводит к увеличению скорости травления, но возможны исключения, так как за счет интенсивной десорбции травящих компонентов возможно уменьшение скорости травления с ростом температуры. Уменьшение температуры также оказывает влияние на селективность травления. При высокой температуре скорости процессов, протекающих с разной энергией активации, выравниваются и, как следствие, с ростом температуры и ростом скоростей травления селективность травления снижается. Для обеспечения однородности и воспроизводимости скоростей травления необходим контроль температуры подложек.

Далее перейдем к описанию основных технологических характеристик методов ВПТ.

2.1.1. Предельно разрешенный размер

Разрешение, достигаемое в процессе плазмохимического травления, является критерием качества переноса рисунка и выражается количеством различных линий на единицу длины, воспроизводимых в процессе травления. Разрешение определяется двумя параметрами:

- смещением B , равным разности горизонтальных размеров рисунка травления d_T , полученного на пленке, и рисунка маски d_M , то есть разности заданного и полученного размеров ($B = d_T - d_M$, где d_M — размер, заданный маской; d_T — размер, полученный в результате травления);
- допуском, являющимся мерой статистического распределения величины смещения и характеризующим однородность процесса травления.

Разрешение — одна из наиболее сложных и совокупных технологических характеристик, которая зависит от более простых: таких как селективность и равномерность травления, анизотропность и некоторых других. Разрешение во многом определяется выбранным способом вакуумно-плазменного травления. Одним из наиболее прецизионных способов травления, то есть

способов, позволяющих сформировать рисунок с минимальными линейными размерами без уходов относительно маски, является ионно-лучевой способ, при использовании которого были получены элементы шириной порядка 20–30 нм на глубину до 50–60 нм. Наивысшее разрешение реализовано методом ионного травления; оно соответствует линейному размеру 10 нм. Эти результаты обусловлены высочайшей направленностью ионного потока и отсутствием других травящих частиц, обладающих меньшей направленностью воздействия. В то же время данный метод не обладает селективностью по отношению к маске и поэтому не позволяет разрешать размеры на большую глубину. Самые современные триодные системы с источниками плазмы высокой плотности позволяют вскрывать в функциональных слоях рисунок с линейными размерами 20–30 нм на глубину более 500 нм, что обусловлено как высокой анизотропностью травления в данных системах, так и возможностью одновременного достижения высокой селективности.

Таким образом, для ВПТ характеристика «разрешение» в современном понимании — это не просто минимально вскрываемый размер без ухода размеров, а количество различных линий на единицу длины (N), деленное на отношение минимальной ширины линии или зазора (l), к высоте зазора либо линии (h):

$$P = \frac{N}{l/h}.$$

2.1.2. Анизотропность процессов ВПТ

Под анизотропией при плазменном травлении понимают преимущественное удаление материала пластины в направлении, перпендикулярном ее поверхности. Различие между изотропным и анизотропным травлением наглядно демонстрирует рис. 2.1.

Изображение маски необходимо перенести на подложку без искажения критических размеров элементов. В реальных процессах вытравленная область простирается за границы отверстия в маске. Мaska постепенно разрушается и становится более тонкой на границе отверстия, поэтому отверстие постепенно расширяется. Химическое разрушение пленки под маской (изотропное травление) будет приводить к размытию деталей рельефа. Если травление маски пренебрежимо мало (высокая селективность), то степень изотропии травления определяется отношением

$$IE = d_H/d_V,$$

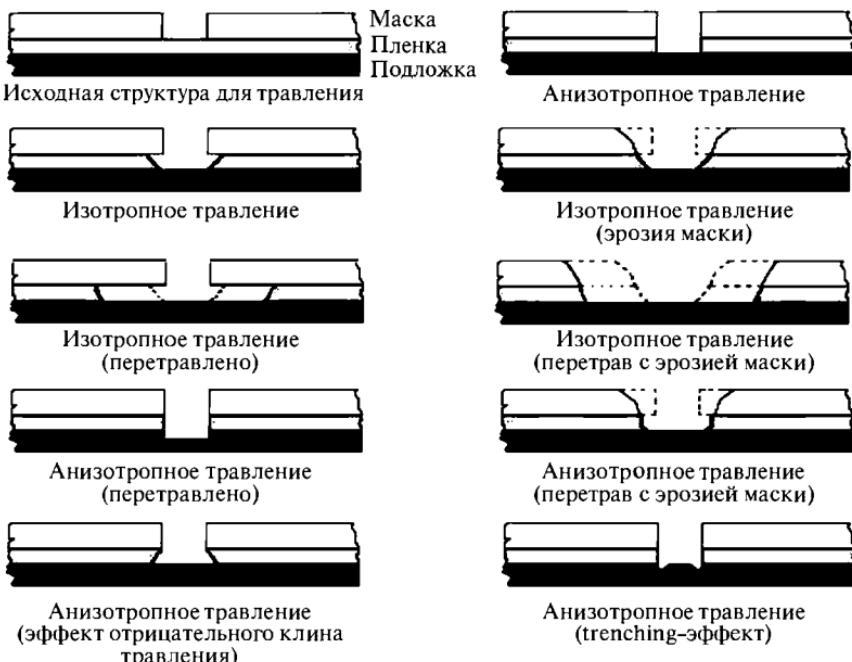


Рис. 2.1. Виды изотропного и анизотропного травления материала, а также дефекты процесса

а степень анизотропии травления — показателем анизотропии

$$A = 1 - IE.$$

Чтобы компенсировать размытие рельефа (подтравливание) во время изотропного травления, диаметр отверстий в маске следует уменьшить. Минимальный размер элементов топологии, достижимый при использовании метода изотропного травления, ограничен толщиной пленки, лежащей под маской и составляющей обычно несколько микрометров. Большую точность и разрешение изготовления заданного рельефа обеспечивает анизотропное травление.

Однако изотропное травление имеет свои преимущества. Так, операции селективного удаления фоторезиста, травления топологических элементов больших размеров в кремнии и удаления оксидируемых нитридных масок просто и экономично выполняют изотропными травителями. Эти травители применяют и для травления диэлектрических пленок под напыленными фоторезистивными масками. Изотропное травление используют для удаления толстой вертикальной части слоя (пристенка) на краю

ступеньки и для сглаживания рельефа, что облегчает осаждение покрытия на ступеньку.

Так как направление электрического поля в катодной области перпендикулярно поверхности пластины, а инжектируемые из плазмы ионы движутся вдоль поля, это приводит к возрастанию скорости травления по вертикали относительно горизонтали, то есть к анизотропному травлению. Электроны и фотоны также попадают на пластину, но не направленно, а их энергия намного меньше чем у ионов.

На рис. 2.2 показан профиль структуры после анизотропного травления, иллюстрирующий один из механизмов, при действии которого радикалы, образующиеся в плазме, осаждаются на пленке (пассивирующая компонента), либо защищая ее от воздействия радикалов травителя, либо рекомбинируя с ними и, тем самым, дезактивируя их. Эти центры пассивации-рекомбинации сохраняются на боковой стенке структуры, но десорбируются с ее основания под действием ионной бомбардировки, что стимулирует травление основания.

В процессе реактивно-ионного травления (РИТ) анизотропность травления определяется такими факторами, как давление

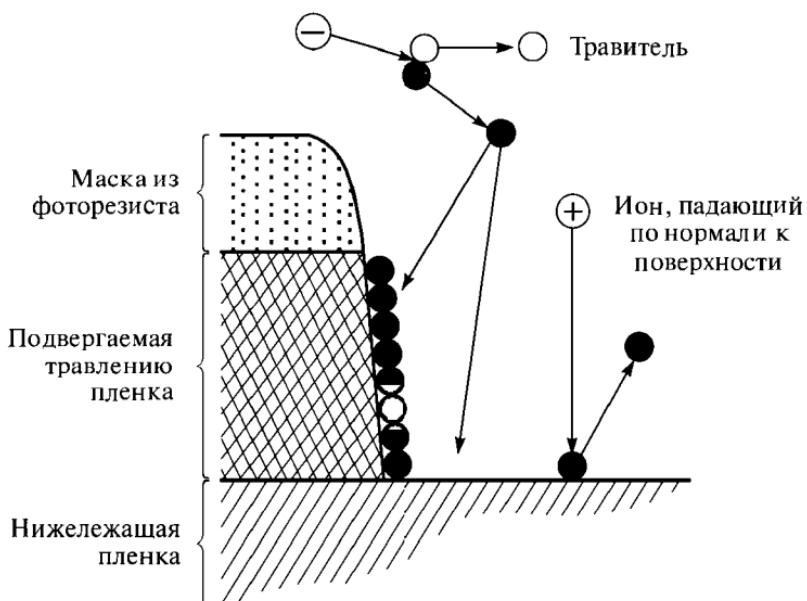


Рис. 2.2. Иллюстрация одного из механизмов анизотропного травления. Центры пассивации и рекомбинации изображены затененными кружками

в реакторе, отношение количества ионов к числу нейтральных частиц, степень разрушения маски, материал катода и парциальное давление остаточных газов, активация химических реакций ионной бомбардировкой, угол расходности ионного потока.

В цилиндрическом реакторе ПХТ (рис. 2.3) подложки находятся под плавающим потенциалом тлеющего разряда и подвергаются вследствие этого только низкоэнергетической (<30 эВ) ионной бомбардировке. ПХТ-процессы здесь проводятся при высоком давлении, ионная составляющая минимальная и имеет большой угол расходности (более 5°), нейтральная химически активная составляющая движется ненаправленно, что обеспечивает равенство скоростей травления в горизонтальном и вертикальном направлениях, то есть изотропию.

В системах же РИТ в основном реализуются анизотропные профили травления, особенно если применяется пассивирующая компонента. Анизотропия достигается правильным выбором газовой смеси, давления, величиной ионной компоненты и

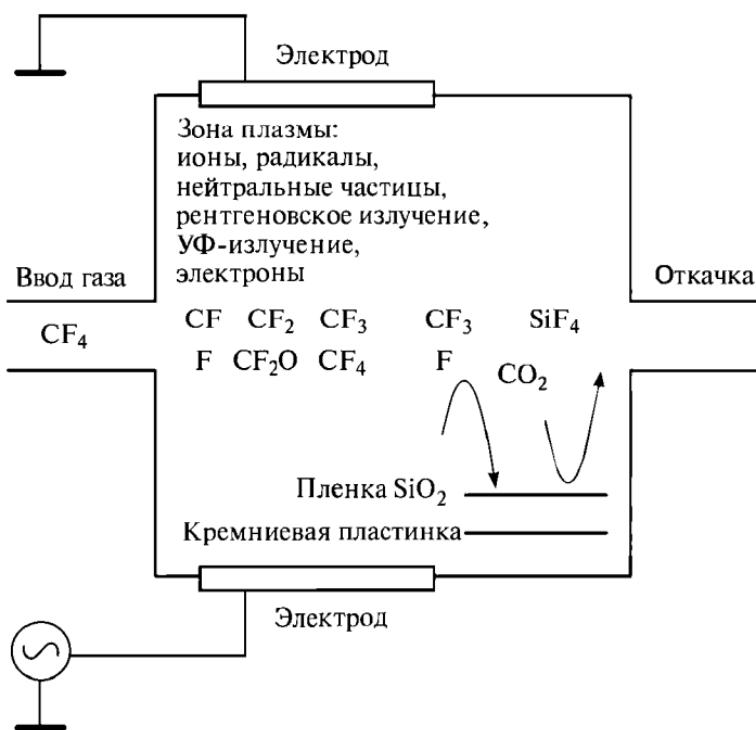


Рис. 2.3. Упрощенная схема реакций в плазменном реакторе

углом расходности ионов, температурой подложки и некоторыми другими факторами. Важно отметить, что анизотропное травление стимулируется в первую очередь ионной бомбардировкой. Энергия активации процесса ВПТ SiO_2 существенно выше процесса ВПТ Si, поэтому процессы ВПТ SiO_2 , проводимые при невысоких температурах подложки ($\leq 50^\circ\text{C}$) всегда анизотропны. В то же время для достижения высокой анизотропии в процессах реактивно-ионного травления Si, Al, поликристаллического кремния помимо ионной составляющей важную роль играет и наличие пассивирующей компоненты. Важную роль при достижении высокой анизотропии играет и высокая селективность к маске, о чём уже упоминалось выше.

Показатель анизотропии РИТ в 3–5 раз выше, чем у ПХТ. Для РИТ в диодной ВЧ-системе с катодной связью анизотропия может составлять 20–30, предельное разрешение — 0,4–0,2 мкм. В системах РИТ с магнитным полем при давлениях менее 0,1 Па, анизотропия принимает значения от 20 до 100, а предельное разрешение от 0,2 до 0,1 мкм и менее. Значительное повышение анизотропии с увеличением уровня ВЧ-мощности связано с увеличением энергии ионов, движущихся перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Наиболее высокую анизотропию обеспечивают системы травления, работающие при низком давлении рабочего газа. При понижении давления, во-первых, возрастает длина свободного пробега ХАЧ, в результате чего вероятность их попадания на боковые стенки подвергаемых травлению элементов снижается. Во-вторых, одновременно возрастает импеданс (полное сопротивление) приэлектродного слоя и снижается рассеяние ионов, в результате чего возрастают их энергия, а следовательно, и анизотропия процесса. Аналогичный эффект наблюдается, если травление проводить в разрядах низкой частоты или же на постоянном токе, однако при этом возникают трудности в поддержании стабильного горения заряда при низком давлении.

Присущая РИТ сравнительно высокая анизотропия позволяет использовать его в качестве универсального процесса травления Si_3N_4 , поликристаллического кремния, фосфоросиликатного стекла и алюминия, то есть, по существу, всех материалов, которые применяются при изготовлении полевых транзисторов МДП-типа с элементами субмикронных размеров (около 0,6 мкм). Использование полого ВЧ-катода при постоянном давлении около 20 Па, реагента CF_4 и постоянного напряжения смещения на подложке (10–160 В) позволяет путем регулирования газового

потока изменять угол травления кремния и SiO_2 от 90° до 50°, получая при необходимости канавки V-образного профиля без подтравливания и эрозии маски.

2.1.3. Селективность

Селективность — это отношение скоростей травления двух различных материалов, например Si и SiO_2 , в одной и той же плазме. Для переноса изображения необходимо, чтобы материал подложки стравливался быстрее маскирующего слоя. Более того, часто бывает важно не допускать травления материалов, примыкающих сбоку или снизу к подвергаемой травлению области (подслоя при перетравливании или соседних областей, частично экспонированных через окно в маске). Уровень селективности должен быть достаточно высоким — во всех сухих литографических процессах маска в плазме должна удаляться без повреждения элементов рельефа, для создания которого она использовалась. Поэтому селективность является важной характеристикой плазменного травления при создании СБИС. Селективность процессов ВПТ связана с вероятностью образования при взаимодействии материалов с ХАЧ летучих и легкораспыляемых соединений. В настоящее время известны летучие фториды, оксифториды, хлориды и оксихлориды кремния и металлов.

Повышению селективности способствуют следующие факторы:

- оптимизация состава газовых смесей, обеспечивающих необходимый поток травящих и пассивирующих частиц;
- регулировка температуры пластины до минимально необходимой, при которой продукты реакции травления становятся летучими;
- управление энергией ионов до минимально необходимой для активации желаемой реакции;
- удаление с поверхности слаболетучих химических веществ, являющихся травителями других, не входящих в задачу удаления, пленок;
- установление баланса между осаждением и удалением центров пассивации-рекомбинации таким образом, чтобы они удалялись с поверхности слоя, подвергаемого травлению, и оставались на фотопризисте, нижележащем слое и боковых стенках формируемого рельефа.

Таким образом, очевидно, что селективность понижается при использовании высоких мощностей, температуры и напря-

жения смещения на подложкодержателе. При высокой температуре скорости процессов, протекающих с разной энергией активации, имеют тенденцию к выравниванию, что, естественно, плохо для селективности: скорость удаления обрабатываемой пленки становится соизмеримой со скоростью удаления резиста и подслоя. Тем не менее, в реакторах, предназначенных для индивидуальной обработки пластин, необходимо обеспечивать высокую скорость травления для достижения требуемой производительности. В то же время важно подчеркнуть, что величина селективности является основным критерием качества плазменного травления. Важнейшим условием качественного процесса высокоселективного анизотропного травления материала является низкая скорость эрозии резиста. Потеря более 20% толщины маски приводит к формированию полуизотропного профиля, даже если процесс сам по себе анизотропен.

Выбор газов и технологических параметров для селективного травления материалов остается важнейшей проблемой для специалистов. Приведем примеры, характеризующие влияние некоторых факторов на селективность травления. Состав рабочего газа — доминирующий фактор, определяющий селективность при реактивном ионном травлении материалов. В технологии СБИС почти исключительно применяют галогенсодержащие газы, обеспечивающие эффективное протекание физико-химических реакций с обрабатываемым материалом для его удаления; а для процессов РИТ — многокомпонентные смеси с одним либо двумя основными компонентами и добавками. Примером может служить травление Si и SiO_2 в смесях, содержащих CF_4 . При добавлении в рабочий газ кислорода, скорость травления Si и SiO_2 резко возрастает. Максимальная скорость травления для Si достигается при добавке 12% O_2 , а для SiO_2 — при добавлении 25% O_2 .

Добавлением в плазму CF_4 водорода либо водородсодержащего хладона (CF_3H) достигается повышение селективности травления SiO_2/Si , причем в основном за счет уменьшения скорости травления Si. В целом можно сказать, что скорость и селективность травления SiO_2/Si в плазме CF_4 можно регулировать путем добавления окисляющих или восстановляющих реагентов в рабочий газ. Добавка окислителя ускоряет травление Si по отношению к SiO_2 , а добавка восстановителя обеспечивает обратную селективность. Использование добавок высокомолекулярных хладонов с увеличенным содержанием углерода к фот-

ру также способствует повышению селективности в пользу SiO_2 . В то же время добавка Cl_2 к CF_4 либо переход к газовым смесям Cl_2 с Ar и добавками O_2 обеспечивают условия достижения высокой селективности Si (поликристаллический Si) к SiO_2 и Si_3N_4 .

Кроме состава газовой смеси существенное влияние на селективность оказывает уровень ВЧ-мощности и энергии ионов. В целом селективность РИТ Si/SiO_2 возрастает при уменьшении энергии бомбардирующих ионов, однако для получения большого значения селективности SiO_2/Si необходима высокая скорость РИТ SiO_2 , которая, в свою очередь, зависит от давления и плотности ВЧ-мощности. Низкое давление уменьшает вероятность полимеризации в плазме $\text{CF}_4 + \text{H}_2$, в то же время при давлении менее 3 Па затрудняется стабильное горение разряда и снижается скорость РИТ SiO_2 .

В системах РИТ заметное влияние на селективность также оказывает материал держателя подложек. При проведении процесса РИТ SiO_2 в газовом разряде CF_4 и использовании кварцевого держателя подложек SiO_2 , а также кремний имеют очень близкие значения скоростей травления при давлении 2–5 Па, причем с повышением давления скорость травления кремния возрастает в большей степени. В случае применения держателей из никеля и хрома скорость травления кремния уменьшается, а у SiO_2 почти не изменяется. Замена кварца фторопластом и графитом существенно увеличивает селективность травления SiO_2 по отношению к кремнию (примерно до 5 : 1). Этот эффект может быть обусловлен изменением отношения концентраций F/C в плазме в результате выделения групп C_nF_{2n} или распыления атомов углерода. Хотя применение фторопласта повышает селективность травления SiO_2 по отношению к кремнию, неконтролируемое выделение C_nF_{2n} вызывает флюктуации давления и нестабильное горение ВЧ-разряда, поэтому предпочтительны держатели из графита.

При использовании магнетронных систем максимальное значение селективности РИТ SiO_2 по отношению к кремнию наблюдается при значении магнитной индукции ~0,05 Тл. Здесь также большое влияние на селективность РИТ SiO_2 по отношению к кремнию оказывают добавки к основному газу. При добавке в плазму этилена и других углеводоров (например, CH_4) селективность РИТ SiO_2 существенно возрастает. Резкое увеличение селективности (примерно в 10 раз) в пользу кремния наблюдается при добавке в плазму CF_4 хлора. Этот эффект может быть объяснен тем, что за травление SiO_2 в основном ответственны моле-

кулярные ионы CF_3^+ , в то время как травление кремния обеспечивают атомы фтора и хлора. Малая скорость травления SiO_2 в смеси $\text{CF}_4 + \text{Cl}_2$ объясняется низкой способностью Cl_2 вступать в реакцию с SiO_2 , образованием пленки углерода при диссоциации CF_4 и существенной разницей энергий связи Si—Si (около 166 Дж/моль) и Si—O (около 332 Дж/моль). Большая селективность РИТ кремния по отношению к SiO_2 (до 100) может быть получена при проведении процесса в планарном реакторе со специальной конструкцией нижнего ВЧ-электрода, использовании смеси $\text{Ar} - \text{Cl}_2$ и особых условиях осаждения маскирующего слоя SiO_2 с одновременным строго контролируемым напуском кислорода. Кроме того, в плазме $\text{Ar} - \text{Cl}_2$ наблюдается высокое значение селективности РИТ кремния (100–500) по отношению к MgF_2 , Al_2O_3 , алюминию и хрому.

Таким образом, очевидно, что управление селективностью является многофакторной технологической задачей, учитывающей особенности самой системы травления, применяемых материалов оснастки, реагентов и параметров процесса.

2.1.4. Неравномерность

Главная задача любого процесса удаления материала — получить воспроизводимое вертикальное и горизонтальное травление в разных партиях пластин или на пластинах одной партии.

Допустимой нормой при анизотропном травлении структур можно считать неравномерность на уровне не более 10%. Травление субмикронных структур может потребовать равномерности на уровне нескольких процентов на всей площади пластины. К причинам неравномерности обработки можно отнести:

- вариации толщины и состава пленок по площади пластины;
- изотропную диффузию ионов и неравномерность концентрации травителя в реакторе;
- неравномерность распределения температуры;
- колебания в процессе травления значений мощности, частоты и давления;
- общее повышение уровня загрязнения элекгров и стенок.

2.1.5. Загрузочный эффект

Понятие «загрузочный эффект» отображает степень обеднения газовой фазы активным травителем вследствие его расхода в процессе травления [5, 6, 10]. При использовании одних плазменных травителей исходная, гладкая поверхность сохраняется, а при ис-

пользовании других она становится неровной или текстурированной, то есть ее площадь увеличивается в разы, что является одной из причин загрузочного эффекта.

Наличие загрузочного эффекта свидетельствует о том, что травление протекает с лимитирующей стадией доставки ХАЧ к поверхности (в ее диффузационной составляющей).

Загрузочный эффект можно устранить, используя плазму, в которой основной процент потерь травителя не зависит от реакции травления, или плазму, протекание реакции в которой реимитируется не подачей травителя, а интенсивностью ионной бомбардировки.

2.1.6. Текстура поверхности

Факторы, влияющие на текстуру поверхности при плазменном травлении, пока не вполне изучены [3–6]. Однако известно, что текстурирование возникает в случае преобладания химической составляющей травления. Бомбардировка энергетическими ионами приводит к неровности поверхности (например, на кремнии и его диокside после травления иногда видны бугорки или острые выступы субмикронных размеров). Появление текстуры и степень текстурирования зависят от типа плазмы, в которой предварительно обрабатывалась подложка, а также от материала реактора и наличия примесей. Реакторные материалы, такие как алюминий и оксид алюминия, и углеродсодержащие остатки из плазмы могут осаждаться или внедряться в поверхность подложек. Предполагают, что неровности поверхности могут быть обусловлены и присутствием небольшого количества нетравящихся примесей из реакторных электродов. Бугорки образуются вследствие различия в скоростях травления чистых областей и покрытых примесями. Если неровность обусловлена наличием примесей, то проблему можно решить заменой электродного материала [8, 10].

Таким образом, оценивая методы ИТ, ПХТ, РИТ, РТ по селективности, анизотропии, скорости травления, разрешения, профиля рельефа, равномерности травления и управляемости процессом, можно утверждать, что оптимальным методом является реактивное ионно-плазменное травление.

2.2. Факторы, определяющие основные технологические характеристики процессов ВПТ

В последнее время достигнуты определенные успехи в понимании влияния различных физических и химических параметров в процессе травления, что позволяет разрабатывать режимы, исходя из фундаментальных принципов. Для управления технологическими характеристиками процессов ВПТ наряду с частотой, мощностью и скоростью потока, температурой и материалами стенок могут использоваться и химические переменные.

2.2. 1. Энергия ионного воздействия

Хотя энергия ионного воздействия является своего рода производной от давления, частоты и мощности, все же необходимо подчеркнуть определяющее влияние этого параметра на технологические характеристики. Под действием ионной бомбардировки происходят диссоциация адсорбированных молекул рабочих газов, увеличивается скорость десорбции продуктов травления, происходит физическое распыление нелетучих и малолетучих продуктов травления, образуются новые активные центры взаимодействия на поверхности. Ионное воздействие увеличивает анизотропию, но снижает селективность.

Для некоторых материалов увеличение энергии ионного воздействия никоим образом не увеличивает скорость травления, как, например в случае кремния. Энергия активации процесса травления кремния фтором или хлором достаточно низка и не является лимитирующим фактором. В то же время для травления диокида кремния увеличение энергии ионного воздействия практически прямо пропорционально увеличивает скорость травления, что обусловлено высоким значением энергии разрыва связи Si—O.

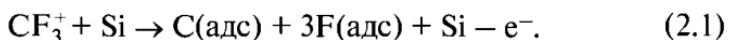
Для травления ряда материалов, не имеющих легколетучих соединений, физическое распыление энергетическими ионами аргона является единственной возможностью удаления их с поверхности.

Рассмотрим влияние энергии ионного воздействия на примере метода РИЛТ (реактивное ионно-лучевое травление).

При реактивном ионно-лучевом травлении поверхностные слои материалов удаляют физическим распылением молекулярными ионами или с помощью химических реакций с ХАЧ, образующимися при ударе молекулярных ионов о поверхность

материала. Активные химические частицы могут образовываться как при ударной диссоциации самого молекулярного иона, так и при диссоциации адсорбированных на поверхности материала молекул рабочего газа под действием ионной бомбардировки. Очевидно, что первый процесс будет основным при слабой адсорбции молекул рабочего газа к бомбардируемой поверхности материала, а второй — при сильной адсорбции.

При образовании ХАЧ по первому механизму молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность материала диссоциирует на атомы углерода и фтора, которые адсорбируются на активных центрах поверхности. Для кремния этот процесс можно представить в виде [3, 6]



Свободные атомы фтора вступают в химическую реакцию с поверхностными атомами кремния с образованием летучего соединения SiF_4 , которое десорбируется с поверхности пластины и переходит в газовую фазу. Атомы углерода не реагируют с кремнием и могут удаляться с поверхности пластины только в результате реакции



или физического распыления. Сродство атомов фтора к кремнию выше, чем к углероду, поэтому реакция

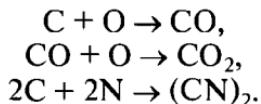


будет более вероятной, чем реакция (2.2).

Следовательно, при обработке поверхности кремния ионами CF_3^+ с энергией (E_u) меньше $1,6 \cdot 10^{-16}$ Дж (1 кэВ), при которой физическое распыление мало, возможно образование на поверхности пленки углерода. С увеличением энергии этих ионов вероятность образования углеродной пленки на поверхности кремния будет уменьшаться из-за ее физического распыления. Наличие углеродной пленки на поверхности кремния при его обработке низкоэнергетическими ($E_u < 1$ кэВ) ионами CF_3^+ и ее отсутствие при обработке высокоэнергетическими ($E_u > 1900$ эВ) ионами CF_3^+ подтверждено данными Оже-анализа.

Образование углеродной пленки на поверхности кремния объясняет тот факт, что коэффициент распыления (S_{pac}) кремния ионами CF_3^+ меньше, чем ионами Ar^+ с энергией меньше

1 кэВ (рис. 2.4, *a*), а скорость травления диоксида кремния ионами CF_3^+ больше, чем ионами Ar (рис. 2.4, *б*) [3, 6]. При травлении SiO_2 и Si_3N_4 углерод с поверхности может удаляться в результате реакций



Пленка углерода образуется на поверхности металлов Nb, Ta, W, Mo и других при их травлении низкоэнергетическими ионами CF_3^+ . Для предотвращения этого явления к рабочему газу добавляют кислород в количестве, не сильно увеличивающем скорость травления органических резистивных масок.

При РИЛТ очень важно правильно выбрать энергию молекулярных ионов — так, чтобы вероятность их диссоциации в результате удара о поверхность обрабатываемого материала была максимальной.

Необходимо отметить, что повышение энергии ионного воздействия выше 1 кэВ приводит к образованию нарушений поверхности в пределах нескольких атомных слоев, причем скорость галогенизации этих слоев намного превышает скорость обычного сухого химического травления. Скорость травления в вертикальном направлении также существенно возрастает, то есть повышается анизотропия.

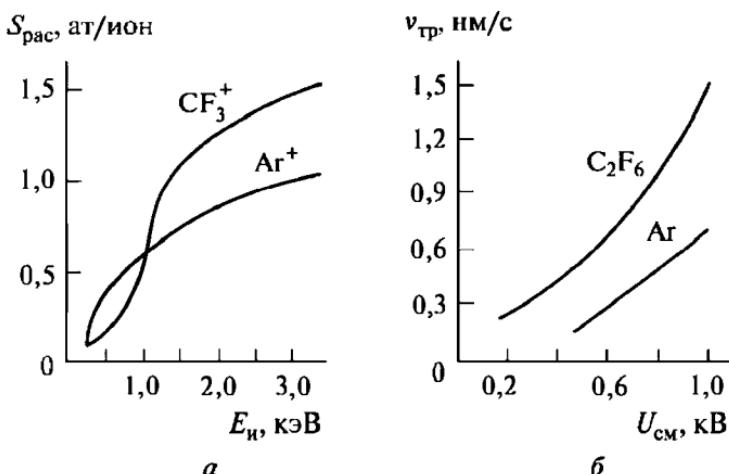
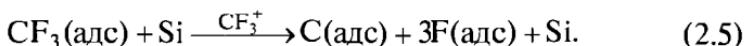
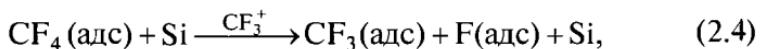
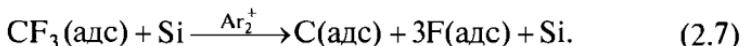


Рис. 2.4. Зависимости коэффициента распыления кремния от энергии ионов (*а*) и скорости травления диоксида кремния от ускоряющего напряжения (*б*) в различных газах [5]

При сильной адсорбции молекул рабочего газа на поверхности подвергаемого РИЛТ материала химически активные частицы образуются в результате протекания следующих реакций:



Отметим, что в этом случае, когда роль ионов заключается только в диссоциации адсорбированных молекул рабочего газа, для генерации ХАЧ могут быть использованы ионы инертных газов, например аргона:



Такой способ был реализован, когда пучок ионов аргона подавался из автономного ионного источника, а поток нейтральных молекул рабочего газа (CCl_4) — из трубы, расположенной около поверхности обрабатываемого материала.

При сильной адсорбции молекул рабочего газа или молекул продуктов химических реакций к поверхности обрабатываемого материала нельзя проводить травление такого материала с заметными скоростями без ионной бомбардировки. Этим, в частности, объясняются очень низкие скорости травления SiO_2 в процессах плазменного и, особенно, радикального травления. Роль ионной бомбардировки будет возрастать также при травлении любых материалов с понижением давления, когда резко уменьшается скорость генерации ХАЧ в объеме реактора. Например, при давлении менее 0,13 Па кремний без воздействия ионной бомбардировки перестает травиться ХАЧ, образующиеся в плазме CF_4 (рис. 2.5).

2.2.2. Давление

Давление, наряду с прикладываемой мощностью, определяет энергию ионов. При увеличении давления и постоянном расходе газа возрастает число столкновений частиц, а средняя энергия электронов уменьшается. Поскольку энергия электронов определяет скорость генерации активных частиц, скорость РИТ при увеличении давления уменьшается. В реакторах РИТ-низкого давления невоспроизводимость уровня давления приводит к нарушению равномерности обработки, а также к неконтроли-

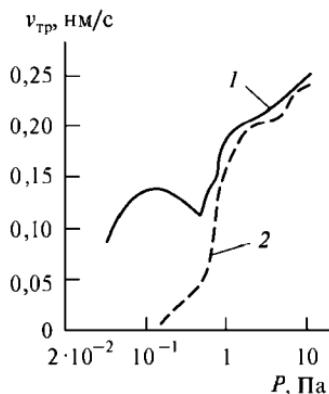


Рис. 2.5. Зависимость скорости травления Si(100) химически активными частицами, образующимися в плазме CF_4 в автономном источнике, от давления CF_4 в реакторе с ионной бомбардировкой поверхности (1) и без нее (2) при мощности заряда 120 Вт, частоте 2,45 ГГц [5]

руемому подтраву материала под маску. В реакторах РИТ-высокого давления отклонение уровня давления от заданного приводит к неустойчивому горению разряда и, следовательно, к снижению равномерности обработки, невоспроизводимости средней скорости травления и т. д.

Летучесть продуктов реакции и скорость их десорбции растут при снижении давления, поэтому скорости реакций, для которых лимитирующей стадией является удаление продуктов взаимодействия, при уменьшении давления увеличиваются.

В области средних давлений (2–20 Па) в современных триодных системах с индуктивными источниками плотной плазмы можно наблюдать обратную картину, когда при травлении канавок в кремнии при росте давления от 0,5 до 10 Па скорость травления возрастает в несколько раз и увеличивается селективность к маске при сохранении высокой анизотропии.

2.2.3. Мощность газового разряда

В условиях РИЛТ-процессов во фторуглеродных газах и их смесях с кислородом с увеличением мощности разряда $W_{\text{раз}}$ скорость травления материалов вначале линейно возрастает, как и при травлении в инертных газах. Однако по достижении некоторого критического значения $W_{\text{раз}}$ рост скорости травления резко замедляется и даже пойти на спад, что не наблюдается для инертных газов.

Критическое значение $W_{\text{раз}}$ зависит от содержания кислорода в составе рабочего газа и в молекуле подвергаемого травлению материала. Чем больше содержание кислорода, тем выше критическое значение мощности разряда. Например, при РИЛТ кремния в CF_4 оно составляет 96 Вт, а в смеси $\text{CF}_4 + 16\% \text{ O}_2$ — 140 Вт (рис. 2.6) [3, 5]. Это явление связано с тем, что при высоких мощностях разряда, а следовательно, энергиях и плотностях ионного потока, происходит большая высадка углерода на поверхность обрабатываемого материала. Углеродная пленка уменьшает скорость травления, особенно не содержащих кислород материалов. Этим объясняется также высокая селективность травления SiO_2 относительно кремния во фторуглеродных газах по сравнению с травлением в аргоне. Таким образом, процессы РИЛТ с более высокими мощностями разряда в ионном источнике способствуют повышению селективности травления кислородсодержащих материалов относительно не содержащих кислород. Увеличение содержания кислорода в рабочем газе предотвращает образование углеродной пленки на поверхности не содержащих кислород материалов.

Приложенная мощность влияет на распределение электронов по энергии, которое определяет генерацию активных частиц в результате процессов столкновений электронов с молекулами газа. Следовательно, в общем случае по мере увеличения мощности скорость травления монотонно возрастает. Однако в процессах РИЛТ увеличение мощности может привести к более интенсивной ионной бомбардировке, снижению селективности, деградации

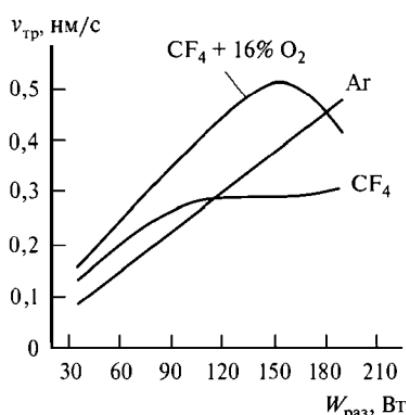


Рис. 2.6. Зависимость скорости травления кремния в различных газах от мощности разряда при $P = 0,3$ Па

фоторезиста, усилинию загрузочного эффекта и повышению неравномерности травления. Кроме того, повышение ВЧ-мощности не компенсирует обеднения реагента, поскольку возрастание скорости генерации активных частиц не обязательно сопровождается увеличением скорости их потребления. Поэтому при работе в режиме РИТ для снижения загрузочного эффекта целесообразны большие расходы газа и высокая скорость откачки, обеспечивающая низкое давление (менее 10 Па) и относительно низкий уровень мощности, с целью предотвращения негативных эффектов, упомянутых выше. При этом общая скорость травления и производительность могут понизиться, хотя и достигается максимальная селективность и воспроизводимость критических размеров.

По тем же причинам травление часто выполняется в два этапа: вначале с высокой скоростью удаляется основная часть пленки, а завершающая стадия процесса проводится при уменьшенных значениях потребляемой мощности или с менее активными реагентами.

Резюмируя, можно сказать, что увеличение мощности разряда при различных методах ВПТ однозначно приводит к увеличению числа активных частиц, ионов, росту энергии ионного воздействия, тепловой нагрузки, но ее влияние на ряд других технологических характеристик не столь однозначно. Увеличение мощности может приводить и к росту скорости травления, и к ее снижению; то же можно сказать и об анизотропии, и о селективности травления, когда может снижаться скорость травления основного слоя, но еще более сильно — скорость травления нижележащего слоя.

2.2.4. Температура стенок, подложкодержателя и обрабатываемой поверхности

Температура стенок играет заметную роль в процессах, где велика роль пассивирующих компонентов. Высаживание пленок на стенках повышает гетерогенную гибель активных частиц и изменяет химию газового разряда. Для снижения скорости высаживания пленок необходимо поднимать температуру стенок до уровня 60–120 °С. В современных установках, регулируя температуру стенок, повышают селективность процессов и снижают уровень привносимой дефектности при обработке определенного количества пластин.

Температура подложкодержателя для увеличения адсорбции активных частиц должна быть обязательно ниже температуры стенок. Снижение температуры подложкодержателя обеспечи-

вает повышение селективности травления материалов ИС к фоторезистивным маскам либо одного материала по отношению к другому. Однако при травлении некоторых материалов, например алюминиевых сплавов, для повышения десорбции продуктов травления необходимо поддерживать температуру не ниже значения 35–40 °C, подавляя тем самым ускоренное развитие коррозии.

Температура обрабатываемой поверхности является важным фактором, влияющим на процесс реактивного ионно-плазменного травления. В результате ионной бомбардировки, излучения плазмы и химической реакции на поверхности, подвергаемой РИПТ, выделяется большое количество теплоты, и температура поверхности повышается. Скорость физического распыления материалов не зависит от температуры вплоть до 700 К. Однако на скорость гетерогенной химической реакции температура может оказывать двоякое действие. В химической реакции можно выделить три стадии: хемосорбцию активных частиц на поверхности материала, химическое взаимодействие этих частиц с поверхностными атомами материала с образованием продуктов реакции и десорбцию продуктов реакции с поверхности. Если лимитирующей стадией является адсорбция, скорость которой уменьшается с ростом температуры, то очевидно, что скорость РИПТ будет также снижаться. Например, при РИПТ кремния в плазме Cl₂ и CCl₄ с ростом температуры скорость травления уменьшается [3].

Если лимитирующей является стадия химического взаимодействия или десорбция продуктов реакции, скорость которых увеличивается с ростом температуры, то скорость РИПТ будет также увеличиваться.

При решении вопроса о температуре подложкодержателя одновременно решается вопрос обеспечения теплового контакта пластины с подложкодержателем. Для отвода тепла в основном применяют гелий, обладающий максимальной теплоемкостью и, соответственно, лучше передающий тепло от пластины к термостабилизированному подложкодержателю. Прижатие пластины осуществляют либо механическим прижимным кольцом, либо электростатическим прижимом (ESC-прижим).

2.2.5. Газы и газовые смеси, применяемые для сухого травления различных материалов

Подходящий выбор травящего газа плазмы необходим для достижения удовлетворительного профиля травления, равномерности процесса, контролируемой селективности и необходимой производительности.

Процесс, в котором поверхность пластины бомбардируется пучком ионов аргона или в котором на поверхности происходит химическая реакция с такими активными частицами плазмы, как фтор или хлор, является составной частью общего процесса переноса изображения ИС на поверхность пластины. Плазменное травление в процессе изготовления ИС обычно повторяется много раз. Центральный вопрос в плазменном травлении высокого разрешения — это контроль профиля, то есть контроль точной формы остатка материала после процесса травления. Подтравливание ведет к уменьшению ширины травимой линии относительно заданного значения.

Изменение концентрации компонентов в смесях для плазменного травления дает возможность формировать желаемые профили от полностью изотропных, когда профили стенок травления имеют форму четверти круга, до полностью анизотропных, когда стенки вертикальны.

Успешное проведение процесса ПХТ в основном определяется правильным выбором рабочего вещества: газа или смеси газов. В качестве рабочих веществ используются главным образом галогенсодержащие и инертные газы, легколетучие жидкости, кислород и водород. Кислород и галогены — наиболее сильные окислители, водород — эффективный восстановитель. Радикалы и ионы, образующиеся в электрическом разряде на этих газах, способны взаимодействовать практически со всеми материалами.

Необходимо, чтобы энергетические частицы реактивной плазмы образовывали с обрабатываемым материалом летучие соединения при достаточно низких температурах. Их испарение с поверхности и последующая откачка обеспечивают необходимое удаление обрабатываемого материала. Формирование нелетучего соединения останавливает или значительно затормаживает процесс ПХТ.

Для травления металлов, кремния, кремнийсодержащих соединений и других материалов используются различные газы: $(CF_4, C_2F_6, CCl_4, CClF_3, CCl_2F_2, SiF_4, XeF_2, SF_6, BCl_3, NF_3)$,

$\text{CF}_4 + \text{HBr}$) и их смеси друг с другом с кислородом, азотом, инертными газами [6–13]. При плазмохимическом удалении фотополимера с подложек основным рабочим газом является O_2 [6]. Для травления поликристаллического кремния используют плазму галогенсодержащих газов (например, фторсодержащие газы CF_4 , C_3F_8 , CF_3Br , SF_6 [30] и эти газы с разными добавками). Для анизотропного травления поликристаллического кремния наиболее широко применяются газы и газовые смеси, содержащие хлор, но подходят и бромсодержащие аналоги хлорсодержащих газов. Наиболее широко используемые для травления различных материалов газовые смеси приведены в табл. 2.1 [6–13].

Таблица 2.1

Газовые реагенты для травления различных материалов

Материал, подвергаемый травлению	Рабочий газ
Al	Cl_2 , BCl_3 , CCl_4 и их смеси с N_2 и инертными газами
C (органические материалы, например, фотополимеры)	O_2 , H_2 и их смеси с азотом и инертными газами
Si, Si_3N_4	CF_4 , SiF_4 , SF_6 , CF_3Cl , NF_3 и их смеси с кислородом и инертными газами
SiO_2	CHF_3 , C_3F_8 , $\text{CF}_4 + \text{H}_2$
Ti, W, Nb, Mo, Ta, V	$\text{CF}_4 + \text{O}_2$
Cr, Au, Pt	CCl_4 , CF_3Cl , CF_2Cl_2 и их смеси с кислородом и инертными газами
Полупроводниковые соединения типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$	CCl_4 , CF_2Cl_2 и их смеси с кислородом и инертными газами
Нержавеющая сталь, пермалой, гранаты, Fe, Ni, Cu, Ag	Ar , Xe

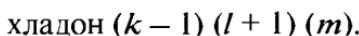
Возможность использования водородной плазмы для ПХТ определяется тем, что атомы водорода образуют со многими материалами летучие гидриды. Водород, в отличие от галогенсодержащих газов, не вызывает деградацию (разложение) вакуумных масел, что увеличивает срок службы откачных средств вакуумной системы.

Наиболее широко галогенсодержащие рабочие вещества для ПХТ представлены хладонами. Хладоны (они же фреоны), пред-

ставляют собой при нормальных условиях галогенсодержащие органические жидкости или газы. Это высокостабильные и в обычных условиях слабо реакционноспособные вещества. Необходимые для осуществления процессов травления атомы галогенов в хладонах прочно связаны с углеродом. Покажем, как связано название хладона с его химической формулой. Общая формула соединений класса хладонов имеет вид:



где k, l, m, n — количество атомов углерода, водорода, фтора и хлора (брома) в молекуле хладона. Название (номер) соответственно записывается так:



Легко понять, почему четырехфтористый углерод CF_4 называется хладон 14, а трифторметан CHF_3 , соответственно, хладон 23.

Скорость травления зависит от скорости генерации активных частиц, скорости их потребления и скорости удаления продуктов реакции. Избыточный расход газа при постоянном давлении приводит к уменьшению времени пребывания частиц в зоне разряда и, следовательно, к уменьшению скорости генерации активных частиц, если мощность поддерживается постоянной. В противном случае при сравнительно малых расходах газа обеднение среды в процессе травления также приводит к снижению скорости травления. Пример, отражающий такую закономерность, приведен на рис. 2.7.

Проблему увеличения концентрации активных частиц и возникновения бокового подтравливания в конце процесса травления при уже небольшой площади обрабатываемой пластины иногда удается решить за счет правильного выбора материалов для электродов, которые могут действовать как поглотители активных частиц.

Газовые смеси, применяемые для травления канавок в кремнии. Основными газами, применяемыми для травления Si, являются CF_4 , SiF_4 , SF_6 , CF_3Cl , NF_3 , HF , Cl_2 , Br_2 , HCl , HBr и их смеси с кислородом и инертными газами. То есть газовые смеси можно разделить на фтор- и хлорсодержащие. Фторсодержащие — CF_4 , $\text{CF}_4\text{—O}_2$, SF_6 , $\text{C}_2\text{F}_6\text{—O}_2$, NF_3 , $\text{HBr}\text{—SF}_6\text{—O}_2$. Хлорсодержащие — Cl_2 , $\text{CCl}_4\text{—N}_2$, $\text{CCl}_4\text{—Cl}_2\text{—Ar}$, $\text{Cl}_2\text{—Ar}$, CCl_4 , HCl , $\text{BCl}_3\text{—O}_2$, $\text{Cl}_2\text{—SF}_6$, $\text{HBr}\text{—Cl}_2\text{—O}_2$. Стабильными и летучими продуктами реакции взаимодействия с кремнием являются SiF_2 , SiF_4 , SiCl_4 .

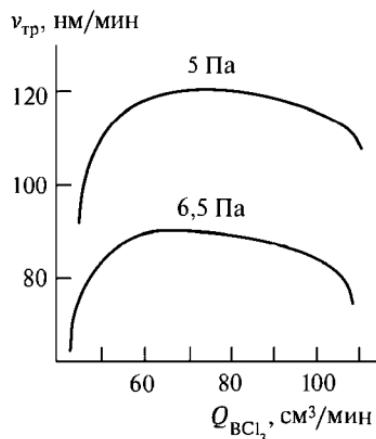


Рис. 2.7. Скорость травления сплава Al–Si(2%) при различном давлении

У фторсодержащих смесей есть большой недостаток — они обычно непригодны для травления элементов с размерами 1–2 мкм и менее из-за сильного избыточного подтравливания. Однако применение достаточного количества пассивирующего компонента этот недостаток устраняет. Профиль элементов сильно зависит от соотношения скоростей бокового травления и травления в глубь материала, стимулируемого ионной бомбардировкой, а также от соотношения активных и пассивирующих частиц. Увеличение анизотропии травления возможно за счет уменьшения потока атомов фтора или за счет увеличения энергии ионов, однако и то и другое ведет к уменьшению селективности к диоксиду кремния. В том же случае, когда необходимы и анизотропия, и селективность, предпочтитают хлорсодержащие смеси. В условиях ионной бомбардировки атомы хлора травят кремний анизотропно, а селективность обеспечивается за счет медленного травления диоксида кремния. Еще более лучший результат получают при использовании смесей типа HBr + Cl, когда достигается и высокая селективность, и анизотропия, и приемлемая скорость травления.

При использовании хлорфторуглеродов и их смесей с другими реагентами, таких как $\text{C}_2\text{F}_6-\text{Cl}_2$, CCl_3F , CCl_2-F_2 , $\text{CCl}_2\text{F}_2-\text{O}_2$, получается гладкий вертикальный профиль. В случае хлорфторуглеродов атомы хлора являются основным травящим агентом, поскольку связь C—F прочнее, чем связь C—Cl.

Есть еще один вид травителей — бромсодержащие: CBrF_3 , CBrF_3-O_2 . Применение смеси CBrF_3-O_2 (5–10%) предотвращает образование нелетучего продукта реакции, иногда вызыва-

ющегоНо потемнение поверхности и повышенную шероховатость кремния. Однако эти смеси не нашли большого применения из-за малой скорости травления.

Нелегированный кремний травится хлором анизотропно, а легированный в отсутствии пассивирующей составляющей — изотропно, но при правильно подобранный пассивирующей компоненте — анизотропно.

2.2.6. Материалы внутрикамерной оснастки

Наиболее очевидным критерием для выбора материала электродов является их физическая и химическая стойкость по отношению к среде процессов РИТ [6]. Материал электродов, особенно катода должен быть инертен, поскольку химическое взаимодействие может быть использовано для управления радиальной равномерностью травления и загрузочным эффектом при травлении кремния, например, на электродах с кремниевым покрытием. Покрытия из углерода, фторопласта или других органических соединений создают большие поверхности, нейтрализующие атомы фтора из фторуглеродной плазмы, используемой для травления SiO_2 . Стенки камеры и поверхность электродов недолго остаются в своем первоначальном состоянии, так как пленки нелетучих галогеносодержащих соединений, оксидов и даже полимеров, осаждающихся на них, делают их химически инертными. Ионная бомбардировка в условиях РИТ может вызвать нежелательные процессы распыления и переосаждения. Некоторые конструкционные материалы представлены в табл. 2.2.

К каждой части оснастки при разных операциях травления предъявляются определенные требования.

Стенки реактора для предотвращения осаждения полимера должны быть прогреваемыми до минимально необходимой температуры, гладкими и минимально взаимодействовать с плазмой (продукты взаимодействия плазмы и материала стенок не должны травить или полимеризоваться на подложке).

Материал электродов должен быть инертен по отношению к ХАЧ плазмы и иметь близкие с материалом стенок коэффициент гибели частиц. Чем дольше электроды служат, тем дешевле процессы травления. С этой целью электроды делают из сильно анодированного алюминия.

Применение алюминия, кварца, фторопласта обусловлено низкими коэффициентами их распыления и минимальным влиянием этих распыленных материалов на подложку. Однако есть

Таблица 2.2

**Конструкционные материалы
для травления различных материалов**

Материал, подвергаемый травлению	Конструкционные материалы
Al	Нержавеющая сталь, оксид алюминия, фторопласт-4, кварц, стекло, химически стойкие эластомеры
C (органические материалы)	Кварц, оксид алюминия, фторопласт-4, химически стойкие эластомеры
Si, Si ₃ N ₄	Алюминий, нержавеющая сталь, кварц, фторопласт-4, химически стойкие эластомеры
SiO ₂	Алюминий, оксид алюминия, нержавеющая сталь, фторопласт-4, химически стойкие эластомеры
Ti, W, Nb, Mo, Ta, V	То же и кварц
Cr, Au, Pt	Нержавеющая сталь, оксид алюминия, кварц, фторопласт-4, химически стойкие эластомеры
Полупроводниковые соединения типа A ^{III} B ^V	То же
Нержавеющая сталь, пермалloy, гранаты, Fe, Ni, Cu, Ag	Оксид алюминия, кварц, фторопласт-4, химически стойкие эластомеры

и негативные моменты: применение фторопласта, например, приводит к образованию газообразных соединений при проведении процесса травления, что обуславливает тем самым нестабильность; кварц плохо передает теплоту и может являться дополнительным источником кислорода.

2.2.7. Загрязнения

Основной недостаток плазменного травления по сравнению с жидкостным химическим травлением состоит в том, что при плазменном травлении труднее добиться селективного травления. Более значительно и загрязнение и повреждение пластин, так как ионы и быстрые незаряженные частицы имеют энергию, достаточную для удаления металлических, неорганических и органических пленок и их переосаждения на поверхность подложки. Ионы из плазмы могут имплантироваться в поверхность

Таблица 2.3

Проявление загрязнений при различных механизмах воздействия

Источники загрязнений	Механизм проявления загрязнений		
	Физическое распыление	Плазмо-образованные полимеры	Переосаждение
Электрод и реактор	Сильное (возрастает с увеличением атомной массы)	Не влияют	Не влияют
Травитель	Слабое влияние (связано с фрагментацией ионов)	Сильное влияние (связано с полимеризацией)	Сильное влияние (вследствие образования нелетучих продуктов)
Материал подложки	Не влияет	Не влияет	Сильное влияние (вследствие образования нелетучих продуктов)
Увеличение потока частиц на подложку	Сильно увеличивается	Достигает насыщения при увеличении давления газа	Немного возрастает
Увеличение давления	Уменьшается (из-за переосаждения распыленных частиц на мишень)	Достигает насыщения при увеличении плотности тока	Увеличивается (вследствие затруднения диффузии частиц травителя)
Возрастание потока газа	Не влияет	Экстремальная зависимость с минимумом	Не влияет
Повышение температуры подложки	Не влияет	Немного уменьшается	Не влияет

полупроводника или, например, окислять примесные атомы фосфора и мышьяка. Но благодаря тому, что энергия этих ионов мала, они проникают на глубину не более 1–2 монослоев и их влиянием можно пренебречь.

Различают четыре основных источника загрязнений:

- распыленные металлы;
- диэлектрические осаждения;
- остаточные загрязнения после травления;
- радиационные повреждения.

Физическое распыление, переосаждение материала электродов и осаждение полимеров, образующихся в тлеющем разряде — основные процессы, приводящие к загрязнениям и радиационным повреждениям (табл. 2.3).

2.3. Методы вакуумно-плазменного травления

Вакуумно-плазменное травление (ВПТ) осуществляется в неизотермической (неравновесной) низкотемпературной («холодной») газоразрядной плазме низкого давления, в которой средняя энергия электронов значительно (в 10–100 раз) превышает энергию ионов, атомов, молекул и радикалов. По механизму взаимодействия плазмы с поверхностью обрабатываемого материала различают три основных вида ВПТ (см. рис. 1.2) [3–6].

2.3.1. Ионное травление

Ионное травление (ИТ, ion etching) — это процесс, при котором поверхностные слои материалов удаляются только в результате физического распыления. Распыление осуществляется энергетическими ионами газов, которые не вступают в химические реакции с обрабатываемым материалом (обычно это ионы инертных газов). Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то травление в таких условиях называют ионно-плазменным (ИПТ, sputter etching). Если же материал помещен в вакуумную зону обработки, отделенную от области плазмы, то травление называют ионно-лучевым (ИЛТ, ion beam etching, ion beam milling).

2.3.2. Плазмохимическое травление

В плазмохимическом травлении (ПХТ, plasma chemical etching) поверхностные слои материалов удаляются только в результате химических реакций между химически активными частицами (ХАЧ) и атомами травимого вещества. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то травление называют плазменным (ПТ, plasma etching). В этом случае химические реакции травления на поверхности материала будут активироваться с по-

мощью бомбардировки низкоэнергетических электронов и ионов, а также фотонной бомбардировки. Если же материал находится в вакуумной зоне обработки, обычно называемой в этом случае реакционной зоной и отделенной от области плазмы, то травление производят ХАЧ без активации электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия фотонов. Такое травление называют радикальным (PT, etching by reactive gas species) [3–6].

2.3.3. Реактивно-ионное травление

Ионно-химическое или реактивно-ионное травление (РИТ, reactive ion etching) — это процесс, при котором поверхностные слои материала удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химических реакций между ХАЧ и поверхностными атомами материала. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы, то травление в этих условиях называют реактивным ионно-плазменным (РИПТ, reactive sputter etching). Тогда ХАЧ могут доставляться к поверхности материала из плазмы разряда или образовываться на поверхности при ударной диссоциации молекулярных ионов или нейтрализации атомарных ионов. На поверхность материала можно воздействовать также с помощью электронной и фотонной бомбардировок. Если травление материала происходит в вакуумной зоне обработки, отделенной от области плазмы, то процесс травления называют реактивным ионно-лучевым (РИЛТ, reactive ion beam etching). В этом случае поверхность материала подвергается воздействию только молекулярных или атомарных ионов, которые при ударной диссоциации или нейтрализации могут образовывать ХАЧ (иногда используют и фотонную бомбардировку).

Реактивное ионно-плазменное травление отличается от реактивного ионно-лучевого тем, что поверхность обрабатываемого материала наряду с бомбардировкой положительными молекулярными ионами подвергается воздействию свободных атомов, радикалов, отрицательных ионов, электронной бомбардировке и электромагнитному излучению плазмы. Например, при РИПТ в наиболее часто применяемом газе SF_6 на поверхность воздействуют атомы, ионы и радикалы SF_3 и F .

В низкотемпературной плазме газовых разрядов пониженного давления степень ионизации обычно не превышает нескольких процентов, тогда как концентрация незаряженных ХАЧ может достигать нескольких десятков процентов. Поэтому

при высокой химической активности незаряженных ХАЧ к обрабатываемому материалу они вносят основной вклад в скорость травления материала. Например, кремний при РИПТ в SF_6 удаляется в основном в результате реакции $Si + 4F \rightarrow SiF_4 \uparrow$. Однако при невысокой химической активности свободных атомов и радикалов к обрабатываемому материалу или при образовании нелетучих продуктов реакции основной вклад в травление материала вносит процесс физического распыления. Это происходит, например, при травлении кремния и его соединений в ненасыщенных или водородсодержащих фторуглеродах, при травлении кремния и оксида алюминия в хлорсодержащей плазме, при травлении ниобата лития в плазме SF_6 .

Отметим, что совокупный вклад процессов физического распыления и удаления материала в результате химических реакций при РИПТ не может быть оценен аддитивно, то есть суммарное удаление материала при проведении двух процессов одновременно намного больше суммы удаляемых материалов каждого процесса.

Если энергия бомбардирующих поверхность ионов становится меньше 100 эВ, вклад физического распыления в травление материала будет несущественным (коэффициент распыления меньше 0,1 атом/ион), в этом случае травление переходит в плазменное. При ПТ роль низкоэнергетической ионной и электронной бомбардировки заключается в стимуляции и активации химических реакций. Так как энергия ионов, бомбардирующих материал, сильно зависит от вида рабочего газа, уровня ВЧ-мощности и геометрических параметров системы травления, то в некоторых случаях в одной и той же системе могут быть реализованы и процесс РИПТ, и ПТ.

Например, в планарной диодной высокочастотной системе с катодной связью при одной и той же мощности ВЧ-генератора отрицательное напряжение смещения потенциального электрода уменьшается от 900–800 В в плазме CCl_4 до 30–25 В в плазме $C_2Cl_3F_3$. Очевидно, что в этой системе в плазме CCl_4 реализуется процесс РИПТ, а в плазме $C_2Cl_3F_3$ — процесс ПТ [6]. Аналогичным образом, при одинаковой ВЧ-мощности увеличение межэлектродного расстояния l_{mz} в такой системе уменьшает энергию бомбардирующих ионов. Следовательно, при малых значениях l_{mz} можно реализовать процесс РИПТ, а при больших — процесс ПТ. Для постоянного l_{mz} процесс РИПТ можно реализовать при больших ВЧ-мощностях, а ПТ — при малых.

В условиях РИПТ скорость травления материалов возрастает с увеличением мощности разряда в системе или плотности мощности на мишени $\omega_{\text{раз}} = W_{\text{раз}} / \sigma_{\text{миш}}$ ($\sigma_{\text{миш}}$ — площадь мишени), причем при малых мощностях зависимость $v_{\text{тр}}$ от $W_{\text{раз}}$ ($\omega_{\text{раз}}$) линейна во всех системах РИПТ. Скорость травления кремния в CF_4 в 3–10 раз выше, чем в Ar, потому что удаление материала в случае CF_4 происходит вследствие совместного действия физического распыления и химической реакции [3]. При низких мощностях разряда химическая реакция вносит основной вклад в процесс удаления кремния. В случае высоких мощностей разряда угол наклона кривых $v_{\text{тр}} = f(W_{\text{раз}})$ для Ar и SF_6 становится одинаковым, что свидетельствует о том, что процесс удаления материала в результате химической реакции достигает насыщения, и дальнейший вклад в увеличение скорости травления материала вносит только физическое распыление.

Давление рабочего газа в системе существенно влияет на характеристики процессов РИПТ. Диодные ВЧ-системы с анодной связью работают в диапазоне значений давления 10–100 Па, диодные ВЧ-системы с катодной связью — в диапазоне 1–10 Па, ВЧ-системы с магнитным полем — 0,1–1 Па. В ситуации постоянного расхода рабочего газа с увеличением давления скорость травления сначала возрастает, достигая максимума, а затем снижается.

Начальное возрастание скорости травления с ростом давления можно объяснить увеличением числа энергетических и химически активных частиц, связанным с повышением концентрации молекул рабочего газа. Однако с ростом давления уменьшается длина свободного пробега электронов плазмы, и при определенном ее значении электроны не успевают приобрести под действием электрического поля энергию, достаточную для осуществления эффективной ионизации и диссоциации молекул рабочего газа. Следовательно, концентрация энергетических и химически активных частиц в плазме снижается, а соответственно, уменьшается и скорость травления. С увеличением давления уменьшается энергия ионов, бомбардирующих поверхность обрабатываемого материала, и при давлении выше 100 Па характеристики РИПТ приближаются к характеристикам ПТ.

Если стадия доставки энергетических частиц и ХАЧ является лимитирующей, то скорость травления материалов при постоянном давлении возрастает с увеличением расхода рабочего газа, достигает максимума, что связано с увеличением доставки ХАЧ

к поверхности обрабатываемого материала, а при дальнейшем увеличении расхода газа скорость травления будет уменьшаться, так как ХАЧ будут уноситься потоком газа и откачиваться, не успев вступить в реакцию с обрабатываемым материалом. Наличие загрузочного эффекта отмечается в диодных ВЧ-системах с катодной и анодной связями при травлении алюминия и его сплавов в хлорсодержащей плазме, кремния во фторсодержащей плазме, титана, молибдена, вольфрама, ниобия и tantalа во фторсодержащей плазме. Отметим, что подавлению загрузочного эффекта при травлении материалов способствует выбор материала стенок реактора, электродов и внутrikамерной оснастки. При РИПТ больших поверхностей материала, обладающего высокой химической активностью к генерируемым ХАЧ, скорость травления стремится к уровню, определяемому физическим распылением.

Равномерность травления каждой обрабатываемой подложки и всех подложек в партии должна быть высокой. Она определяется в основном двумя факторами: равномерностью доставки ХАЧ к поверхности и равномерностью распределения температуры. Преобладание влияния того или иного фактора на равномерность травления определяется лимитирующей стадией конкретного процесса. Если лимитирующей является стадия доставки ХАЧ, то равномерность травления определяется равномерностью распределения ХАЧ у поверхности обрабатываемого материала.

Так как в процессе РИПТ участвуют как заряженные частицы, так и свободные атомы и радикалы, то равномерность доставки ХАЧ зависит от распределения ионного тока и газового потока по поверхности образцов. В данном случае равномерность травления практически не зависит от распределения температуры и концентрации активных центров по поверхности материала. Равномерности распределения ионного тока добиваются созданием равномерной плотности плазмы с помощью специальной конструкции электродов, экранов и реактора, а также подбором соответствующих параметров процесса (давления, мощности и др.). Равномерность газового потока обеспечивают его оптимальной организацией с помощью геометрии и определенного расположения коллекторов и откачных отверстий.

Если лимитирующей является стадия химической реакции, то равномерность травления определяется в основном распределением температуры и концентрации активных центров на поверхности материала. В этом случае равномерности РИПТ добиваются, обеспечивая одинаковую температуру обрабатыва-

мых образцов и ее стабилизацию. Для этого чаще всего обрабатываемые подложки размещают на поверхности водоохлаждаемого электрода.

При получении микротопологии в производстве полупроводниковых приборов и ИС часто требуется травление конкретного слоя, лежащего на каком-то другом материале, через маску из органического или неорганического вещества. Определить момент окончания травления слоя материала — сложная техническая задача. Известно несколько способов точного установления момента окончания травления слоя, основанных на фиксации изменения окраски и коэффициента отражения травящихся слоев, на изменении вольтамперных характеристик между обрабатываемой подложкой и введенным в плазму зондом, на изменении масс-спектров и излучения продуктов реакций обрабатываемых материалов. Эти методы контроля имеют ряд недостатков. Например, многие из них применимы только для определенного и ограниченного класса материалов или необходимы контрольные пластины. Поэтому для устранения подтравливания нижележащего слоя желательно, чтобы скорость его травления была равна нулю или близкой к ней, то есть требуется высокая селективность травления (отношение скоростей травления различных материалов в одинаковых условиях).

Селективность процессов ИХТ в первую очередь регулируют составом используемого рабочего газа. Методами подбора компонентов рабочего газа и их количественного соотношения реализованы процессы селективного РИПТ в высокочастотной диодной системе с катодной связью таких важных в изготовлении ИС материалов, как кремний, поликристаллический кремний, диоксид кремния, нитрид кремния и алюминий. Ограничения селективности процессов в РИПТ связаны с физическим распылением материалов, травление которых нежелательно. Поэтому селективность травления в процессах РИПТ обычно составляет 5–30 и пока не превышает 50 [3].

Энергия ионов также существенно влияет на скорость и селективность РИПТ. Влияние это тем значительнее, чем более существенен процесс осаждения углеродных или органических пленок на поверхность материалов, подвергаемых травлению, то есть чем больше содержание в молекуле рабочего газа атомов углерода или водорода по сравнению с атомами галогенов. Например, если в планарной или цилиндрической высокочастотной диодной системе скорость травления материалов в плазме CF_4 практически не изменяется от того, куда помещен материал —

на заземленный или ВЧ-электрод, то в плазме C_2F_6 скорость травления материалов на ВЧ-электроде в 5–10 раз выше, чем на заземленном [3].

Разрешение процесса травления при условии селективности травления слоя к маске согласно формуле

$$P_{\max} = 6 \cdot 10^3 (\lambda_r / T_3) f(\lambda_r)$$

целиком определяется его анизотропией [3] (λ_r — средняя длина свободного пробега молекул рабочего газа, отнесенная к единичному давлению и $T = 273$ К, Па · м; T_3 — температура электронов, К; f — частота поля, Гц). Чем выше показатель анизотропии процесса травления, тем с меньшими искажениями размеров переносится рисунок с маски на слой рабочего материала и тем лучше это для получения субмикронных размеров. Анизотропия травления определяется направленным воздействием энергетических и химически активных частиц на поверхность материала.

При РИПТ электромагнитное поле, создаваемое ВЧ-напряжением, приложенным к электродам, обеспечивает бомбардировку материала заряженными частицами перпендикулярно его поверхности (если подложки расположены на электродах), что увеличивает скорость травления по нормали к поверхности относительно скорости бокового травления. Однако в РИПТ участвуют не только заряженные частицы, но и свободные атомы и радикалы, движение которых не столь упорядочено, как движение ионов и электронов. Поэтому процессы РИПТ обладают меньшей анизотропией, а следовательно, меньшей разрешающей способностью, чем РИЛТ. Направленность движения атомов и радикалов зависит от рабочего давления, температуры и способа подачи газа. Таким образом, подбирая параметры процесса, можно увеличивать анизотропию травления.

На анизотропию оказывают влияние также состав рабочего газа, вид обрабатываемого материала и маскирующего покрытия. Например, замена смеси $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ газом CF_3Cl , CBrF_3 или CBrF_3 (70 об.%) + Не (30 об.%) позволяет значительно повысить анизотропию РИПТ кремния, поликристаллического кремния и молибдена [3]. Увеличение анизотропии объясняется тем, что на поверхностях этих обрабатываемых материалов, подвергаемых ионной или электронной бомбардировке, реакция травления преобладает над реакцией рекомбинации радикалов с образованием исходных молекул рабочего газа. А так как боковые поверх-

ности элементов не подвергаются ионной бомбардировке, то травление происходит только по нормали к поверхности.

РИПТ некоторых материалов, в частности алюминия, реализуемое с высокой анизотропией возможно осуществить только через фоторезистивные маски. При травлении их через маски из SiO_2 и Si_3N_4 наблюдается подтравливание под слой маскирующего материала. Особенность РИПТ через фоторезистивные маски заключается в образовании тонкой пленки в несколько сотен ангстрем на боковых поверхностях элементов, подвергаемых травлению.

Показатель анизотропии травления определяет не только точность передачи размеров маски на рабочий материал и минимальный размер элементов, но и профиль края получаемых элементов. Иногда при получении микротопологии необходимо точное воспроизведение размеров маски с крутым краем травления. Если же требуется последующее нанесение на полученный рельеф диэлектрических и тонких металлических пленок, этот край должен быть пологим. Так, при РИПТ одной из основных проблем формирования многоуровневой металлизации является создание пологого края в слое диэлектрика. Обычно профиль диэлектрической пленки получается очень крутым и его очень трудно покрыть слоем металла без обрывов. Существует несколько способов получения пологого профиля при РИПТ.

Первый способ основан на разности скоростей травления стекол, в разной степени легированных фосфором. Например, пленка SiO_2 , содержащая 1–2% фосфора, травится в 2 раза быстрее, чем пленка SiO_2 , осажденная из паровой фазы при 623 К без фосфора [3]. При травлении двухслойного изолирующего стекла, в котором верхний слой обогащен фосфором, профиль травления имеет вид двух ступенек, закрыть которые вторым уровнем металла без разрывов значительно легче, чем одну ступеньку. Можно также использовать пленку SiO_2 , в которой имеется градиент концентрации фосфора, что легко достигается регулируемой подачей PH_3 в процессе нанесения. Профиль травления в этом случае имеет плавную кривизну, так как более легированные верхние слои травятся быстрее нижних. Таким образом, путем изменения профиля легирования можно получать различные профили травления.

Другой способ, позволяющий регулировать анизотропию травления, а следовательно, профиль края травления, применим к проводящим материалам и полупроводникам и основан на изменении ионной компоненты в потоке частиц, воздействующих

на поверхность обрабатываемого материала. Простой путь варьирования ионной компоненты состоит в регулировании подаваемого отрицательного электрического смещения на подложку относительно электрода, на котором она расположена. В исследовании травления кремния КДБ-7,5 (100) в диодной системе в ВЧ-разряде (частота 5,28 МГц) при расположении подложек на аноде и с SF_6 в качестве рабочего газа на пластины подавалось напряжение смещения относительно анода, варьируемое в пределах от -100 до $+100$ В. В результате изменялось отношение тангенциальной и нормальной составляющих профиля края рисунка травления [3].

Для процессов РИПТ характерны следующие значения показателя анизотропии A и предельного разрешения $L_{\text{мат}}$:

- для РИПТ в диодных ВЧ-системах с анодной связью $A = 5-10$, $L_{\text{мат}} = 0,6-0,4$ мкм;
- для РИПТ в диодных ВЧ-системах с катодной связью $A = 10-20$, $L_{\text{мат}} = 0,4-0,2$ мкм;
- для РИПТ в системах с магнитным полем при давлениях меньше 0,1 Па $A = 20-100$, $L_{\text{мат}} = 0,2-0,1$ мкм [3].

Если РИПТ осуществляется путем бомбардировки ионами с достаточно высокой энергией, это может вызвать нарушения структуры поверхностных слоев обрабатываемых материалов, загрязнение их поверхностей распыленными частицами электродов и внутренней оснастки, деградацию электрофизических параметров обрабатываемых слоев и границ раздела между слоями, ухудшение рабочих параметров создаваемых приборов. Однако травление материалов под действием химических реакций в процессах РИПТ значительно уменьшает вышеупомянутые опасности по сравнению с процессами ИТ. Например, если скорость удаления материала в результате химической реакции достаточно высока, то нарушенные ионной бомбардировкой слои успевают стравиться, прежде чем дефекты успеют дифундировать в глубь материала.

Только при высоких мощностях разряда, а следовательно, большой и интенсивности, и энергии ионной бомбардировки, появляются дефекты на поверхности обрабатываемого материала.

Чтобы уменьшить загрязнение поверхности образцов распыленными частицами материалов электродов, подложкодержателей и т. д., необходимо либо грамотно подбирать конструкционные материалы, либо покрывать их поверхности пластинка-

ми из обрабатываемого материала. Для устранения нежелательных изменений электрофизических параметров обрабатываемых слоев, границ раздела между слоями и рабочих характеристик приборов после процессов ИХТ их можно подвергнуть восстанавливающему отжигу.

2.3.4. Радикальное травление

В основе радикального травления (РТ) лежат гетерогенные реакции, происходящие на границе двух фаз — твердой и газообразной, между ХАЧ (свободные атомы и радикалы [6], которые образуются при диссоциации молекул рабочего газа в низкотемпературной плазме газовых разрядов) и активными центрами обрабатываемого материала, представляющими собой поверхностные атомы со свободными валентностями. В процессах РТ обрабатываемый материал находится в зоне, отделенной от плазмы перфорированным металлическим экраном или магнитным полем, расстоянием или другими способами. Такое разделение области разрядной плазмы и реакционной области, в которой размещен обрабатываемый материал, не позволяет ионам и электронам достигать поверхности материала и в то же время практически не создает преграды для незаряженных ХАЧ, которые, достигая поверхности обрабатываемого материала, вступают с ним в химическую реакцию с образованием стабильных летучих соединений, удаляемых из реакционной зоны в результате непрерывной откачки.

В механизме радикального травления можно выделить следующие основные стадии:

- доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда;
- доставка ХАЧ к поверхности материала, подвергаемого травлению;
- взаимодействие ХАЧ с активными центрами материала, включающее в себя хемосорбцию ХАЧ на поверхности материала, химическую реакцию и последующую десорбцию образующихся летучих стабильных продуктов реакции с поверхности материала;
- отвод продуктов реакции из реакционной зоны и камеры реактора [5, 6].

2.3.5. Реакторы вакуумно-плазменного травления

Одними из первых реакторов для травления кремния были реакторы диодного типа с плотностью плазмы $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Спустя несколько лет, с середины 80-х гг. XX в., появились реакторы высокоплотной плазмы, широко используемые и в настоящее время, в которых плотность плазмы достигает $1 \cdot 10^{11}$ – $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Основным важным свойством этих аппаратов является возможность достижения необходимого баланса ионов и радикалов, что позволяет получить при определенных условиях высокие скорости травления, селективность и однородность по пластине диаметром до 300 мм [14]. Реакторы высокоплотной плазмы позволяют осуществлять процессы, приводящие к созданию элементов с минимальными размерами менее 100 нм, причем у разных фирм-производителей они отличаются конструктивными особенностями и организацией разряда, но все работают в диапазоне низких давлений и имеют плотность плазмы выше $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Кратко охарактеризуем существующие типы установок РИТ [3–6, 14, 15–20].

Планарный (диодный) реактор либо ассимметричный реактор РИТ низкого давления. Обрабатываемая пластина размещается на ВЧ-электроде. Травление происходит непосредственно в области, где генерируется плазма. Типичная плотность плазмы составляет $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Реактор с раздельным питанием электрода и пластины (триодный). В такую установку введен противоэлектрод с независимым питанием, позволяющий осуществлять раздельное регулирование мощности плазмы и разности потенциалов между плазмой и пластиной и, следовательно, энергии ионов. Такая система дает дополнительную возможность оптимизировать технологические процессы.

Магнетронный реактор. В данной установке за счет удержания электронов магнитным полем обеспечиваются два эффекта: увеличение вероятности ионизационных соударений и, следовательно, получение высокой плотности при относительно низкой мощности, и снижение напряжения подпитываемого электрода, что приводит к понижению энергии ионов и ограничивает толщину радиационно-нарушенного слоя.

«DownStreams»-реакторы, в которых травление происходит в потоке, вышедшем из плазмы, причем область генерации плазмы и область травления пространственно разделены, пластина вынесена за пределы объема плазмы. Травящие частицы

доходят до поверхности пластины различным образом (например, в результате диффузии плазмы, дрейфа в потоке газа, под воздействием заряженной сетки, либо вследствие эффекта расходящегося магнитного поля), что дает меньшую дефектность и высокую селективность травления. Однако травление при этом становится изотропным.

Реактор РИТ с использованием трансформаторно-связанной плазмы или индукционно-связанной плазмы. В этом аппарате связь для создания плазмы высокой плотности (более высокой, чем в магнетронных установках) является индуктивной (в отличие от емкостного характера в обычных реакторах). Отсутствие самосмещения позволяет регулировать напряжение смещения нижнего электрода независимо от остальных параметров режима. Типичная плотность плазмы составляет $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Реактор с использованием электронно-циклотронной плазмы. Циклотронное движение электронов создает повышенную вероятность ионизационных соударений, и, следовательно, более высокую плотность плазмы (типичное значение — $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$), а также невысокую подвижность электронов, что приводит к снижению энергии ионов и, соответственно, к повышению селективности травления.

Из перечисленных выше типов реакторов последние два позволяют осуществлять травление для получения элементов топологии с размерами меньше 0,5 мкм и в основном используются для индивидуальной обработки пластин. Для производства СБИС микронного уровня достаточно использовать планарную установку с ВЧ-генератором, что является экономически обоснованным.

Увеличение размера кремниевых пластин и более высокая плотность плазмы в установках индивидуальной обработки в определенной степени компенсируют потерю в производительности. Кроме высокой равномерности травления, установки с индивидуальной обработкой пластин обладают и другими преимуществами: они проще поддаются автоматизации, особенно автоматизации момента окончания травления, и относительно малогабаритны, что экономически важно для производства.

По используемой частоте генерации системы РИТ можно разделять на два типа:

- высокочастотные установки;
- сверхвысокочастотные установки.

С увеличением частоты уменьшается энергия ионов, что в свою очередь приводит к лучшей селективности травления и меньшей дефектности, создаваемой на поверхности подложки ионной бомбардировкой. Кроме того, ионы достаточно высокой энергии могут вызвать распыление материала стенки реактора и, следовательно, возможное загрязнение. Исходя из этих соображений, установки с СВЧ-генератором имеют неоспоримое преимущество перед установками с ВЧ-генератором, хотя и гораздо более сложны по конструкции. Поэтому в производстве СБИС уровня 0,8–1,0 мкм предпочтительнее выбирать все-таки установки с ВЧ-генератором, так как они могут обеспечить требуемое качество травления.

Основными технологическими требованиями к установкам РИТ для изготовления СБИС являются следующие.

- Предотвращение загрязнений, обусловленных распылением металлических материалов ВЧ-катода и всех остальных металлических заземленных поверхностей реактора.
- Стабилизация основных параметров: температуры ВЧ-катода, давления, уровня ВЧ-мощности. Необходимость стабилизации температуры обусловлена тем, что вследствие интенсивной ионной бомбардировки, сопровождающей процесс РИТ, происходит дополнительный разогрев ВЧ-катода. Необходимость стабилизации давления и ВЧ-мощности обусловлена требованиями к равномерности травления.
- Стойкость газовой, вакуумной и разрядной частей установки РИТ к действию агрессивных газов (HF , Cl_2 , Br_2). Для этого газовая система должна быть полностью металлической.
- Однородность травления. Учитывая увеличение диаметра пластин до 150 мм и выше, а также уменьшение минимальных размеров до 0,5 мкм и менее, необходимы однородность обработки и воспроизводимость процессов не хуже $\pm 3\%$.

2.3.5.1. Оборудование реактивного ионно-лучевого травления

Процессы РИЛТ осуществляются в системах с автономными ионными источниками (рис. 2.8, а) [3, 4]. Молекулярные ионы создаются в плазме газового разряда из молекул рабочего газа в автономном ионном источнике и ускоряются электрическим

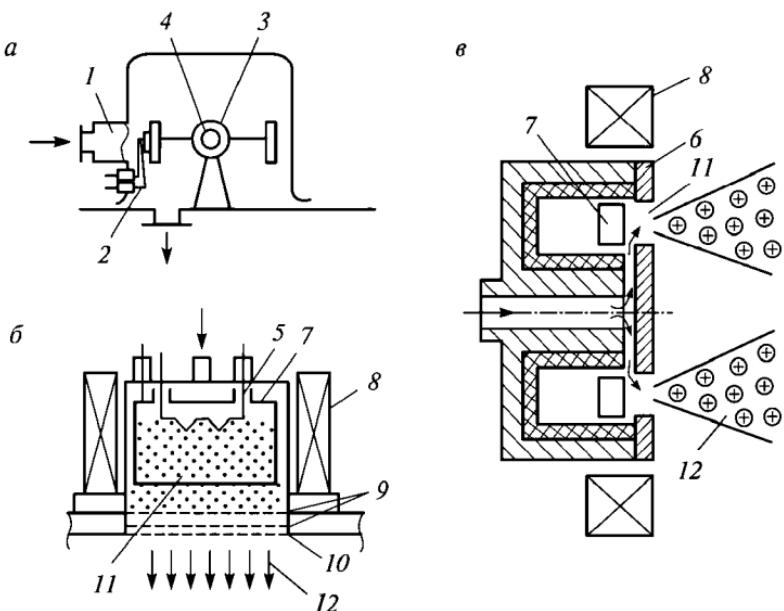


Рис. 2.8. Система с автономным ионным источником (*а*) и устройства источников типа «Кауфман» (*б*) и типа «Радикал» (*в*):
1 — автономный ионный источник; *2* — нейтрализатор; *3* — подложкодержатель; *4* — подложка; *5* — термокатод; *6* — катод; *7* — анод; *8* — магнит; *9* — ионно-оптические сетки; *10* — ускоряющая сетка; *11* — область плазмы разряда; *12* — ионный пучок

полем по направлению к обрабатываемому материалу, например, кремниевым пластинам, которые расположены на подложкодержателях в вакуумной (реакционной) камере. Для компенсации объемного заряда ионного пучка в него, после выхода из источника, обычно инжектируют электроны, что особенно важно при травлении диэлектрических материалов. В качестве автономных ионных источников в процессах РИЛТ применяются источники с термокатодом типа «Кауфман» (рис. 2.8, *б*) и с холодным катодом типа «Радикал» (рис. 2.8, *в*).

Источники для получения ионов химически активных газов типа «Колютрон» (Colutron) имеют очень малый диаметр ионного пучка и служат только для исследовательских целей.

Системы с автономными ионными источниками для реализации процессов РИЛТ используются в отечественных установках УРМ.3.279.029, УРМ.3.279.037, УРМ.3.279.045, УРМ.3.279.053 и в зарубежных моделях Microetch (фирма Veeco Corp., США), MIMTLA-5,5; -15; -20 (фирма Technics, США), RE-580 (фирма Varian/Extrion, США).

Рабочее давление в системах РИЛТ определяется типом используемого автономного ионного источника. Источники с термокатодом типа «Кауфман» работают при давлении галогенсодержащих рабочих газов в диапазоне $4 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-2}$ Па, а источники с холодным катодом типа «Радикал» — в диапазоне $3 \cdot 10^{-2}$ — $7 \cdot 10^{-1}$ Па. Отмечается, что изменение давления C_2F_6 от $4 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Па не влияет на скорость РИЛТ поликристаллического кремния и увеличивает скорость травления SiO_2 в 5 раз. Расходы рабочих газов при этом обычно варьируются в пределах от 1,0 до 5,0 cm^3/min .

Распределение плотности ионного тока в системах РИЛТ определяет равномерность травления материалов. Ионные источники типа «Кауфман» дают ионные пучки с круговым сечением. С помощью коллимирующих сеток обеспечивается высокая равномерность плотности ионного тока (до 95%) на площади диаметром до 40 см. Поэтому в этих системах с источниками типа «Кауфман» вращение образцов на подложкодержателях с целью обеспечения равномерности травления не производится.

Особенность источников типа «Радикал» состоит в том, что они дают трубчатый поток ионов. Сечение потока в области позиционирования подложек имеет вид кольца с весьма неравномерным радиальным распределением интенсивности. Диаметр области максимума интенсивности составляет 70—80 мм, ширина кольца, в пределах которого интенсивность потока снижается в 2—3 раза, не превышает 30 мм. Равномерность травления подложек при такой неоднородности потока обычно обеспечивают за счет использования планетарной системы вращения, как, нап-

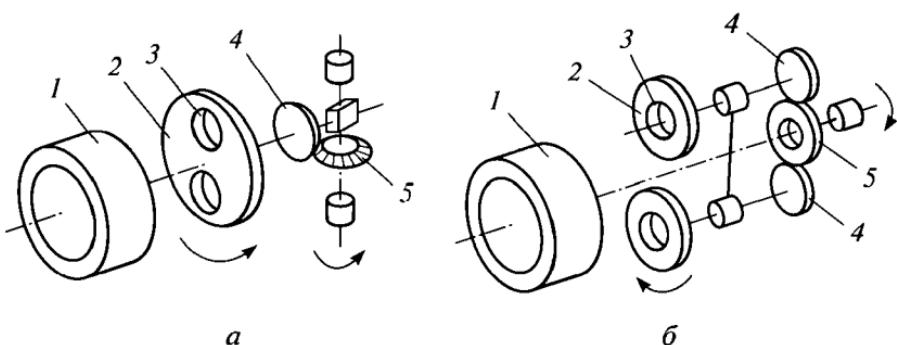


Рис. 2.9. Кинематика планетарной системы при групповой (а) и при индивидуально-групповой (б) обработке подложек: 1 — трубчатый поток ионов; 2 — держатель подложек; 3 — подложка; 4 — неподвижная шестерня; 5 — шестерня вращения держателя подложек

пример, на установке УРМ.3.279.029. На рис. 2.9, *а* представлена кинематическая схема вращения одного из шести держателей подложек (2), который перемещается по окружности перед источником ионов в горизонтальной плоскости и одновременно вращается вокруг собственной оси.

Подобная организация планетарного вращения и условия обеспечения равномерности травления рассмотрены в работе [4]. В ней найдено значение эксцентриситета (смещение по вертикали собственной оси вращения подложкодержателя относительно оси трубчатого потока ионов), при котором равномерность травления подложек в пределах 90% обеспечивается на максимальной площади держателя.

Несмотря на широкое распространение оборудования с такой планетарной системой, в ряде случаев ее применение нецелесообразно из-за некоторых принципиальных недостатков. Один из них — малая скважность экспозиции подложек (отношение времени, в течение которого держатель подложек пересекает ионный поток, к периоду обращения держателя вокруг вертикальной оси), которая не превышает 1/15. В этих условиях требуется относительно высокая мощность разряда в источнике (1—1,5 кВт). Анодное напряжение при этом достигает 3 кВ, и энергия ионов превышает пороговое значение, начиная с которого фоторезистивное маскирующее покрытие подвергается деструкции или сильно задубливается даже при малых дозах облучения. Кроме того, при повышенных энергиях ионов происходит радиационное повреждение поверхности обрабатываемых микроструктур, которое в ряде случаев совершенно недопустимо.

Другой недостаток рассмотренной планетарной системы состоит в том, что она предъявляет очень жесткие требования к равномерности пленок по толщине во всей группе обрабатываемых пластин, что не всегда выполнимо.

Эти недостатки можно устранить применением индивидуальной или индивидуально-групповой обработки подложек (примерно 1—4 идентичных подложки в группе) при непрерывном их позиционировании перед ионным источником. В работе [3] рассмотрена конструкция планетарной системы для подобной обработки (рис. 2.9, *б*). Подложкодержатель (2) диаметром 170 мм движется так, что его центр перемещается по области максимума интенсивности потока ионов (1); одновременно с этим он вращается вокруг собственной оси.

Подколпачная оснастка может содержать до 8 позиций, по 2—4 держателя подложек в каждой. При таком вращении, когда

подложка постоянно находится в области облучения ионным потоком, мощность разряда в источнике может быть снижена почти на порядок, а анодное напряжение, соответственно, более чем в три раза (0,8—1 кВ). Это позволяет при сохранении скорости травления материалов обеспечить высокую стойкость фоторезистивных маскирующих покрытий даже при самых мягких режимах их предварительной термообработки (дубления).

Как показали расчеты и эксперименты, планетарная система индивидуального позиционирования подложек при РИЛТ с ионным источником типа «Радикал» позволяет обеспечить равномерность скорости травления в пределах $\pm 2,5\%$ на площади диаметром до 100 мм.

2.3.5.2. Оборудование реактивного ионно-плазменного травления

Процессы РИПТ осуществляются в основном в двухэлектродных ВЧ-системах (рис. 2.10, *a—u*), причем, если образцы размещаются на потенциальном ВЧ-электроде, то система называется *высокочастотной диодной системой с катодной связью* (рис. 2.10, *a—в*), если образцы размещаются на заземленном электроде (аноде), то система называется *высокочастотной диодной системой с анодной связью* (рис. 2.10, *г—з*) или, если электроды расположены горизонтально, — *планарным реактором*.

Диодные ВЧ-системы с катодной связью с коаксиальными цилиндрами-электродами используются в отечественных установках УВП-2, УВП-4, «Трион» и в ряде зарубежных установок.

Различия в конструкциях перечисленных установок заключаются в степени автоматизации, способах подачи газовой смеси, откачки рабочей камеры и контроля за технологическими параметрами, размерах электродов и межэлектродных расстояний [3—6].

Диодные ВЧ-системы с анодной связью, в которых образцы располагаются на заземленном электроде и подвергаются воздействию ионов с меньшей энергией, чем в системах с катодной связью, получили более широкое распространение в начале 80-х гг. прошлого века, однако дальнейшее развитие систем ВПТ исключило эту тенденцию.

В планарных диодных ВЧ-системах с анодной связью ВЧ-электрод может быть расположен как вне вакуумной камеры (рис. 2.10, *д*), так и внутри нее (рис. 2.10, *е—з*). На равномерность

РИПТ некоторых материалов сильное влияние оказывает организация газового потока в зоне травления. В системе, приведенной на рис. 2.10, *д*, газовый поток организован неоптимальным образом и наблюдается уменьшение концентрации ХАЧ над подложкодержателем слева направо. Более совершенными являются системы с радиальным распределением газового потока (рис. 2.10, *е*–*з*).

Планарные диодные ВЧ-системы с анодной связью применяются как в отечественных, так и в зарубежных установках. ВЧ-системы по сравнению с оборудованием, в котором использован разряд постоянного тока, более сложны и дороги, так как стоимость ВЧ-генераторов, согласующих и измерительных

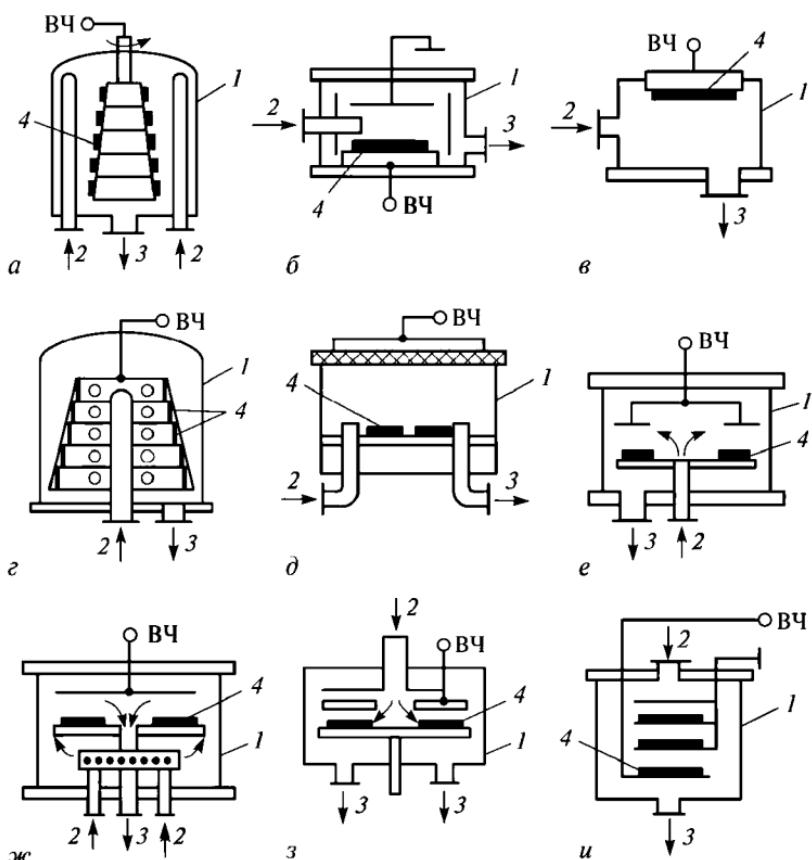


Рис. 2.10. Схемы конструкций систем для реактивного ионно-плазменного травления материалов: 1 — вакуумная камера; 2 — коллектор для напуска рабочего газа; 3 — откачное отверстие; 4 — обрабатываемая подложка

устройств значительно выше и конструкции их значительно сложнее, чем источников постоянного тока. Однако применение разряда постоянного тока в химически активных газах требует решения ряда сложных технических задач, основной из которых является обеспечение взаимодействия материала электродов с плазмой и образование в результате этого на их поверхности пленки, приводящей к затуханию разряда, искрению при пробоях пленки и загрязнению обрабатываемой поверхности продуктами распыления катода.

Особенности несимметричного реактора РИТ низкого давления. Как и в случае других процессов, основанных на использовании плазмы, систему РИТ можно рассматривать как совокупность взаимодействующих электрической схемы и химического реактора. Пластины располагаются на нижнем электроде, подключенном к ВЧ-источнику питания (рис. 2.11) через емкостную связь и устройство согласования.

Нижний электрод существенно меньше по площади, чем верхний заземленный электрод-анод, а поскольку стенки камеры тоже заземлены, отношение площадей анода и катода является довольно большой величиной. Следствием такой конфигурации электродов является появление отрицательного автосмещения между электродом с меньшей площадью и плазмой, и положительные ионы, энергия которых зависит от величины напряже-

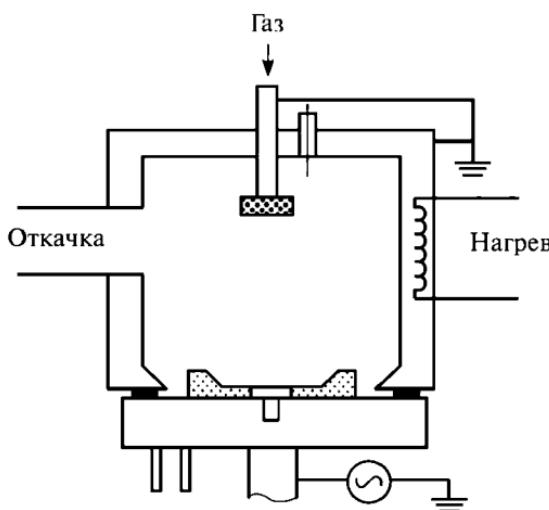


Рис. 2.11. Реактор реактивно-ионного травления низкого давления

ния смещения, ускоряются в направлении, перпендикулярном поверхности катода.

Модель «электронного облака» основана на том факте, что при горении разряда в ВЧ-поле амплитуда колебаний ионов и электронов различны, и при частоте генератора, превышающей 1 МГц, амплитуда колебаний ионов пренебрежимо мала по отношению к амплитуде колебаний электронов. Поэтому можно считать, что под действием переменного напряжения высокой частоты колебания осуществляют только электроны, а ионы остаются неподвижными. Начиная с момента, когда напряжение на катоде положительно и возрастает, электроны начинают двигаться в сторону катода. Мгновенное напряжение на катоде не будет равно приложенному напряжению от источника питания (ВЧ-генератора). Это обусловлено тем, что обедненная область вблизи катода будет индуцировать в материале катода заряд противоположный по знаку, который и будет компенсировать часть приложенного положительного напряжения. В момент, когда напряжение на катоде максимально по амплитуде, «электронное облако» полностью смещено к катоду. Причем потенциал максимален и приблизительно равен половине амплитудного значения приложенного переменного напряжения. В материале катода индуцируется также отрицательный заряд, который складывается с приложенным напряжением от ВЧ-генератора. Следовательно, мгновенное значение отрицательного напряжения на катоде будет несколько ниже приложенного. Из-за асимметрии конфигурации электродов отрицательное автосмещение между анодом и плазмой существенно меньше по величине, чем смещение между катодом и плазмой, поэтому бомбардировка положительными ионами подвергается преимущественно катод, а анод распыляется незначительно. Энергия ионов может быть увеличена за счет повышения мощности или снижения давления, приводящего к уменьшению потерь энергии за счет столкновения частиц.

Конструкция данного типа обеспечивает высокую энергию бомбардирующих поверхность пластины радикалов и нейтральных частиц, которые участвуют в химических реакциях на поверхности материала, образуя летучие продукты, тогда как положительные ионы, ускоряемые в межэлектродном пространстве, бомбардируют поверхность пластин на катоде, инициируя или завершая процессы образования летучих продуктов и ускоряя удаление материала.

РИТ низкого давления используются для травления материалов, где основным механизмом процесса удаления слоя является химическое взаимодействие материала с химически активными частицами в плазме (поликристаллического кремния, нитрида кремния, силицидов металлов). Реактор данного типа используется также при травлении алюминия.

2.3.5.3. Оборудование плазмохимического травления

Для плазмохимического травления применяют реакторы с объемным расположением подложек, которые чаще всего имеют цилиндрическую форму и выполняются из кварца [3–6].

Основные конструктивные решения таких реакторов схематично изображены на рис. 2.12. Плазма в реакторах возбуждается либо индуктором (рис. 2.12, *а–е*), либо с помощью обкладок конденсатора (рис. 2.12, *ж–к*), либо совместно индуктором и обкладками конденсатора (рис. 2.12, *л*). Во всех случаях возбуждающие элементы вынесены за пределы реакционно-разрядной камеры, что обеспечивает отсутствие взаимодействия плазмы с материалом электродов и, следовательно, чистоту процессов ПХТ.

Наиболее простая конструкция реактора представлена на рис. 2.12, *а*, но в такой системе по пути газового потока наблюдается изменение концентрации активных частиц, выражющееся в неравномерности скорости травления по длине реактора. Кроме того, из-за расположения подложек перпендикулярно потоку происходит их взаимное экранирование. В таком реакторе газ подается и откачивается через фланцы, что усложняет операции загрузки и выгрузки пластин. Конструкция реактора с измененной подачей газа и одним съемным фланцем (см. рис. 2.12, *б*) облегчает загрузку и выгрузку пластин, однако газовый поток в ней организован неоптимальным образом.

Для улучшения равномерности подачи газового реагента используют коллекторы в виде трубок, расположенных симметрично вдоль цилиндрических стенок реактора. В наиболее совершенной конструкции реактора с распределенным напуском и откачкой газа (см. рис. 2.12, *г*) предусмотрена съемная внутренняя камера с прорезями для откачки и штырьками для точной установки кассеты с пластинами, составляющая единое целое с фланцем. Эта камера обеспечивает равномерное травление и позволяет ускорить и упростить операции загрузки и выгрузки подложек.

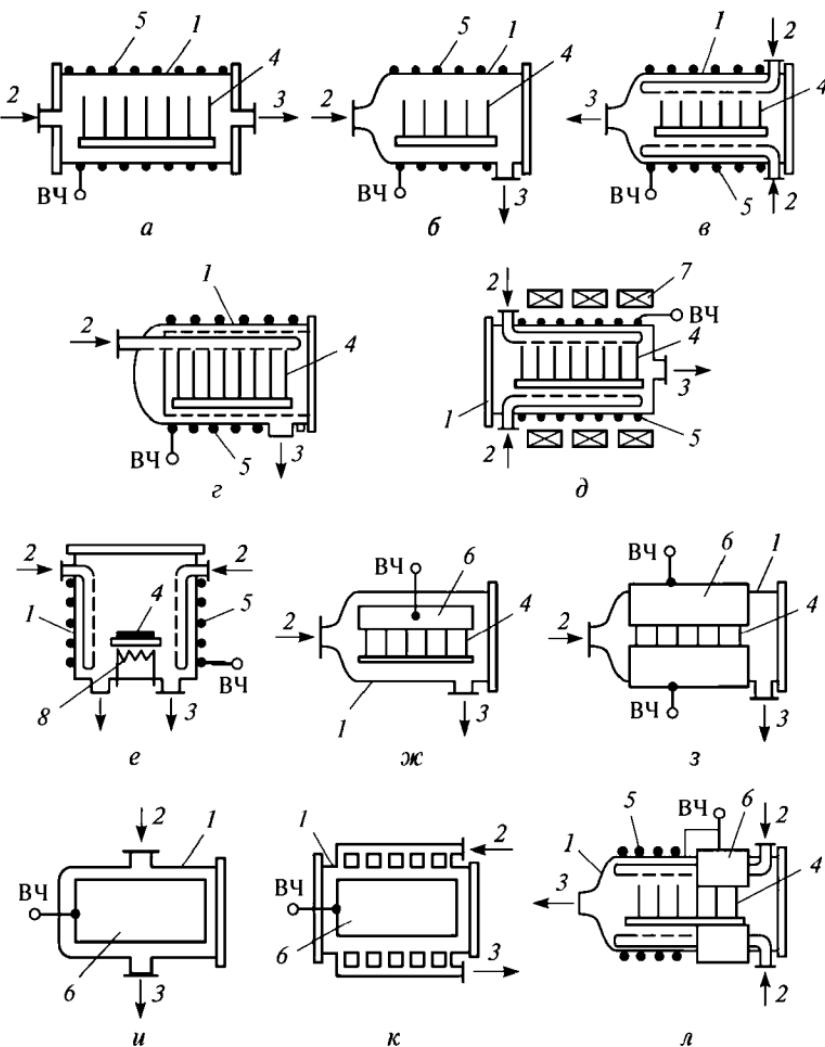


Рис. 2.12. Схемы реакторов для ПХТ: 1 — вакуумная камера; 2 — коллектор; 3 — откачное отверстие; 4 — подложки; 5 — индуктор; 6 — конденсаторные обкладки; 7 — магнит; 8 — нагреватель

2.3.5.4. Реакторы радикального травления

Процессы радикального травления осуществляются в реакторах двух типов [3]. Первый тип — цилиндрические реакторы с перфорированным цилиндром-вкладышем (реакторы туннельного типа). В таких реакторах зона плазмы окружает реакционную зону и ХАЧ доставляются к подложкам путем диффузии. Второй тип — реакторы, в которых плазменная зона не охватывает реак-

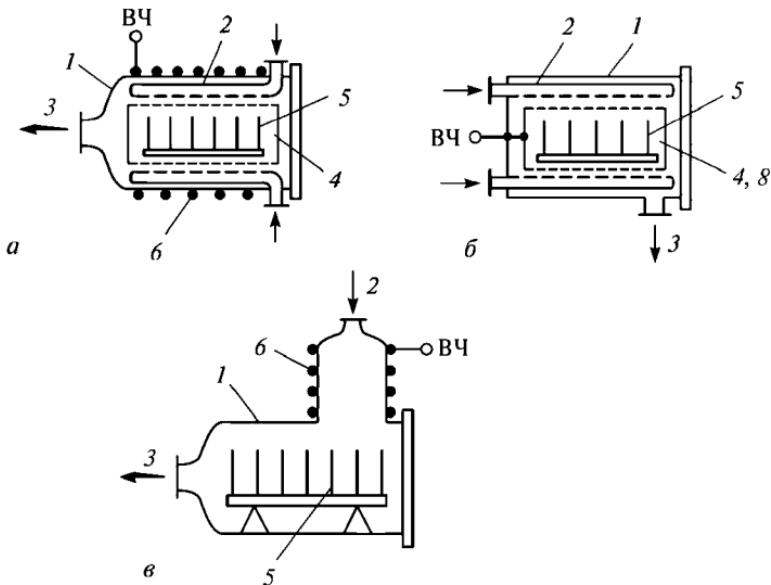


Рис. 2.13. Схемы конструкций реакторов для РТ: 1 — вакуумная камера; 2 — коллектор; 3 — откачное отверстие; 4 — перфорированный цилиндр; 5 — подложки; 6 — индуктор; 8 — перфорированные электроды

ционную. В них можно использовать поток газа из области плазмы в реакционную область к обрабатываемым подложкам и затем откачивать отработанный газ вакуумной системой. В таких реакторах зона плазмы и реакционная зона обычно конструктивно выделены в отдельные камеры. Реакторы первого и второго типов схематично представлены на рис. 2.13, *а* и *в* соответственно.

Каждый тип различается расположением элементов, способом загрузки подложек, вводом и откачкой газа, способом возбуждения плазмы. В цилиндрических реакторах с перфорированным цилиндром плазму возбуждают с помощью индуктора (рис. 2.13, *а*) либо переформированных электродов (рис. 2.13, *б*). В обоих случаях зона разряда отделена от зоны расположения пластин.

2.3.5.5. Реакторы РИТ магнетронного типа

Реакторы РИТ магнетронного типа наиболее интенсивно разрабатывались в 80—90-х гг. прошлого века. Основная идея при разработке таких реакторов заключалась в использовании сканирующих магнитных полей в зоне ВЧ-электрода-подложкодержателя, что

дает повышение плотности плазмы над подложкой до значений $(1\text{--}2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и снижает энергию ионного воздействия, а энергия регулируется напряженностью магнитного поля. В наиболее развитом виде такая магнетронная система была реализована в установках серии Precision 5000 ведущей фирмы-производителя ВПТ-оборудования Applied Materials. Реакторы в них оснащены двумя парами магнитных соленоидов с питанием, обеспечивающими вращение вектора индукции магнитного поля по окружности над подложкодержателем. На установках этой серии были освоены РИТ-процессы SiO_2 и Al с высочайшими для того времени технологическими характеристиками.

В нашей стране в конце 80–90-х гг. в ведущих научно-исследовательских институтах отрасли (НИИ молекулярной электроники и НИИ точного машиностроения) также велись разработки реакторов магнетронного типа, причем в триодной конфигурации. Такие системы, как показали зондовые измерения, позволяют формировать плазму высокой плотности [до $(5\text{--}6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$], размещать подложку вне зоны основного разряда и независимо регулировать энергию ионного потока.

На реакторе магнетронного типа с полым катодом были разработаны прецизионные высокоселективные РИТ-процессы поликристаллического кремния и кремния с регулируемым профилем травления. На тот период времени технологические характеристики разработанных процессов полностью соответствовали требованиям технологии СБИС.

Гордостью инженеров стал осуществленный на реакторе магнетронного типа с плоской системой электродов и вращающимся магнитным полем РИТ-процесс алюминия с очень высокими для того времени технологическими характеристиками.

Рассмотрим два РИТ-реактора магнетронного типа, разработанные в этот период времени нашими инженерами [14, 15]:

- макет установки плазмохимического травления магнетронного типа 08ПХТ-100Т-010 с коаксиальным ВЧ-электродом (рис. 2.14);
- макет установки плазмохимического травления магнетронного типа 08ПХТ-100Т-011 с плоской системой электродов (рис. 2. 15).

Макет установки 08ПХТ-100Т-010 в основной части представляет собой магнетронный источник плазмы с коаксиальным ВЧ-электродом и электрически разделенные с ним и «землей» подложкодержатель с прижимным кольцом. Магнитные катушки вокруг источника плазмы обеспечивают повыше-

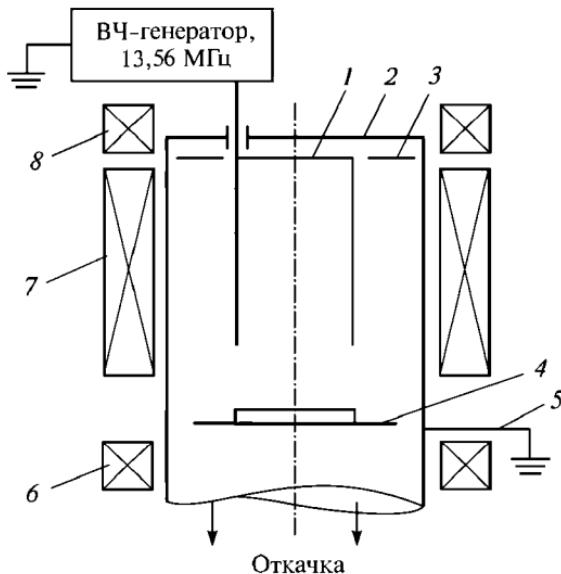


Рис. 2.14. Реактор с коаксиальным магнетронным источником плазмы: 1 — полый катод; 2 — корпус; 3 — катодная пластина; 4 — подложкодержатель; 5 — заземление; 6, 7, 8 — соленоиды

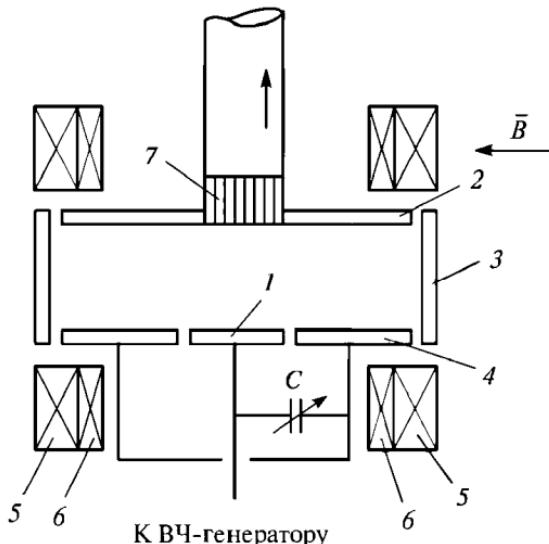


Рис. 2.15. Высокочастотный магнетронный реактор с плоской системой электродов: 1 — столик-подложкодержатель; 2 — земляной электрод; 3 — плавающие электроды; 4 — ВЧ-электроды; 5, 6 — соленоиды; 7 — газораспределяющее отверстие

ние плотности плазмы, а в месте с нижней катушкой в районе подложкодержателя — вытягивание плазменного потока высокой плотности в зону обработки. В качестве базы для создания макета послужила отечественная установка УРМ 3.279.045.

В макете установки 08ПХТ-100Т-011 система плоскопараллельных электродов и магнитных катушек создает вращающееся продольное магнитное поле вдоль электрода-подложкодержателя с индукцией 100–300 Гс. Такое конструкционное решение имеет две особенности. Во-первых, это возможность регулирования уровня подводимой к подложкодержателю мощности путем подключения и отключения ВЧ-питания к дополнительным электродам, находящимся под плавающим потенциалом в плоскости расположения ВЧ-подложкодержателя, и, во-вторых, измененный состав ХАЧ, попадающих на подложку, так как подложкодержатель вынесен из зоны основного ВЧ-разряда. В качестве конструктивной базы для данного макета выбрана установка УВП-2П, оснащенная высоковакуумным постом, состоящим из бустерного насоса типа Ш-3 и механического насоса ВНГ-18Г.

Материалом вакуумных рабочих камер установок 08ПХТ-100Т-010 и 08ПХТ-100Т-011 является нержавеющая сталь. Источник ВЧ-мощности — генератор ГТВЭ-1000 — обеспечивает питание с максимальной мощностью до 1 кВт с частотой 13,56 МГц.

К сожалению, экономический кризис тех лет не позволил перейти к промышленной реализации этих и других разработок, что, в конечном счете, отбросило нашу страну далеко назад.

2.3.5.6. Современные триодные системы с источниками плотной плазмы

Для изготовление СБИС с субмикронными размерами элементов необходима высокая разрешающая способность процессов травления, отсутствие деградирующего влияния на свойства и размеры органических защитных масок, а также на электрофизические параметры обрабатываемых структур. Поэтому развитие технологии полупроводникового производства требует создания принципиально нового технологического оборудования, использующего перспективные направления обработки [15–20].

Для решения проблемы формирования микроструктур с размерами элементов, находящимися в субмикронном диапазоне, наиболее перспективны ионно-плазменные процессы и устройства, использующие резонансные явления в ВЧ-плазме, получившей на-

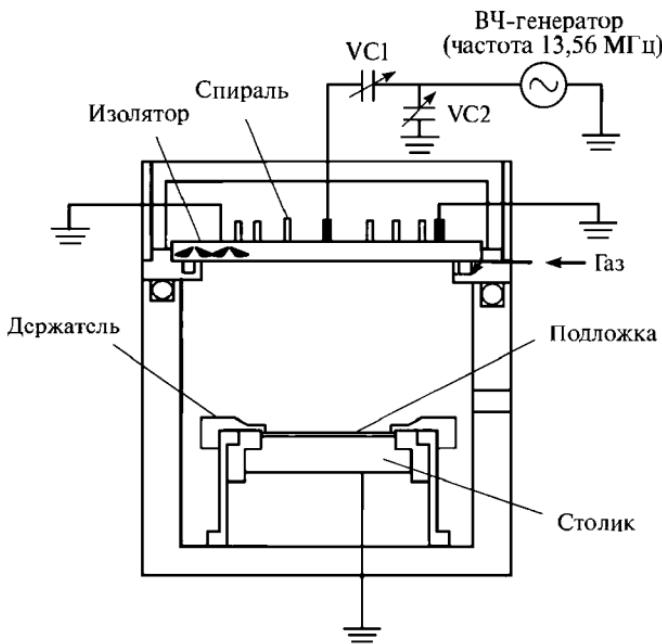


Рис. 2.16. Экспериментальная установка компании Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

звание «трансформаторно-связанной (или индуктивно-связанной) плазмы» (принятая латинская аббревиатура TCP — Transformator Coupled Plasma или ICP — Inductively Coupled Plasma).

Например, японская компания Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. разработала экспериментальную установку (рис. 2.16) с источником новой конструкции на основе TCP-разряда, который изолирован от плазмы диэлектрическим изолятором. Плас-

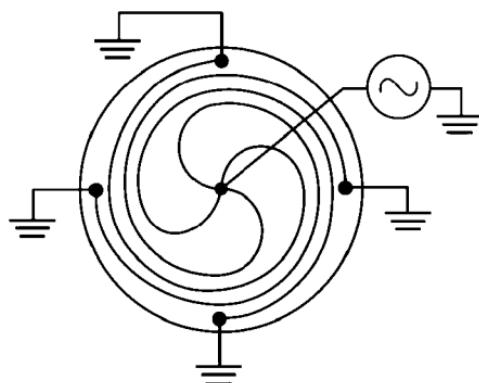


Рис. 2.17. TCP-источник

тина расположена на столике в нижней части камеры под источником и крепится держателем. Источник представляет собой многозаходную спираль (рис. 2.17); в камере он создает накладывающиеся высокочастотные магнитные поля.

В установках такого типа бомбардировка подложки осуществляется низкоэнергетическими частицами, что в большинстве случаев безопасно для кристаллической решетки полупроводника.

На рис. 2.18 представлена другая разновидность реактора с индукционно-связанной плазмой, в котором применяется геликоновая антенна, представляющая собой две противоположно располагающиеся рамки, обладающие встречно направленными векторами магнитного поля. Такая конструкция формирует плазму высокой плотности (до 10^{12} см^{-3}) внутри изолированной колбы из кварца либо алунда и имеет минимальную емкостную составляющую газового разряда индукционного типа.

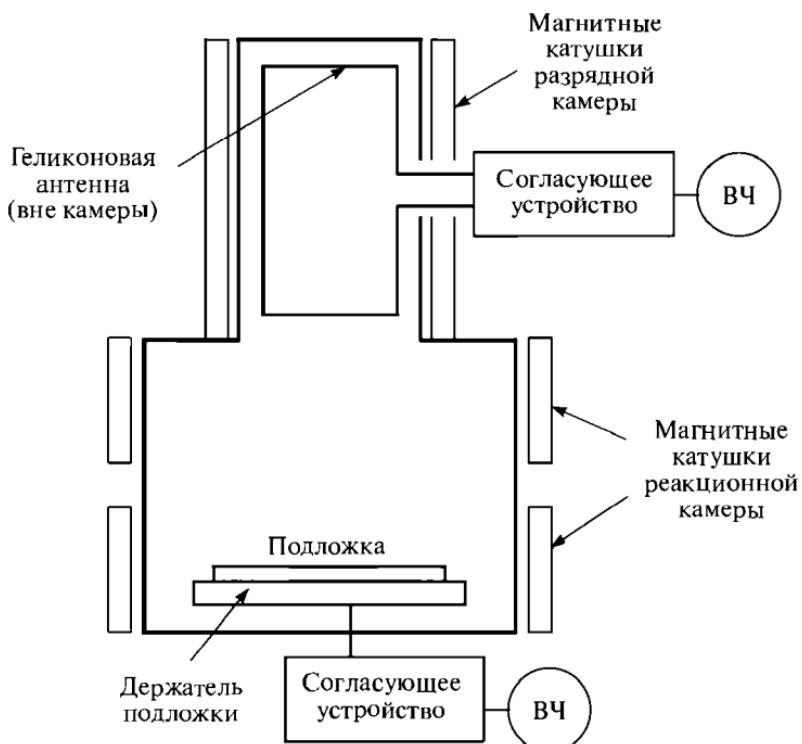


Рис. 2.18. Конструкция ICP-реактора с геликоновой антенной. Вместо геликоновой антенны могут устанавливаться индукционные антенны

В некоторых реакторах с индуктивными источниками плазмы для уменьшения емкостных составляющих ВЧ- поля, обусловленных межвитковой емкостью и другими паразитными емкостями, предусматривается установка электростатического экрана Фарадея. В противном случае в плазме одновременно с вихревым электрическим полем будет присутствовать сильное потенциальное электрическое поле. Такой разряд называют смешанным, а к чисто индуктивному относят разряд, в котором преобладающим является вихревое электрическое поле. Наличие емкостной составляющей в разряде нежелательно из-за развития процессов распыления, которые вызывают загрязнение плазмы. Однако с точки зрения технологии присутствие емкостной составляющей необходимо, так как она способствует зажиганию разряда при давлении менее 1 Па. Чисто индуктивный разряд при низком давлении зажигается только при его инициировании от внешнего источника.

Более полная схема ICP-реактора представлена на рис. 2.19. Образец загружается в камеру специально разработанной рукояткой-роботом через загрузочный шлюз, поддерживая постоянный вакуум в камере, при этом погрузчик касается образца только за края, во избежании повреждения обратной стороны пластины при двусторонней обработке. Такой прием также позволяет проводить обработку кремниевых мембран без какой-либо несущей пластины. И руку-робот, и погрузчик можно быстро адаптировать к размерам пластины от 15 до 20 сантиметрового диаметра [15–20].

При использовании продольных магнитных полей и высокой подводимой ВЧ-мощности в реакторах TCP и ICP достигается плотность до 10^{12} см^{-3} , что соответствует уровню ЭЦР-источников. Однако первые могут работать в более широком диапазоне рабочих давлений, что позволяет получать более высокие скорости травления при высоких анизотропии и селективности.

Тенденции развития мирового рынка электронной техники, а также экономические аспекты полупродуктового производства ведут к увеличению степени интеграции полупродуктовых приборов на поверхности подложек. Степень интеграции, в свою очередь, напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве пластин, так и с уменьшением геометрических размеров полупродуктовых приборов на их поверхности. Сегодня размеры используемых подложек возросли до 300 мм, а степень интеграции выросла до одного миллиона

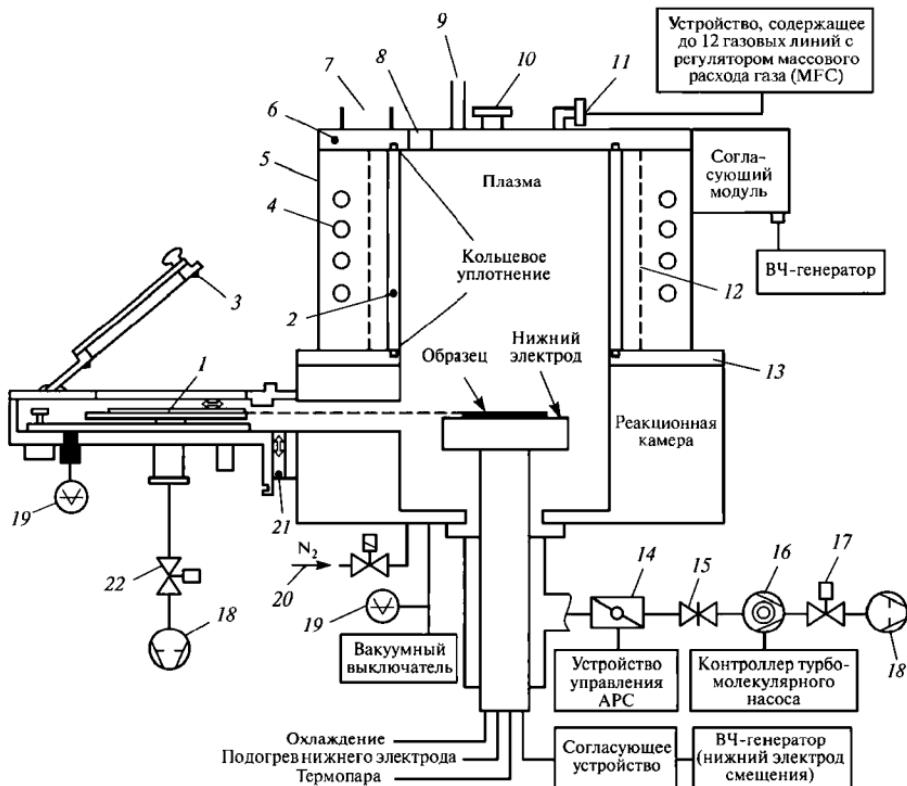


Рис. 2.19. Изображение ICP-системы для травления: 1 – подложко-держатель; 2 – диэлектрическая труба (кварцевая); 3 – уплотнение; 4 – ВЧ индукционная катушка; 5 – ограждение ВЧ-катушки; 6 – верхняя крышка; 7 – отверстие для извлечения; 8 – отверстие сброса давления; 9 – ввод воды охлаждения; 10 – смотровое отверстие; 11 – впуск газа; 12 – электростатический экран; 13 – крышка камеры; 14 – АРС (автомат контроля давления); 15 – задвижка; 16 – турбомолекулярный насос; 17 – вентиль на выходе турбонасоса; 18 – ротационно-лопастной насос; 19 – измерение вакуума; 20 – входное отверстие камеры; 21 – пневматическая задвижка; 22 – клапан вакуумирования загрузочного шлюза. Электростатический экран между катушкой и диэлектрическим окном (кварцевая труба) обеспечивает индуктивное связывание и предотвращает емкостное связывание между плазмой и катушкой. Образец загружается рукой-роботом, специально разработанной для безопасной загрузки образцов MEMS

полупроводниковых приборов на одной пластине. С повышением требований к выпускаемой продукции растут и требования к технологическим процессам производства.

В современном производстве в основных устройствах используются три основных принципа создания плазмы: устройства на электронном циклотронном резонансе ЭЦР (ECR), геликоновые источники плазмы, а также плазменные источники на индуктивном ВЧ-разряде (ICP). ЭЦР-источники позволяют получить однородную плазму большого диаметра при низком давлении газа (до 10^{-1} Па), но они дороги вследствие необходимости создавать сильные (до 1 кГс и выше) магнитные поля и применять мощные генераторы электрического поля СВЧ-диапазона. Источники, использующие плазму, созданную распространяющимся в ней геликоном, имеют гораздо более низкую стоимость при сравнимых рабочих давлениях и плотностях плазмы, однако необходимость в обеспечении даже слабого (50–100 Гс) магнитного поля приводит к удорожанию установки и дополнительным трудностям в получении однородной плазмы при увеличении размера обрабатываемых подложек. Именно поэтому в современных технологических линиях все чаще встречаются источники плазмы высокой плотности на основе ВЧ-разряда, формирующие трансформаторно-связанную или индуктивно-связанную плазму. TCP-разряд позволяет травить материалы микроэлектроники с высоким разрешением (менее 0,2 мкм) и осаждать слои из парогазовых смесей (плазменно-стимулированный CVD-процесс), обеспечивая при этом высокую эффективность и качество проведения процесса. Дальнейшее развитие систем данного типа идет по пути оптимизации конструкций с учетом повышения стабильности и технологичности.

Многие ведущие производители оборудования для плазмохимического травления в настоящее время активно занимаются разработкой реакторов такого типа. Особенностью TCP-реакторов является высокая концентрация плазмы (порядка 10^{12} см^{-3}), низкий потенциал плазмы, характерный для индукционного разряда, возможность независимого регулирования плотности плазмы и энергии ионов с помощью подачи независимого смещения на подложку, высокая равномерность ионного тока на подложку большого диаметра.

TCP-реактор, предлагаемый фирмой LAM Research Corporation (рис. 2.20), представляет собой вакуумную камеру, в верхней части которой расположено окно из диэлектрика (кварцевое стекло). Над окном располагается плоская односпиральная трехвитковая антенна, соединенная в электрическую цепь с

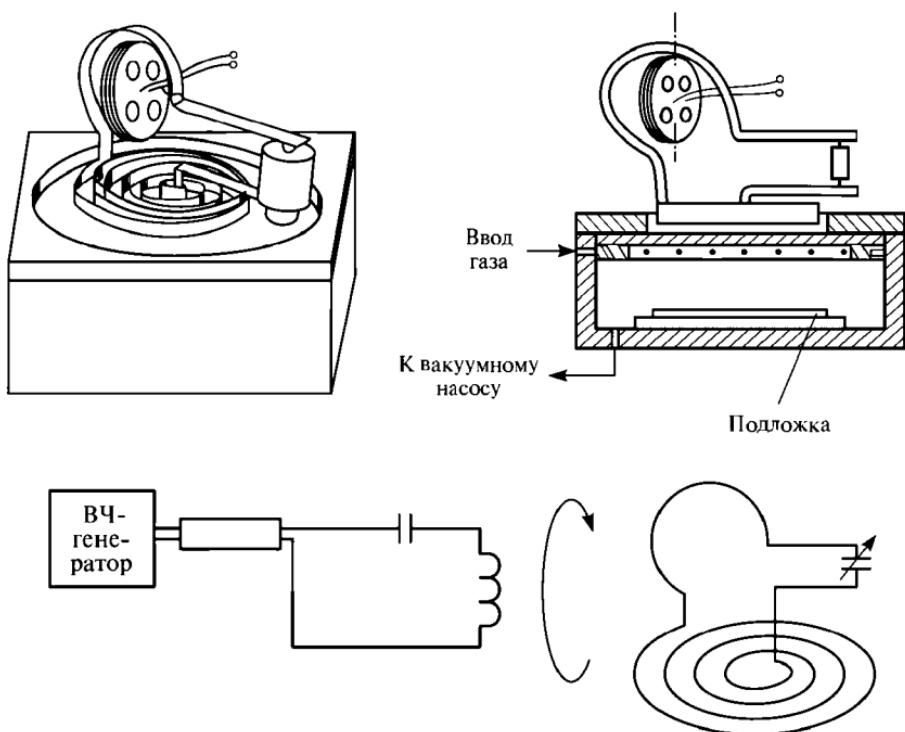


Рис. 2.20. Конструкции TCP-реактора фирмы LAM Research Corporation

конденсатором переменной емкости. ВЧ-генератор соединен с центральным вводом антенны и подложкодержателем.

ВЧ-генератор, подавая в antennу мощность, при прохождении тока индуцирует в ней плоское магнитное поле. В магнитном поле электроны совершают круговое движение, ионизируют рабочий газ, создавая при этом плоскую область плазмы высокой

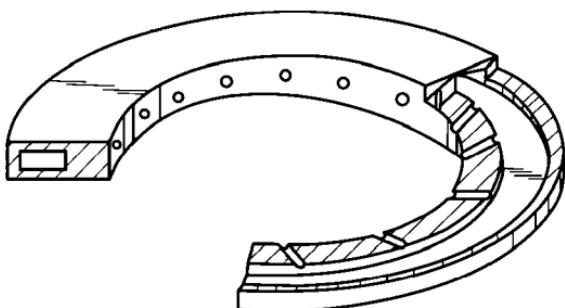


Рис. 2.21. Газораспределитель

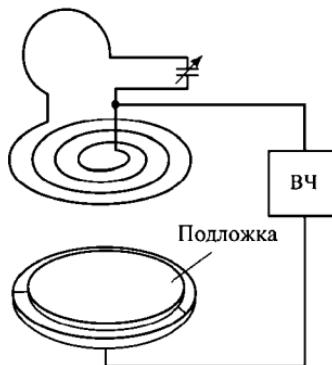


Рис. 2.22. Схема подключения ВЧ-генератора

плотности при низком давлении рабочего газа. В реакторе предложен газораспределитель оригинальной формы (рис. 2.21). Он выполнен в виде плоского полого кольца с перфорацией по внутренней боковой стороне, что обеспечивает подачу рабочего газа непосредственно в зону плазмы. Этот узел вместе с высокочастотной системой обеспечивает высокую степень ионизации газа, что в свою очередь приводит к образованию ограниченной плоской области плазмы высокой плотности.

Разработчики системы предложили подключение ВЧ-генератора не только к антенне, но и к подложкодержателю, на котором располагается обрабатываемая пластина (рис. 2.22).

Условия существования TCP-разряда

Определяющим этапом создания TCP-устройств является изучение физических явлений, лежащих в основе работы данной системы генерации плазмы и определяющих выбор ее конструктивных и рабочих параметров. Исследования показали, что эти явления различны в момент возбуждения разряда и в стационарном рабочем режиме.

Рассмотрим стационарный режим разряда. После формирования разряда, когда глубина проникновения ВЧ- поля в плазму становится много меньше поперечного размера области плазмы, разряд переходит в TCP-режим. В этом режиме плазма поддерживается током, индуцированным в ней внешней антенной.

Качественная оценка характеристик подобной системы может быть сделана на основе рассмотрения плазмы как идеально-го проводника. В этом случае магнитное поле, создаваемое индуцированным в плазме током, можно описать как поле тока,

расположенного симметрично току антенны относительно границы плазмы и направленного в противоположную сторону. Составим эквивалентную схему TCP-устройства в виде индуктивно связанных токов:

$$j\omega L_{11}I_1 + j\omega L_{12}I_2 = U, \quad (2.8)$$

$$j\omega L_{21}I_1 + j\omega L_{22}I_2 + Z_N I_2 = 0, \quad (2.9)$$

где L_{11} — индуктивность ненагруженной антенны; L_{22} — индуктивность вторичной обмотки (электрической цепи в плазме); Z_N — импеданс (полное сопротивление) нагрузки, учитывающий потери в плазме; U — напряжение на антenne; I_1 — ток в антenne; I_2 — индуцируемый ток в плазме L_{12} и L_{21} — коэффициенты [4]. Решение системы уравнений (2.8)–(2.9) позволяет найти импеданс антены $Z = U/I_1$ в виде

$$Z = j\omega(L_{11} - L_{12}L_{21}/[L_{22} + (Z_N/j\omega)]) \quad (2.10)$$

и индуцируемый в плазме ток

$$I_2 = -\frac{U}{Z} \frac{L_{21}}{L_{22} + (Z_N/j\omega)}. \quad (2.11)$$

В отсутствии нагрузки (плазмы) $Z_N = \infty$ и $Z = j\omega L_{11}$.

Характеристики нагруженной системы зависят от соотношения L_{11} и L_{22} , а также коэффициентов взаимной индукции L_{12} и L_{21} . Как известно, выполняется соотношение $L_{11}L_{22} \geq L_{12}L_{21}$, причем равенство может иметь место, если магнитные потоки через первичную и вторичную обмотки совпадают. Это возможно при применении магнитного сердечника (как в трансформаторе), либо при совпадении пространственного распределения тока первичной и вторичной обмоток, то есть тока антены и индуцированного тока в плазме для нашего случая. Если плотность плазмы велика ($Z_N \ll j\omega L_{22}$), то из (2.10) следует

$$Z = j\omega(L_{11} - L_{12}L_{21}/L_{22}) + Z_N L_{12}L_{21}/L_{22}^2. \quad (2.12)$$

Таким образом, если $L_{11}L_{22} \neq L_{12}L_{21}$, то антenna имеет не скомпенсированный индуктивный импеданс. Именно наличие этого импеданса приводит к необходимости в стандартных TCP-источниках увеличивать напряжение на антenne в рабочем режиме до нескольких киловольт, что ведет к дополнительным потерям энергии в антenne. В соответствии с (2.12), этот импеданс ограничивает ток, индуцируемый во вторичной обмотке (плазме).

Для уменьшения импеданса необходимо увеличивать степень индуктивной связи цепей (контуров) антенны и плазмы. Пути увеличения этой связи можно понять, рассмотрев плазму как идеальный проводник, а антенну — как кольцо радиусом R из проводника с сечением радиуса r , находящегося на расстоянии h над этим идеальным проводником (рис. 2.23). В этом случае распределение токов по поверхности проводника таково, что создаваемое им поле может быть рассмотрено как поле тока, текущего внутри проводника симметрично току антенны относительно границы проводника. Индуктивности L_{21} и L_{22} могут быть оценены по следующим формулам (в предположении, что ток течет по поверхности кольца):

$$L_{22} = L_{11} = \mu_0 \mu R [\ln(8R/r) - 2], \quad (2.13)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость материала цепи.

Коэффициент взаимной индукции можно оценить для условия $r \ll h \ll R$. В этом случае, считая поле вблизи проводника полем прямого тока и оценив магнитный поток, проходящий в пространстве между кольцами, получим:

$$L_{12} = L_{21} = L_{11} - \Delta L, \quad (2.14)$$

где

$$\Delta L = \mu_0 \mu R [\ln(2h/r) - 2]. \quad (2.15)$$

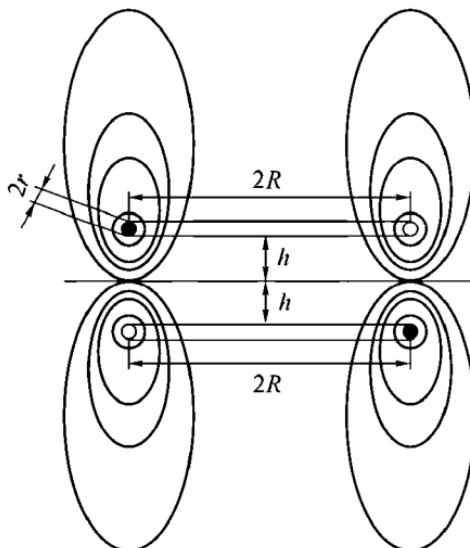


Рис. 2.23. Схематичное изображение взаимодействия антенны и плазмы в реакторе

С учетом (2.13) и (2.15), формула (2.14) принимает вид

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu R [\ln(8R/2h) - 2], \quad (2.16)$$

а выражение (2.12) можно переписать в виде

$$Z = j\omega [(2L_{11}\Delta L - \Delta L^2)/L_{11}] + Z_N[(L_{11} - \Delta L)^2/L_{11}^2]. \quad (2.17)$$

Из (2.14)–(2.17) следует, что для увеличения коэффициента связи и, тем самым, компенсации индуктивного импеданса необходимо уменьшать расстояние между индуцирующим витком и плазмой. Реальным физическим ограничением этого размера, по достижении которого наблюдается существенное увеличение коэффициента связи между током антенны и индуцированным током в плазме, следует считать глубину проникновения поля в плазму Λ в рабочем режиме, так как в плазме в отличие от идеального проводника индуцируемый ток распределен по ее поверхностному слою толщиной порядка Λ (для электронной плотности 10^{11} см^{-3} получаем $\Lambda = 1,7 \text{ см}$, а для 10^{12} см^{-3} — $\Lambda = 0,51 \text{ см}$). Тем не менее, дальнейшее уменьшение расстояния между антенной и границей плазмы также ведет к росту коэффициента связи, хотя и не такому значительному, как при движении с расстояний, превышающих Λ .

Реальным конструктивным ограничением размера, до которого можно уменьшать расстояние между антенной и плазмой, следует считать толщину диэлектрика, разделяющего антенну и плазму. Эта толщина определяется термомеханической, химической и электрической прочностью экранирующего диэлектрического материала. Поэтому прочностные характеристики окон из диэлектрика выходят на первый план в конструкциях ТСР-источников, где окно разделяет антенну, находящуюся в атмосфере, и вакуумный объем.

Кроме наведения тока в плазме помещенная внутрь рабочей камеры антenna способна наводить паразитные токи на металлических стенках рабочей камеры. Для объяснения условий, при которых эти токи несущественны, рассмотрим магнитное поле, создаваемое совместно токами, текущими по антенне и по плазме. При больших плотностях электронов и расположении антенны вблизи поверхности плазмы магнитные поля этих токов взаимно компенсируют друг друга. Результирующее магнитное поле, создаваемое этими токами на расстоянии H , которое превышает расстояние между током в антенне и током в плазме, резко падает при удалении от антенны (пропорционально $1/H^3$).

В реальной системе такой спад магнитного поля начинается при удалении от антенны с расстояния, равного сумме расстояния от антенны до границы плазмы, и глубины проникновения поля в плазму (то есть $H > h + \Lambda$). Эксперименты показали, что наведенные в камере токи практически не сказываются на характеристиках антенны в рабочем режиме, если она удалена от металлической поверхности рабочей камеры на расстояние, большее утроенной глубины скин-слоя.

Одной из проблем при разработке газоразрядных систем, в которых потенциальный электрод размещается внутри рабочей камеры, является предотвращение процессов плазмообразования между электродом и близлежащими стенками камеры (или фланцем, на котором размещается электрод). В TCP-устройстве пробой промежутка между антенной и стенкой камеры приводит к уменьшению эффективности процесса плазмообразования в рабочей области между антенной и подложкодержателем, поскольку на пробой в нерабочей области тратится дополнительная энергия, что в целом снижает эффективность работы TCP-источника.

Вероятность пробоя зависит от величины зазора, электрического поля, давления газа, формы поверхностей. Хотя расстояние между антенной и поверхностью рабочей камеры обычно существенно меньше, чем расстояние от антенны до подложкодержателя, при низких давлениях, когда длина свободного пробега ионизирующих электронов достаточно велика, генерация плазмы происходит преимущественно в области антenna—подложкодержатель. Вероятность процессов ионизации существенно снижается также из-за высокого значения электрического поля в сравнительно малом зазоре между антенной и стенкой камеры, так как при очень сильных полях уменьшается сечение ионизации газа электронами. Тем не менее, при сравнительно высоких давлениях газа пробои в нерабочих областях вакуумного объема возможны.

Для исключения эффекта пробоя достаточно заполнить пространство между антенной и поверхностью рабочей камеры твердым диэлектриком (полностью или частично). Влияние частичного заполнения пространства диэлектриком связано с увеличением вероятности рекомбинации электронов и ионов на диэлектрике, что уменьшает время жизни электрона в зазоре и увеличивает поле, необходимое для поддержания плазмы.

При обработке микроструктур, чувствительных к зарядовому и энергетическому воздействию, важной проблемой является сни-

жение электрического поля вблизи обрабатываемой подложки. В этом случае в окрестности подложки необходимо минимизировать ВЧ-поле, что обеспечит малую энергию бомбардирующих ионов, а также предотвратит пробой тонких диэлектрических слоев на подложке. С этой целью подложка должна быть удалена от антennы на расстояние, не меньшее угрожающей глубины проникновения поля в плазму. А поскольку обычно расстояние между антенной и подложкой превышает 10 см (при меньших расстояниях затрудняется возбуждение разряда и растет минимальное давление, при котором может существовать стационарный разряд), то в плазменных установках для травления и нанесения пленок указанное условие выполняется практически всегда.

2.3.5.7. Современные методы формирования канавок в кремнии

В настоящее время для формирования канавок в кремнии используется несколько технологических процессов:

- непрерывный (в едином вакуумном цикле) процесс травления кремния на глубину до 20 мкм с применением от 2 до 5 стадий сухого травления;
- два процесса глубинного травления кремния с высоким аспектным отношением (отношение глубины к ширине канавки более 10): процесс с переменной модуляцией газа, известный в литературе как Bosch-процесс фирмы Alcatel или TMGM-процесс фирмы Applied Materials (Time Multiplexed Gas Modulation Process) [6], и процесс, проводимый при низких температурах — криопроцесс, который широко используется фирмами Oxford Instruments и ST.

Все три процесса проводятся в реакторах высокоплотной плазмы (HDP), так как в них достигается необходимый баланс между ионами и радикалами (обе составляющие необходимы в процессе травления, однако их соотношение необходимо строго контролировать, ибо излишок ионов влияет на профиль, а излишек свободных радикалов увеличивает скорость травления кремния), а также не возникает проблем с удалением продуктов травления. Наиболее широко распространенная форма HDP-реакторов — реакторы ICP (TCP). Реакторы HDP обычно реализуются в триодных системах травления. Поэтому помимо оптимального баланса активных частиц достигается и оптимальный уровень энергетического воздействия.

Непрерывный процесс травления кремния применяется для изготовления неглубоких структур с гладкими боковыми

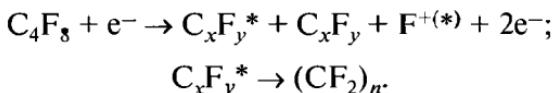
стенками и скругленным дном, таких как мелкощелевая изоляция (shallow trench isolation), а также щелей для формирования активного элемента в производстве щелевых МОПТ (металл-оксид-полупроводниковые транзисторы).

Непрерывный процесс травления — это реактивно-ионное травление кремния во фтор- или хлорсодержащих газах. Радикалы фтора и хлора взаимодействуют с поверхностью кремния и удаляются в виде летучих соединений SiF_4 и SiCl_4 . Роль ионной бомбардировки состоит в том, что она воздействует на поверхность кремния, освобождая на ней активные связи, при этом взаимодействие атомов нарушенной поверхности с химически активными частицами ускоряется. Кроме того, ионная бомбардировка стимулирует десорбцию продуктов взаимодействия химически активных частиц с кремнием на его поверхности. В настоящее время для травления канавок в кремнии в основном используют смеси газов $\text{SF}_6\text{—O}_2$, $\text{HBr}\text{—Cl}_2\text{—He}\text{—O}_2$, $\text{SF}_6\text{—O}_2\text{—CHF}_3$ и $\text{SF}_6\text{—O}_2\text{—HBr}$. Анизотропность травления достигается благодаря добавке HBr или CF_3H . Радикалы Br^\bullet или полимер C_xF_y осаждаются на боковых стенках и препятствуют боковому травлению за счет своих размеров и низкой активности при отсутствии ионного воздействия. Под действием высокоплотной плазмы HBr расщепляется с образованием радикалов Br^\bullet , а циклический фторуглерод диссоциирует в высокоплотной плазме с образованием CF_2^\bullet и более длинных радикальных цепей. В случае использования смеси $\text{SF}_6\text{—O}_2$ либо $\text{SF}_6\text{—O}_2\text{—HBr}$ на боковых стенках образуется высадка, близкая по составу к SiO_x , которая также не удаляется при отсутствии ионного воздействия.

Для непрерывного процесса характерны относительно низкие скорости травления кремния (до 3 мкм/мин) и относительно низкая селективность к материалу маски (до 7 к фотополимеру и до 50 к SiO_2). Достоинствами процесса являются высокая гибкость и воспроизводимость, обеспечивающие возможность формирования канавок с гладкими стенками и скругленным дном. Также можно отметить и экономическую выгоду: нет необходимости в сложных дорогостоящих газовых системах с переменной модуляцией газов либо сложных системах поддержания криотемпературы на подложкодержателе с высокой точностью и стабильностью. Кроме того, на оборудовании данного типа возможна реализация широкого спектра и других процессов, необходимых для всей технологической цепочки.

В Bosch-процессе для травления кремния применяется плазма фтора, объединенная с плазмой фторуглерода для пассивации

боковых стенок и улучшения селективности относительно маски. Исходным газом, который используется для создания потока радикалов фтора высокой плотности, обеспечивающих травление кремния с очень высокой скоростью, является гексафторид серы (SF_6) либо трифтормицита (NF₃). Молекула SF₆ расщепляется в высокоплотной плазме с образованием свободных радикалов фтора. Пассивация боковых стенок канавки и защита маски обеспечивается октрафторциклогексаном.

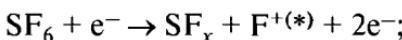


Полный цикл процесса повторяется много раз, обеспечивая тем самым глубокий вертикальный профиль, но с зазубренным краем.

Формирование профиля с определенным аспектным отношением реализуется в две стадии: травление кремния и пассивирующего слоя; пассивация.

Стадия травления с использованием SF₆ в качестве исходного газа состоит из трех этапов:

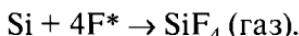
- 1) расщепление молекулы SF₆ с образованием свободных радикалов фтора:



- 2) травление полимера (CF₂)_n радикалами фтора с образованием летучего соединения C_xF_y:



- 3) после удаления полимера радикалы фтора травят кремний, который удаляется как летучий SiF₄:



Профиль, скорость травления, селективность к материалу маски и шероховатость боковой стенки варьируются подбором продолжительности шага травления и шага осаждения или отношением времен двух этих шагов.

Недостатком Bosch-процесса является выраженная шероховатость боковых стенок (скалlopы), образующаяся в виде раковины после каждого шага травления (рис. 2.25 на с. 116). Размер раковины определяют по ее высоте (h) и глубине (d). Чем эти параметры ниже, тем гладче стенка канавки. (Для этого необходимо минимизировать времена травления и пассивации, но при этом итоговая скорость травления кремния уменьшается.)

Bosch-процесс малочувствителен к природе фоторезиста, что позволяет не сильно структурировать резист до травления. Фактически, лучше избегать обработки фоторезиста при высокой температуре, так как при этом может измениться его профиль, что, естественно, приведет к искажению размеров травимой структуры. В ряде случаев можно использовать стабилизацию фоторезиста глубоким ультрафиолетом (ГУФ).

Процесс не может быть выполнен в системе реактивно-ионного травления, поскольку в этой системе не достигается необходимый баланс ионов и радикалов.

Оборудование для проведения Bosch-процесса должно удовлетворять следующим техническим требованиям:

1) регуляторы расхода газа (РРГ) должны обеспечивать прецизионную подачу рабочего газа;

2) расстояние между подложкой и ICP-областью генерации должно быть не менее 100 м м для обеспечения необходимого баланса между ионами и радикалами (пониженное отношение количества ионов к радикалам, обосновано большим временем жизни свободных радикалов, чем ионов);

3) обеспечение чисто индуктивного удерживания плазмы в ICP-области для постоянства и равномерности потока ионов на подложку;

4) стенки, крышка реактора и насосные линии должны прогреваться, так как это препятствует осаждению полимера фторуглерода в данных областях, и, как следствие, понижает вероятность загрязнения подложки частицами полимеров, а также уменьшает осаждение серы в насосных линиях и турбонасосе, которое усложняет обслуживание и уменьшает надежность откачной системы;

5) линия смешения газов между РРГ и рабочей камерой должна быть максимально короткой для минимизации задержек времени между открытием РРГ и поступлением газа в реактор (короткая линия смешения газов между РРГ и процессной камерой минимизирует время одного шага процесса);

6) нижний электрод должен быть снабжен фокусирующим плазму кольцом из материала (например, SiO_2 , SiC), не вносящего загрязняющих примесей.

Скорость травления кремния в Bosch-процессе достигает 20 мкм/мин, селективность относительно фоторезиста — 75, относительно SiO_2 — 200. Технические сложности процесса заключаются не только в модуляционной подаче различных газов, но и в достижении высокого уровня согласования разряда различного состава в очень короткие промежутки времени. В реак-

торе PEGASUS фирмы STS, в котором реализованы самые последние технические и технологические достижения, получены рекордные значения скорости анизотропного травления Si — 50 мкм/мин с сильно зазубренным профилем травления.

В криогенном процессе для травления кремния используется SF₆ (для создания радикалов фтора) и O₂. Для пассивации боковой стенки и защиты маски служит формирующийся в ходе травления слой оксифторида кремния (SiO_xF_y). При этом взаимодействие радикалов фтора с таким блокирующим слоем либо с самим кремнием при криогенных температурах снижается на порядок. Ионная бомбардировка способствует постоянному удалению этого слоя, а поток радикалов фтора взаимодействует со свободной поверхностью кремния, благодаря чему скорость травления возрастает. Кремний удаляется в виде летучего соединения SiF₄.

Низкая температура способствует уменьшению скорости травления материала маски (фоторезист или SiO₂). Взаимодействие радикалов фтора с этими материалами является химическим и чувствительно к температуре: скорость травления быстро снижается при приближении к криогенным температурам. Следует помнить, что низкая температура плохо влияет на некоторые органические материалы — они могут растрескиваться. Причем в большей степени это актуально для толстых фоторезистов, чем для тонких слоев. Поэтому слои резистов, используемые для этого типа процесса, не должны быть толщиной больше, чем 1,5 мкм. Если необходим более толстый слой, для очень глубокого травления, то в качестве маски применяют диоксид кремния.

Криогенный процесс сильно чувствителен к температуре пластины — даже незначительное изменение температуры может привести к уходу размеров и изменению профиля. Для улучшения однородности травления по пластине необходимо обеспечить однородность температуры по пластине.

Этот процесс может проводится в обычном РИТ-реакторе, но при использовании реактора высокоплотной плазмы есть существенные преимущества. Реактор высокоплотной плазмы позволяет создавать высокую плотность свободных радикалов, не производя при этом большого количества высокоэнергичных ионов. Ионная бомбардировка необходима в этом процессе, но слишком высокая энергия ионов приводит к плохим профилям и уменьшению селективности к материалу маски.

Температура электрода не должна быть ниже 130 °С, поскольку более низкие температуры приведут к конденсации SF₆ на пластине. Это приведет к кристаллографическому ориентированному травлению кремния, что может изменить профиль у основания структуры с круглой формы на квадратную.

Энергия ионов, варьируемая прежде всего ВЧ-потенциалом подложки, и плотность потока ионов, управляемая ВЧ-мощностью индуктора, являются основными факторами, влияющими на эрозию маски. При потенциале на подложке меньше значения 20 В селективность кремния к оксидной маске может достигать величины 750 : 1.

Фоторезист должен быть задублен в глубоком ультрафиолете (ГУФ-стабилизация) для создания полностью устойчивой структуры с минимумом оставшихся растворителей. Это уменьшает риск растрескивания и способствует достижению высокой селективности.

Криогенный процесс можно назвать чистым, при его протекании не образуется полимер, осаждающийся на поверхности камеры. Если мощность индуктора недостаточна, то возможны небольшие отложения серы в насосных линиях, но в целом любая образующаяся сера будет реагировать с кислородом и будет удаляться в виде SO₂. Таким образом, камера для этого процесса не нуждается в очистке.

Этот процесс мог быть осуществлен на том же оборудовании, что и Bosch-процесс, но определенные различия в требованиях к аппаратным средствам все же имеются, в том числе ниже приведенные условия лучшего выполнения процесса криогенного травления кремния.

На стадии криогенного охлаждения для достижения поверхностью столика температуры ниже –110 °С необходим жидкий азот. Для эффективной теплопередачи от пластины к подложкодержателю под пластину через специальные каналы вводится гелий. Причем никаких полимерных уплотнений быть не должно, так как материал уплотнения будет терять гибкость при криогенных температурах. Это относится и к О-, и к V-образным прокладкам. Лучший способ достижения стабилизированной температуры на больших пластинах состоит в многократном введении гелия под поверхность пластины. Контроль температуры пластины критически важен, поскольку изменение температуры приводит к изменению профиля.

Регулятор расхода газа (РРГ) для кислорода должен обеспечивать низкий расход O₂, так как избыток кислорода в смеси с SF₆

может отрицательно влиять на профиль травления. Чувствительность процесса к кислороду настолько велика, что должно быть принято во внимание даже то количество кислорода, которое освобождается со стенок реактора в результате их взаимодействия с плазмой. Чем больше кислорода, тем более положительным становится наклон боковых стенок канавки (канавка сужается по мере увеличения ее глубины). Кроме того, отрицательное влияние на процесс большого количества кислорода выражается в виде микродефектов на поверхности травления, что может привести к формированию так называемого «черного кремния». Для достижения положительных профилей без появления «черного кремния» требуется очень точный контроль потока кислорода при отладке процесса.

Эффективный прижим пластины к подложкодержателю помогает получить равномерное распределение температуры по поверхности пластины. Плохой прижим может привести к неравномерному распределению гелия под пластиной. Кремний имеет хорошую теплопроводность при комнатной температуре, однако при криогенных температурах теплопроводность ухудшается. Поэтому незначительные изменения температуры подложкодержателя под пластиной могут привести к большим различиям температуры на ее поверхности, а следовательно, к неоднородности травления.

Еще одно достоинство криогенного процесса — отсутствие необходимости в высокопроизводительных турбомолекулярных насосах и скоростных РРГ.

Основным недостатком этих двух методов является проблема шероховатости боковых стенок. Однако для целей микромеханики эти методы подходят и позволяют создавать рельеф в кремнии или материалах $A^{III}B^V$ высотой до 400 мкм и даже более.

Анализ применимости методов травления канавок в кремнии для производства СБИС. Из перечисленных способов травления канавок в кремнии наиболее полно удовлетворяют требованиям производства СБИС непрерывный (рис. 2.24) и криогенный процессы, так как в этих процессах из-за постоянной подачи газа создаются относительно гладкие боковые поверхности и формируется скругленное дно (в случае криогенного процесса стенки имеют шероховатость). Однако криогенный процесс имеет существенный недостаток — значительную температурную чувствительность, что требует более тщательной очистки обратной стороны пластины для обеспечения равномерной теплопровод-

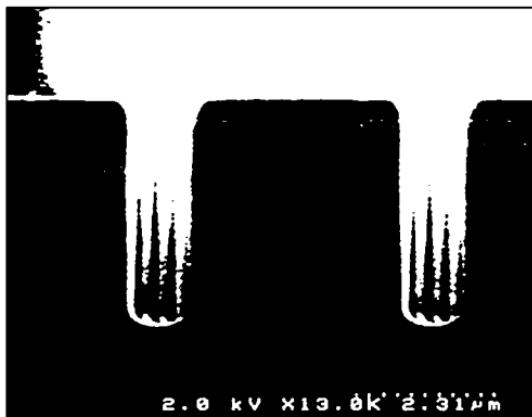


Рис. 2.24. Канавка в кремнии, полученная с помощью непрерывного процесса травления

ности по всей поверхности. Это обстоятельство делает его сложным и дорогостоящим, а следовательно, малопригодным для серийного производства ДМОП-транзисторов (ДМОП — динамические транзистор со структурой металл—оксид—полупроводник).

Криогенный процесс используется при изготовлении углублений с положительным профилем и при травлении больших открытых областей, например, при формировании микроигл.

Bosch-процесс — высокоскоростной процесс травления, позволяющий достичь высоко аспектного отношения, который удовлетворяет практически всем требованиям: вертикальность стенок канавок, получение U-образного дна с радиусом закругления $1/3$ от ширины канавки, высокая воспроизводимость глубины и профиля травления по площади пластины. Однако недостатком этого процесса является шероховатость стенок, возникающая в виде раковин после каждого шага травления (на рис. 2.25 эти дефекты хорошо видны). Очевидно, что чем меньше размеры раковин, тем гладже стенка канавки. Для уменьшения шероховатости стенок необходимо увеличивать частоту переключения газов плазмы при сохранении постоянства отношения составляющих элементов цикла (травление/пассивация). Но идеально гладкую боковую поверхность пока получить не удается.

Если в технологии ДМОП-транзисторов использовать Bosch-процесс, то при дальнейшем окислении поверхности канавки получается неровный слой оксида с множеством дефектов. В результате этого у транзистора увеличивается длина

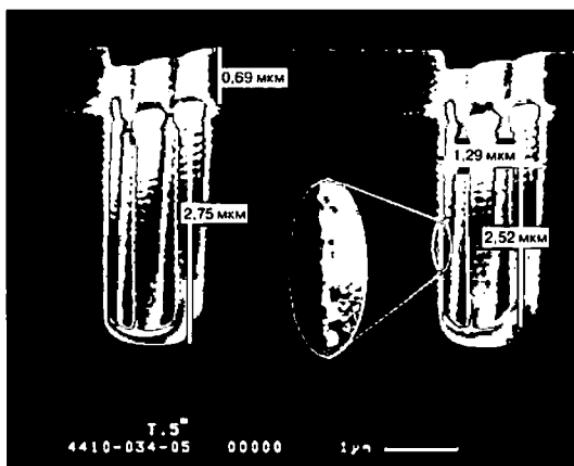


Рис. 2.25. Канавка в кремнии, полученная с помощью Bosch-процесса

канала (L) и уменьшается подвижность носителей заряда (μ), а соответственно растет и сток-исток сопротивление ($R \sim L/\mu$). Отсюда следует вывод о неприменимости Bosch-процесса в технологии ДМОП-транзисторов.

Наиболее эффективен Bosch-процесс для изготовления микроэлектромеханических изделий широкого назначения: от пишущих головок принтера до чувствительных элементов акселерометров и гироскопов, так как для МЭМС-технологий важными факторами являются скорость травления, селективность, возможность достижения высокого аспектного отношения, высокая однородность по пластине и дешевизна процесса.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для формирования канавок в кремниевом слое в технологии силовых ДМОП-транзисторов наиболее целесообразным является использование непрерывного процесса травления кремния.

2.4. Тенденции развития плазменных систем в области высоких технологий

Как было отмечено выше, современная тенденция развития плазменных систем направлена на развитие триодных реакторов с источниками плотной плазмы. Основные положения, которые учитываются разработчиками современного оборудования, заключаются в удовлетворении любых требований современного производства УБИС, микро- и наномеханических систем. К на-

иболее передовым решениям разработчиков оборудования относятся высококачественные модули, которые реализуют самые современные процессы с высочайшими и стабильными технологическими характеристиками для пластин различных диаметров, вплоть до 300 мм. Каждый такой модуль травления должен соответствовать следующим требованиям:

- совместимость с платформой для загрузки-выгрузки образцов и с другими модулями;
- полная автономность исполнения;
- малая занимаемая площадь и малая площадь контактирования с незагрязненными помещениями;
- обеспечение высокой контролируемости состояния процесса, простое и гибкое программное обеспечение;
- обеспечение высоких технологических характеристик процесса;
- стабильность технологических характеристик при обработке максимально возможного количества пластин;
- низкая стоимость проведения операции в расчете на одну пластину;
- высокая надежность всех элементов и рабочих узлов;
- обеспечение высокой производительности операции;
- максимальное время и количество пластин между чистками;
- возможность работы с пластинами разного диаметра (от 75 до 200 мм);
- поддержание низкой температуры пластин во время проведения процессов;
- упрощенный доступ всех элементов и рабочих узлов для технического обслуживания и ремонта;
- возможность использования систем для определения момента окончания процесса травления/осаждения (End Point Detection).

Для обеспечения вышеперечисленных требований ведущие фирмы-производители стремятся к формированию следующей архитектуры своих установок:

- каждый модуль стыкуется с устройством загрузки-выгрузки, работающим автономно либо в составе платформы, осуществляющей транспорт пластин от модуля к модулю в едином вакуумном пространстве с высокой надежностью и производительностью;

- каждый модуль оснащается собственным программным обеспечением, стыкующимся с общим компьютером;
- многоуровневый мониторинг обеспечивает как контроль всех узлов установки в реальном времени, так и реализацию многостадийных процессов;
- программное обеспечение обычно реализовано в среде Windows GUI с архитектурой Device Net (либо другой аналогичной) с выводом информации на тактильные мониторы. Система управления позволяет в режиме реального времени через LAN/modem/internet обеспечивать удаленный доступ к установке и осуществлять контроль процессов, анализируя состояние установки и возникающие отказы;
- транспортная система обладает высочайшей надежностью, базируется на современных платформах типа Magathon Express 600 (MX600) фирмы Brooks Automation с роботом Brooks Mag7 либо других аналогичных и обеспечивает перенос пластин в любой последовательности между модулями. С помощью платформы 2–4 модуля формируют кластерную систему, позволяющую на одной установке реализовать одновременно 2–3 сложных процесса;
- конфигурация платформы с модулями рассчитывается исходя из требований минимально занимаемой площади и одновременно максимально возможного доступа к отдельным узлам;
- отдельные модули могут реализовывать сложнейшие процессы глубокого скоростного травления кремния по современным технологиям Bosh-процесса либо криогенного травления, высокоселективного травления металлизированных поверхностей с использованием бромводорода, высокоскоростного травления диоксида кремния в реакторе триодного типа с применением новых реагентов (гексафторбутадиен, перфтордекалин и др.), газового изотропного травления SiO₂ и Si, а также низкотемпературного ICP химического осаждения паров. На одной–двух кластерных установках можно реализовать все технологические плазменные процессы для современного производства изделий МЭМС и наносистем. На рис. 2.6 и в табл. 2.4 приведены пример конфигурации кластерной установки, реализующей ряд операций технологического маршрута производства изделий МЭМС, и ее характеристики.

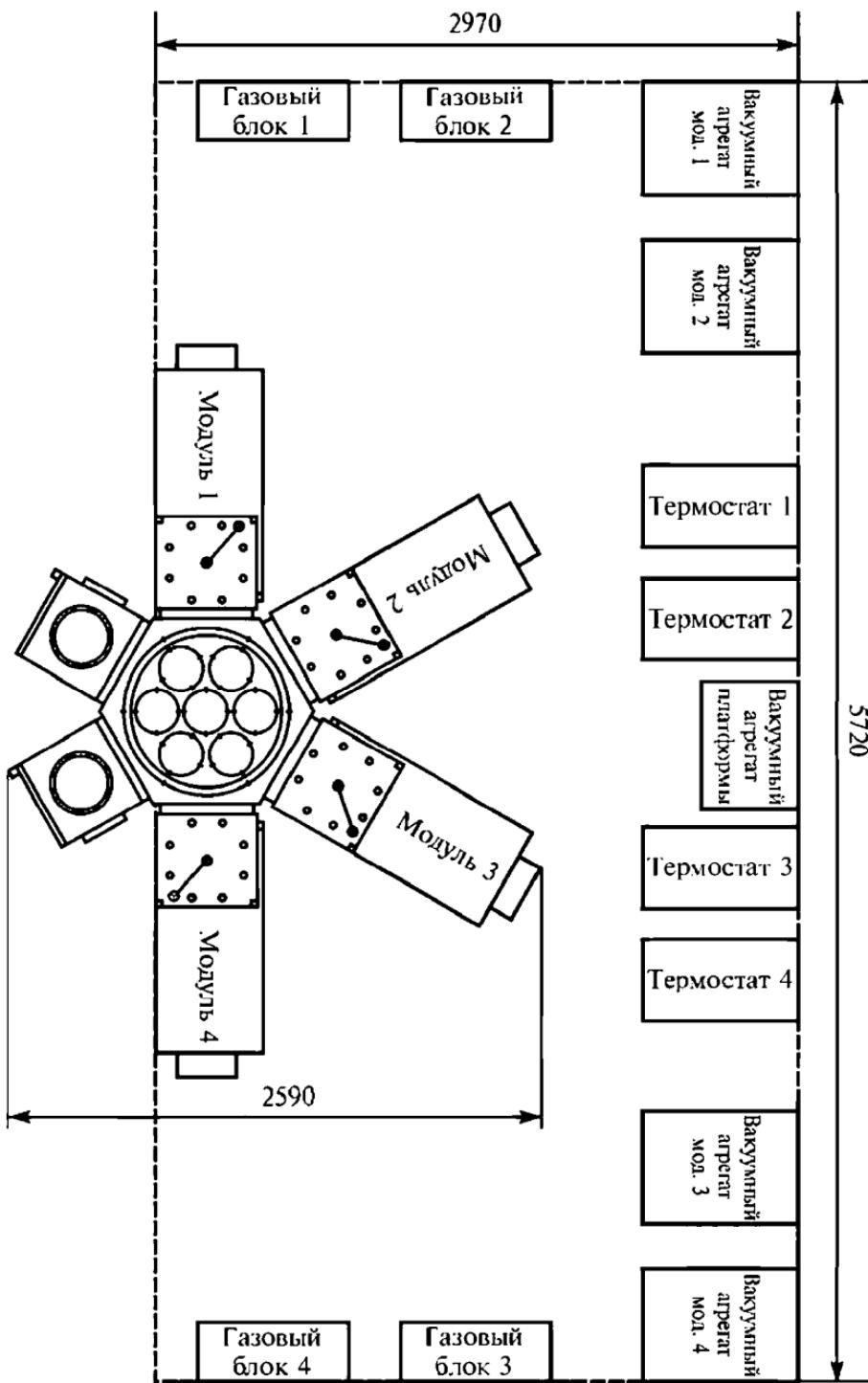


Рис. 2.6. Размещение кластерной установки с четырьмя модулями

Огромное внимание разработчики плазменных систем уделяют также разработке модулей, усовершенствованных по конструкции и характеристикам источников плазмы высокой плотности, термостабилизации обрабатываемых пластин и стенок реактора, с применением новейших материалов внутrikамерной оснастки. Самые последние реакторы, учитывающие распределения формируемых радикальных и ионных потоков на подложку для достижения максимальных скоростей травления и равномерности, разработаны фирмами LAM Research (Kiyo), Alcatel (I-Spider), STS (Pegasus), Oxford Instruments (Plasmalab System 100 ICP-RIE) и ECTO-Вакуум (Каролина 15).

В качестве примера можно рассмотреть реализацию одного из наиболее эффективных источников плазмы Pegasus, на котором были получены рекордные технологические характеристики Bosh-процесса травления кремния по скорости (более 50 мкм/мин), аспектному отношению (до 100 : 1) и равномерности (менее 3% на пластине диаметром 150 мм).

- Для достижения максимальной равномерности травления разработан уникальный источник плазмы с двойным индуктором и двумя зонами разряда, разделенными магнитной отсечкой. Использование магнитного поля сложной конфигурации позволяет получить такое распределение плотности ионного потока, которое компенсирует неравномерность распределения потока радикалов, связанную с их гибелю на пластине;
- Для обеспечения высокой стабильности технологических характеристик процесса и достижения максимального времени работы между чистками стенки реактора прогреваются до температуры 120–140 °С, покрываются оплавленной керамикой, при этом они дополнительно защищены от воздействия плазмы продольным магнитным полем. Этим целям способствует также применение мощной вакуумной системы, включающей высокоскоростной (до 2000 л/с) турбомолекулярный насос, быстродействующие дроссельные заслонки, а также современной газовой системы с автономными газовыми линиями минимальной протяженности и быстродействующими клапанами и регуляторами расходов газов;
- Для обеспечения уникальных характеристик по равномерности поддержания температуры пластины по всей поверхности во время травления, помимо распределенного ввода гелия под пластину, обеспечивающего отвод тепла от плас-

тины и передачу его охлаждаемому подложкодержателю, применяется оригинальный электростатический прижим с толстым (толщиной 300 мкм) диэлектрическим защитным слоем (оксид алюминия), который обеспечивает высокую равномерность по температуре и дополнительно защищает подложкодержатель от повреждений, позволяя проводить плазменные отжиги реактора без пластин.

- Программное обеспечение позволяет при травлении в кремнии структур с высоким аспектным отношением (более 10–20) управлять технологическими параметрами процесса с учетом изменения условий травления по мере увеличения аспектного отношения.

Отметим, что большинство отмеченных технических решений защищены патентами, что повышает коммерческую значимость оборудования и ее высокий промышленный уровень.

Таблица 2.4

Конфигурация кластерной установки с четырьмя модулями

Функциональное назначение узла установки	Основная характеристика	Используемые газы
Базовая платформа на четыре модуля	Гексагональная	
Камера загрузки-выгрузки	Две независимые платформы с кассетами для пластин 75-200 мм	
Модуль глубокого травления кремния (Bosh-процесс)	ICP-камера травления кремния	C ₄ F ₈ , SF ₆ , O ₂ , Ar
Модуль травления диэлектрических слоев (SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , фосфорно-силикатное стекло и др.)	ICP-камера травления	C ₄ F ₈ , SF ₆ , O ₂ , Ar, CF ₄ , He, CF ₃ H
Модуль травления (поликристаллический кремний, Si ₃ N ₄ , полициды)	ICP-камера травления	Cl ₂ , HBr, O ₂ , Ar, SF ₆ , He
Модуль атомно-слоевого осаждения	ICP-камера осаждения («FlexAl») с нагреваемым столиком	Триметилалюминий, O ₂ и др.

Глава 3

Методы контроля технологических параметров и диагностики плазмы

Очень важными моментами при разработке плазменных процессов и их промышленном использовании являются контроль технологических параметров и диагностика плазмы. Методы контроля технологических параметров и диагностики плазменных процессов начали развиваться задолго до применений плазменных процессов в технологиях полупроводниковых приборов. Их обширный обзор приведен в работе [21]. Первые эксперименты с низкотемпературным тлеющим газовым разрядом были проведены еще в XIX в. Фарадеем и Круксом. В последующие годы тлеющий разряд служил источником частиц, изучаемых с помощью различных аналитических методик. К моменту первых разработок плазменных процессов для изготовления ИС, имелось уже достаточно много различных методик, пригодных для зондирования, анализа и детектирования процессов в промышленных системах.

Параллельно шла разработка методов контроля технологических параметров обработки пластины, в частности скорости травления, равномерности и селективности. Отработанные методики, которые применяются для контроля и измерения технологических параметров, приведены на рис. 3.1. Весь набор инструментов для данных исследований достаточно велик, и их можно разделить на два основных класса:

- для определения технологических характеристик;
- для исследования физико-химических процессов, протекающих в плазме и на поверхности пластин.

Технологические характеристики определяют как на тестовых пластинах, измеряя толщины пленок, параметры рельефа и линейные размеры топологии, так и косвенно по моменту окончания травления. Наиболее широко для измерения момента окончания травления используют лазерную интерферометрию, оптическую спектроскопию и вторичную ионную масс-спектрометрию. На пластинах широко применяют приборы с индикатор-

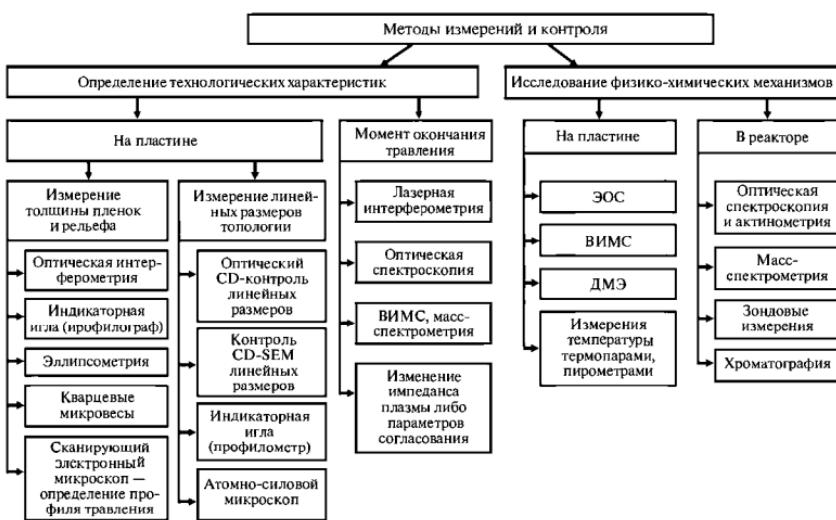


Рис. 3.1. Методы измерений и контроля технологических параметров и диагностики плазмы

ной иглой (профилометры, профилографы), эллипсометры, оптические интерферометры, а также одно из наиболее эффективных средств — растровый электронный микроскоп, который дает информацию о морфологии поверхности, топологическом рисунке, наличии дефектов и других отклонений, сечении рабочей структуры по глубине. Для измерения линейных размеров топологического рисунка используются оптический CD-контроль (Critical Dimensions), сканирующий электронный микроскоп с CD-контролем, приборы с индикаторной иглой (профилографы, профилометры), а также атомно-силовые микроскопы и их разновидности.

Для изучения физико-химических механизмов процессов, протекающих на поверхности пластин и в плазме используются такие научно-исследовательские методы как электронная Оже-спектроскопия (ЭОС), дифракция медленных электронов (ДМЭ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), масс-спектрометрия, пирометрия, оптическая спектроскопия и актинометрия, зондовые измерения физических параметров плазмы, хроматография и т. п.

Далее мы рассмотрим физические и технические основы данных методов измерения, контроля и диагностики.

3.1. Измерение профиля травления приборами с индикаторной иглой

Приборы с индикаторной иглой широко используются для измерения шероховатости поверхности. Если ступенька выполняется в нанесенной пленке путем маскирования участка подложки во время нанесения или удаления части пленки с подложки, то в этом случае индикаторная игла может служить для измерения толщины пленки. При исследовании качества обработки поверхности игла должна иметь очень тонкое острие для достаточно точного воспроизведения поверхностного рельефа и очень маленький вес, чтобы по возможности ограничить ее проникновение внутрь пластины. В основе измерений лежит сравнение вертикального перемещения иглы, движущейся вдоль поверхности образца, с движениями щупа на гладкой и плоской поверхности, принятой за эталон. Последним может служить специальный образец или участок поверхности самого измеряемого образца. Разность вертикального перемещения иглы и щупа преобразуется в электрический сигнал (для этого

могут быть использованы различные типы преобразователей [22]), затем сигнал усиливается и регистрируется на ленте.

Примеры результатов измерения толщины пленки, полученных на приборе *Talystep 1* — наиболее современном из известных профилометров-профилографов — представлены на рис. 3.2. Прибор позволяет измерять толщину пленки в диапазоне от 20 \AA до 10 мкм с точностью в несколько процентов. В примере на рис. 3.2, *a* кварц нанесен через маску на стеклянную подложку,

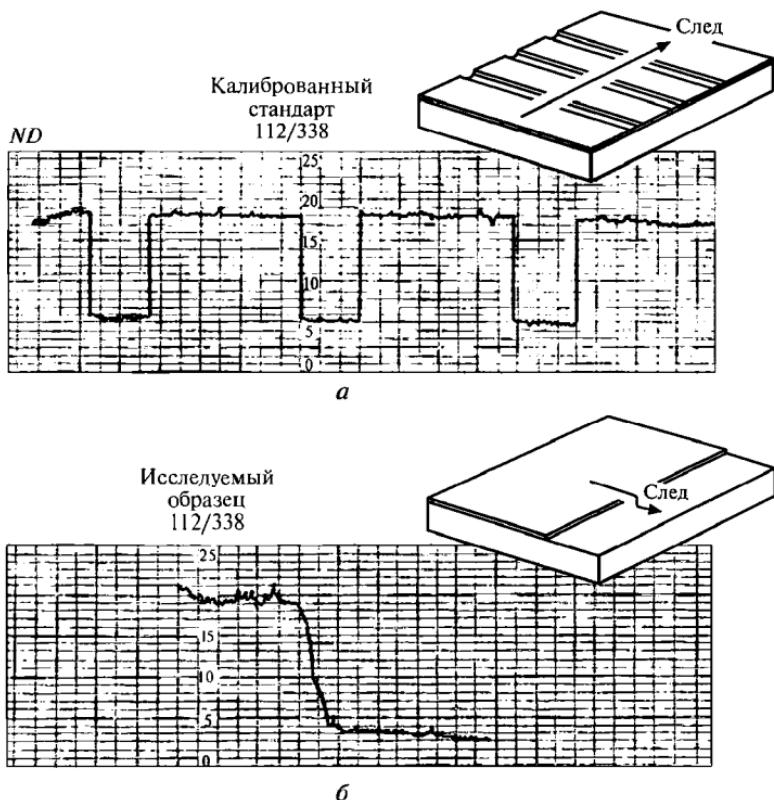


Рис. 3.2. Измерение толщины пленки с помощью прибора *Talystep 1*.

a — Кварц нанесен на стеклянную подложку. Тестовые желобки образованы путем удаления маски. Данные графика: увеличение по вертикали — 1 000 000, одно малое деление — 20 \AA ; увеличение по горизонтали — 200, одно малое деление — 0,025 мм. Толщина нанесенного слоя, измеренная между основными линиями, составляет примерно 260 \AA (что соответствует 25,9 мм на графике). *b* — Серебро нанесено на стеклянную подложку. Ступенька образована удалением маски. Данные графика: увеличение по вертикали — 1 000 000, одно малое деление — 20 \AA ; увеличение по горизонтали — 200, одно малое деление — 0,025 мм. Толщина нанесенного слоя примерно 300 \AA (что соответствует 30 мм на графике)

так, что маскированные участки оставляют канавки в образце. В варианте на рис. 3.2, б на частично защищенную маской стеклянную подложку — так, чтобы на образце образовалась ступенька, наносили серебро.

Отметим, что в случае с канавками получаются более точные значения толщин пленки, чем со ступеньками. Для детального ознакомления с приборами Talystep и Talysurf можно обратиться к работам Ризона, Шварца и Брауна [22]. Более старые типы приборов с индикаторной иглой, или приборы, действующие по принципу механического перемещения чувствительного элемента, рассматриваются Кейнатом [22] с точки зрения применения их в качестве размерных калибров, пневматических калибров и механико-электрических способов контроля.

Широкое применение приборов Talysurf и Talystep и аналогичных им по принципу действия обусловлено легкостью и быстротой, с которой можно получить текущую точную информацию о качестве обработки поверхности или данные о толщине пленки или высоте рельефа. Такой метод измерений позволяет изучать любой тип поверхности при условии, что она не очень мягкая и не подвергается деформации под действием иглы или щупа.

3.2. Метод кварцевого резонатора

Простейшим и широко используемым методом диагностики процессов ПХТ является определение скорости травления материала непосредственно во время травления с помощью пьезо-кварцевого микрозвзвешивателя. Метод основан на контроле изменения резонансной частоты кварцевого кристалла при изменении его массы в результате травления предварительно нанесенной на поверхность кристалла пленки того материала, который подвергается травлению. Метод позволяет регистрировать изменение эффективной толщины пленок любого материала, определяемой как частное от деления массы пленки на ее площадь и объемную плотность исходного материала. При измерении в газоразрядной плазме кристаллы кварца должны быть тщательно экранированы от электрических полей и заряженных частиц. Приборы Inficon фирмы Leybold-Heraeus могут быть помещены в реактор и регистрировать в реальном масштабе времени данные по убыли материала на основе измерения резонансной частоты кварца. Чувствительность кварцевых микроВесов по кремнию составляет до $9,4 \cdot 10^{13}$ ат/(см² · Гц). К не-

достаткам метода относится сравнительно малый срок службы кварцевых кристаллов и значительное изменение частоты измерительного кристалла по сравнению с частотой эталонного кристалла из-за различия в условиях, при которых они находятся.

3.3. Эллипсометрия

Эллипсометрия представляет собой еще один неразрушающий метод измерения толщины прозрачных пленок. Этот метод называется также поляриметрией и поляризационной спектроскопией, с его помощью можно также измерить показатель преломления. Он особенно эффективен для измерений характеристик тонких пленок, но может быть также использован для более толстых пленок. К недостаткам метода относят его сложность по сравнению с простыми упомянутыми выше методами, а также, что он не может быть применен к исследованию поверхностей, размеры которых составляют меньше 100 мкм.

Литература по эллипсометрии столь обширна, что дать ее полный обзор не представляется возможным. Для ознакомления с физикой эллиптически-поляризованного света читатель может обратиться к пособиям по оптике или к литературе по оптике тонких пленок (например, [22]).

Эллипсометрия основана на оценке изменения поляризации света, отраженного от подложки. Состояние поляризации определяется относительной амплитудой параллельной (ρ_p) и перпендикулярной (ρ_s) составляющих излучения и разностью фаз между ними ($\Delta_p - \Delta_s$). В условиях отражения от поверхности, свободной или покрытой пленкой, отношение двух амплитуд ρ_p / ρ_s и разность фаз между двумя компонентами $\Delta_p - \Delta_s$ характеризуют изменения, которые зависят от оптических констант подложки n_3 и k_3 , и угла падения света θ_1 , оптических постоянных пленки n_2 и k_2 и толщины пленки d . Если оптические постоянные подложки известны и если пленка не поглощает свет (то есть $k_2 = 0$), единственными неизвестными в уравнении, описывающим состояние поляризации, являются показатель преломления n_2 и толщина d прозрачной пленки, которые могут быть определены в состоянии полной поляризации падающего и отраженного света.

Основы теории эллипсометрии были разработаны в конце XIX в. П. Друде. Если просуммировать амплитуды всех отраженных пучков от двух границ раздела слоев для перпендикулярной

и параллельной составляющих, то можно получить амплитуды результирующего отражения [22]

$$R_s = \rho_s e^{i\Delta s} = (r_{12s} + r_{23s} e^{-2i\beta}) / (1 + r_{12s} r_{23s} e^{-2i\beta}); \quad (3.1)$$

$$R_p = \rho_p e^{i\Delta p} = (r_{12p} + r_{23p} e^{-2i\beta}) / (1 + r_{12p} r_{23p} e^{-2i\beta}), \quad (3.2)$$

в которых коэффициенты отражения Френеля даются выражением

$$r_{12s} = (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2); \quad (3.3)$$

$$r_{12p} = (n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1) / (n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1); \quad (3.4)$$

$$r_{23s} = \rho_{23s} e^{i\phi} = \frac{[n_2 \cos \theta_2 - (u_3 - iv_3)]}{n_2 \cos \theta_2 + (u_3 - iv_3)}, \quad (3.5)$$

$$r_{23p} = \frac{(n_3 - ik_3)^2 \cos \theta_2 - n_2 (u_3 - iv_3)}{(n_3 - ik_3)^2 \cos \theta_2 + n_2 (u_3 - iv_3)}, \quad (3.6)$$

а ρ_{23} , ϕ_{23} , u_3 , v_3 и β определяются уравнением (3.2) с помощью (3.6). В частности, выражение (3.4), описывающее отражение перпендикулярной составляющей, вытекает из (3.5) подстановкой $R = R_s R_s^*$. Состояние поляризации характеризуется отношением амплитуд $\operatorname{tg}\phi = \rho_p/\rho_s$ и разностью фаз между двумя компонентами $\Delta = \Delta_p - \Delta_s$. Основное уравнение эллипсометрии, таким образом, имеет вид:

$$\begin{aligned} (\operatorname{tg}\phi) e^{i\Delta} &= \rho_p / \rho_s e^{i(\Delta p - \Delta s)} = R_p / R_s = \\ &= \frac{(r_{12p} + r_{23p} e^{-2i\beta})(1 + r_{12s} r_{23s} e^{-2i\beta})}{(1 + r_{12p} r_{23p} e^{-2i\beta})(r_{12s} + r_{23s} e^{-2i\beta})}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

К сожалению, Друде не располагал ЭВМ, которая помогла бы ему в расчетах. Однако он расширил уравнения в терминах d/λ для $d \ll \lambda$ и получил так называемые друдовские приближения, которые справедливы для очень тонких прозрачных пленок ($d < 100 \text{ \AA}$) на отражающих подложках в воздухе или вакууме [22].

С применением ЭВМ стало возможным решение точного уравнения (3.7). Программы для ЭВМ были разработаны Арчером, а также МакКракином и Колсоном. В частном случае для подложки с известными оптическими постоянными n_3 и k_3 на длине волны λ и для отдельных пленок с заданным показателем преломления n_2 величины Δ и ϕ могут быть определены

в функции толщины пленки d , которая в свою очередь связана с β (3.7). Величина Δ , введенная Арчером, аналогична числу β , и если она выражена в градусах, то взаимосвязь этих величин определяется следующим уравнением:

$$d = \frac{(180N + \beta)\lambda}{360\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta_1}}, \quad (3.8)$$

где порядок N принимает целочисленные значения в зависимости от толщины пленки.

Используя такой прием, Арчер построил графики для прозрачных пленок с различными показателями преломления на кремнии. Пример на рис. 3.3 относится к случаю $\lambda = 5461 \text{ \AA}$, $n_3 = 4,05$, $k_3 = 0,028$ и $\theta_1 = 70^\circ$. Каждая кривая относится к определенному показателю преломления прозрачной пленки и соответствует определенным значениям β (для каждого 20°). Стрелки указывают направление увеличения β или толщины. После определения Δ и ϕ из эллипсометрических измерений график позволяет непосредственно определить показатель преломления пленки n_2 и β , по значениям которых толщина может быть рассчитана с помощью уравнения (3.8) при условии, что порядок

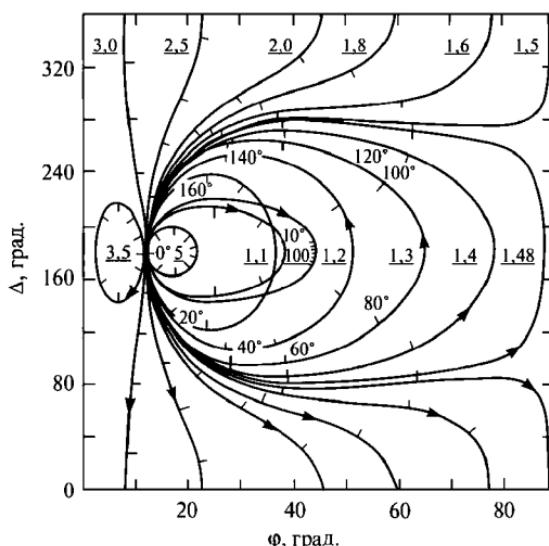


Рис. 3.3. Зависимость разности фаз Δ и угла соотношения амплитуд ϕ от показателя преломления и толщины (в единицах β) прозрачных пленок на кремнии с $n_3 = 4,05$, $k_3 = 0,028$, $\lambda = 5461 \text{ \AA}$, $\theta_1 = 70^\circ$. Подстрichenные числа — значения показателя преломления

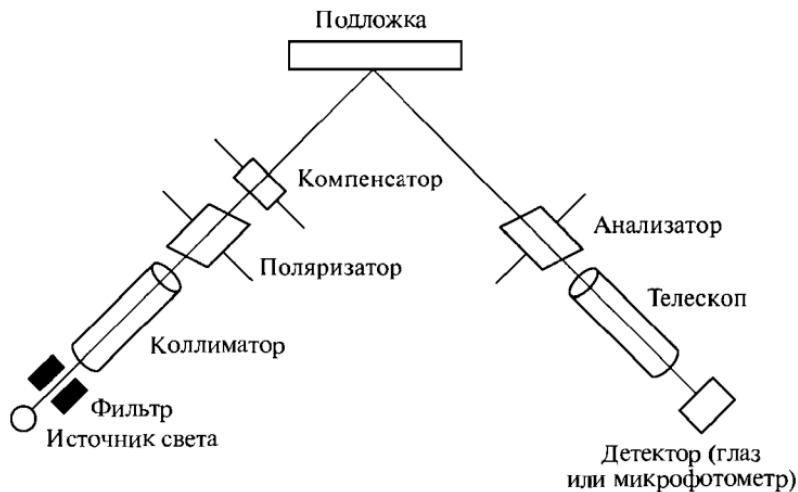


Рис. 3.4. Схематическое изображение эллипсометра

N (или приближенное значение толщины) известен. Трудность этого метода заключается в том, что для других значений величин λ , θ_1 , n_3 или k_3 необходимо построение новых графиков.

Схема эллипсометра изображена на рис. 3.4. Коллимированный, монохроматический свет сначала линейно поляризуется поляризатором. Затем он эллиптически поляризуется компенсатором, в качестве которого могут быть использованы четвертьволновая слюдяная пластиинка или компенсатор Бабине—Солейля. Хотя компенсатор может быть установлен под любым углом, для упрощения обычно он ориентируется так, чтобы его «быстрая» ось составляла угол в диапазоне $\pm 45^\circ$ к плоскости падения. После отражения от образца свет проходит через второй поляризатор, который служит анализатором. И, наконец, интенсивность света определяется либо визуально, либо фотоумножителем. Поляризатор и анализатор врашаются до получения гашения света. В этих условиях эллиптичность, вызванная наличием поляризатора, компенсатора и анализатора, противоположна эллиптичности, возникающей при отражении от пленки и подложки. Из 32 возможных положений поляризатора (P) и анализатора (A), обеспечивающих гашение, только четыре являются независимыми. Из отсчета гасящих положений P и A могут быть определены Δ и ϕ .

Описание метода эллипсометрии приведено в работе Винтерботтома и МакКракина и др. [22]. Там же подробно рассмотрен процесс настройки аппаратуры. Наиболее точная настройка

P и A может быть осуществлена способом, предложенным Арчером [22]. Регулировкой P и A получают минимальное значение сигнала детектора, затем положение анализатора фиксируется. Далее проводятся отсчеты положений поляризатора по обе стороны от минимума сигнала, соответствующие одинаковому уровню сигнала на детекторе. Среднее из этих двух отсчетов дает точное значение P . Такая же процедура проводится с анализатором, при этом регистрируются положения A по обе стороны от минимума при одинаковом сигнале на детекторе. Среднее из этих двух отсчетов дает точное значение A . Метод эллипсометрии очень точен, однако вблизи центра при $\beta = 0^\circ$, где линии постоянного показателя преломления сходятся, возникает неоднозначность. Данный метод в настоящее время широко используется для изучения различных прозрачных пленок на отражающих подложках [22].

Для измерения толщины прозрачных диэлектрических пленок также используются интерферометры. В общем случае эти приборы отличаются способом расщепления света на два пучка, которые после прохождения через различные оптические пути, снова соединяются, образуя в результате интерференционную картину. В случае интерферометра Майкельсона свет разделяется на два пучка путем амплитудного расщепления, а в случае интерферометра Номарски расщепление дает два равных по интенсивности пучка с электрическими векторами, перпендикулярными друг другу. Для измерения толщины образец должен иметь ступеньку, воспроизводящую толщину измеряемой пленки. Полосы, указывающие на высоту ступеньки, образуются вдоль краев ступеньки вследствие пространственного смещения.

Контраст микроскопического изображения определяется вариациями оптической разности хода линейно-поляризованных лучей, связанными с изменениями геометрического профиля поверхности образца, или вариациями фазовых соотношений двух лучей вследствие изменений показателя преломления, которые могут происходить на границах раздела фаз. Рис. 3.5 иллюстрирует формирование микроскопического изображения, при освещении поверхности образца монохроматическим светом. На рис. 3.5, *a* показано поперечное сечение образца, состоящего из двух фаз с отличающимися показателями преломления. Граница раздела фаз проходит вдоль линии В. На рис. 3.5, *b* изображены волновые фронты двух лучей, сформированных призмой Волластона, после их отражения от поверхности образца. Оптическая разность хода

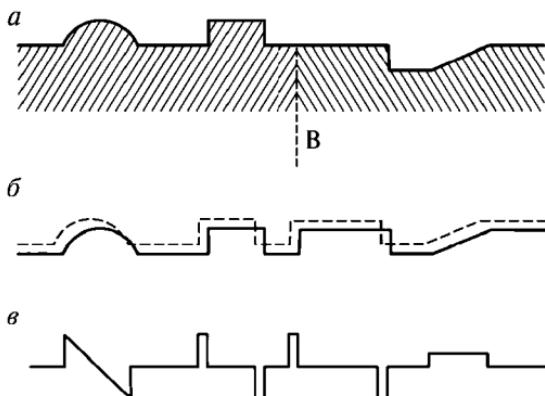


Рис. 3.5. Формирование микроскопического изображения: *а* — поперечное сечение приповерхностного слоя образца; *б* — волновые фронты сформированных призмой Волластона лучей после их отражения от поверхности образца; *в* — профиль распределения интенсивности в плоскости изображения Номарски

отраженных лучей обуславливает вариации интенсивности в восстановленном луче (рис. 3.5, *в*). Относительное положение поляризатора, анализатора и призмы Волластона может быть изменено, что скажется на профиле волновых фронтов и на результирующем распределении интенсивности наряду с оптическими характеристиками поверхности.

Максимальный интерференционный контраст наблюдается в направлении, параллельном наибольшему смещению линейно-поляризованных лучей, и практически равен нулю в перпендикулярном направлении. На рис. 3.6 приведены две микрофотографии объекта, поверхность которого покрыта полосками оксида, полученные при одном и том же положении поляризатора, анализатора и призмы Волластона. Различие между снимками вызвано тем, что образец при съемке фотографии, представленной на рис. 3.6, *б*, был развернут на 90° в собственной плоскости по отношению к его положению на рис. 3.6, *а*. Полоски оксида имеют небольшой наклон по отношению нормали к поверхности образца, что приводит к образованию «козырька», максимальная ширина которого в направлении оси С—С составляет 10 нм (см. рис. 3.6, *а*). Интерференционный контраст изображения четко выявляет наклон ступенек оксида, так как поляризатор, анализатор и призма Волластона установлены так, чтобы обеспечить максимальный контраст для положения об-

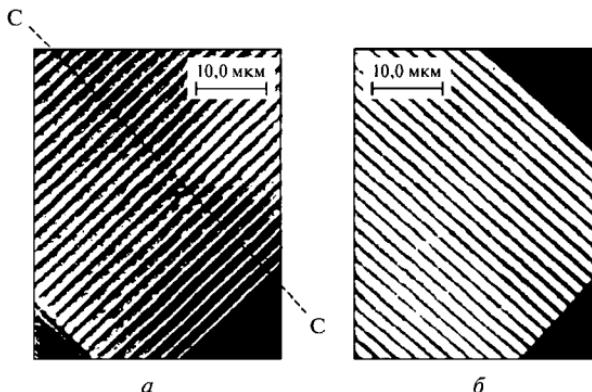


Рис. 3.6. Микрофотографии полосок оксида шириной 1 мкм, полученные с помощью микроскопа Номарски

разца, в котором он находился во время съемки микрофотографии. При повороте образца на 90° наклон полосок практически не выявляется (см. рис. 3.6, б), а контраст изображения объекта становится таким же, как при использовании обычного оптического микроскопа. Таким образом оптическая микроскопия в режиме интерференционного контраста по Номарски подходит для выявления тонких деталей морфологии.

И, наконец, для измерения толщины прозрачных пленок на отражающих поверхностях используется метод CARIS (интерференционная спектроскопия отражения с постоянным углом) [22]. Расчет толщины пленки осуществляется согласно уравнению

$$d = \frac{N\lambda}{2n_2 \cos \theta_2} + \Delta t_\phi + \Delta t_r, \quad (3.9)$$

где N — порядок, выраженный полуцелыми числами; n_2 — показатель преломления диэлектрической пленки на длине волны λ ; θ_2 — угол преломления в диэлектрической пленке; Δt_ϕ — поправка к толщине на фазовый сдвиг; Δt_r — поправка на коэффициент отражения.

В данном методе приближенная компенсация поправок на отражение находится экспериментально использованием отражающей кремниевой пластинки в плече сравнения двухлучевого спектрофотометра для калибровки прибора. Поправки к толщине измеряемой пленки на фазовый сдвиг также определены и имеются в памяти компьютера, который входит в состав совре-

менного спектрофотометра. Промышленные спектрофотометры, имеющие библиотеку данных, автоматическое управление и встроенную систему калибровки образцов для точных измерений толщин прозрачных пленок, широко используются в современных производствах СБИС и УБИС.

3.4. Лазерная интерферометрия

Интерферометрический метод основан на измерении интенсивности света, отраженного пленками различных материалов. В качестве источника монохроматического света наиболее часто используется Не—Не-лазер, луч которого направляется в камеру и юстируется на поверхность травимого образца, а затем, отражаясь от нее, попадает в оптический приемник. Окончание травления каждого слоя фиксируется по заметному изменению уровня сигнала при переходе от одного слоя к другому.

В ходе травления прозрачных диэлектрических пленок наблюдается периодическое изменение интенсивности отраженного света, связанное с интерференцией лучей, отраженных поверхностью пленки и подложки (рис. 3.7). При нормальном падении луча два соседних максимума интерферометрической картины находятся на расстоянии $\lambda/2n_{\text{пп}}$, где λ — длина волны монохроматического света; $n_{\text{пп}}$ — коэффициент преломления



Рис. 3.7. Сигнал при контроле процесса РИТ поликристаллического кремния методом лазерной интерферометрии

пленки. Зная эти величины, можно следить за скоростью травления, а по изменению характера временной зависимости сигнала — определять момент окончания травления.

3.5. Растворная электронная микроскопия

Растворная электронная микроскопия (РЭМ) широко применяется при исследовании СБИС [23]. По сравнению с оптической микроскопией РЭМ обеспечивает более высокое пространственное разрешение и большую глубину резкости, а также возможность проведения химического анализа на основе регистрации спектра рентгеновского излучения, генерируемого при облучении поверхности образца электронным пучком. Пространственное разрешение при оптимальных условиях может достигать менее 10 нм, а типичные значения глубины резкости находятся в пределах 2–4 мкм при 10 000-кратном увеличении и 0,2–0,4 мм при 100-кратном.

На рис. 3.8 представлена схема растрового электронного микроскопа. Электроны, испускаемые электронной пушкой, нить накала которой обычно изготавливается из вольфрама или LaB₆, ускоряются до приобретения энергии 2–40 кэВ. Набор магнитных линз и отклоняющих катушек сканирования формирует электронный пучок малого диаметра, разворачиваемый в растр на поверхности образца.

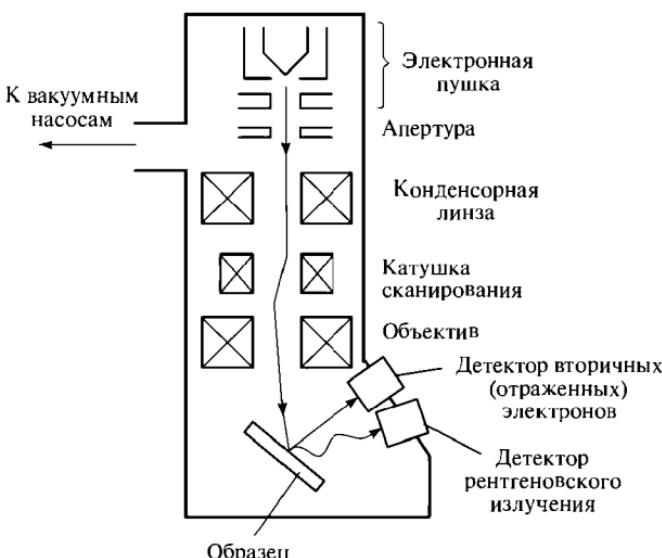


Рис. 3.8. Схема растрового электронного микроскопа

В процессе облучения этой поверхности электронами возбуждаются три типа несущего полезную информацию излучения: рентгеновские лучи, вторичные электроны и отраженные (обратно рассеянные) электроны. На рис. 3.9 изображен энергетический спектр электронов, генерируемых при облучении поверхности образца первичным электронным пучком. Значительную долю спектра составляют вторичные электроны с энергией менее 50 эВ. Электроны с энергией, близкой к E_0 (энергии электронов первичного пучка), называются отраженными, или обратно рассеянными электронами.

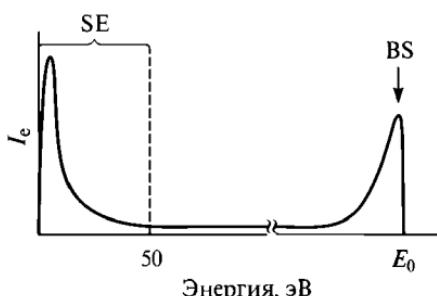


Рис. 3.9. Энергетическое распределение электронов, эмитируемых с поверхности образца, облучаемой электронным пучком энергии E_0 . Пик интенсивности вторичных электронов (SE), обладающих низкой энергией, наблюдается при ~5 эВ, а отраженных электронов (BS) — при ~ E_0 . Пик интенсивности Оже-электронов (на рисунке не показан) расположен между двумя вышеуказанными пиками

Ток вторичных или обратно рассеянных электронов используется для модуляции интенсивности электронного пучка в электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). Поскольку развертка электронного луча в ЭЛТ синхронизирована с разверткой первичного электронного пучка растрового электронного микроскопа, на экране ЭЛТ формируется изображение поверхности образца, яркость отдельных элементов которого определяется изменениями интенсивности вторичных или отраженных электронов. Для проведения химического анализа исследуется рентгеновское вторичное излучение.

По мере продвижения в глубь образца электроны первичного пучка претерпевают многочисленные соударения и тормозятся на глубине, величину которой можно рассчитать или определить экспериментально. Примеры зависимости глубины проникновения от энергии электронов первичного пучка приведены на

рис. 3.10. Глубина проникновения возрастает с уменьшением порядкового номера элемента и с повышением энергии электронов первичного пучка E_0 . При каждом соударении траектория электрона меняется, поэтому узкий первичный пучок рассеивается по мере углубления в образец. На рис. 3.11 показано объемное распределение первичных электронов разной энергии, которое имеет каплеобразную форму в результате многочисленных соударений, приводящих практически к полной потере их энергии.

При нормальном падении электронного пучка на массивный образец приповерхностная область генерации отраженных электронов имеет форму диска, диаметр которого примерно равен диаметру первичного пучка. Разрешение изображения, формируемого отраженными электронами, повышается с уменьшением толщины образца. Так, разрешение изображения тонкой металлической пленки, нанесенной на поверхность кремния

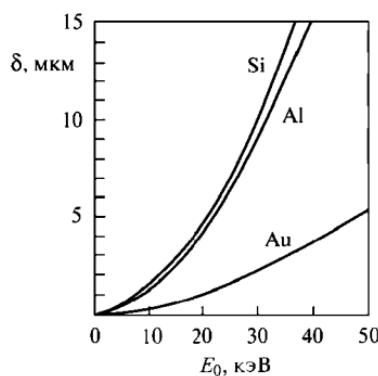


Рис. 3.10. Зависимость глубины проникновения электронов в кремний, алюминий и золото от энергии первичного пучка [23, 24]

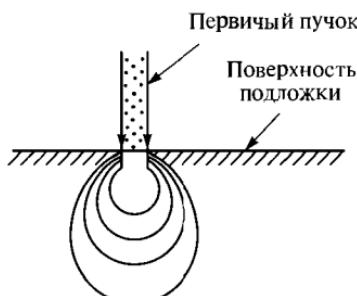


Рис. 3.11. Контуры максимального проникновения первичных электронов разной энергии в приповерхностный слой образца

или SiO_2 , выше разрешения изображения поверхности массивного образца из того же металла. Разрешение изображения, формируемого вторичными электронами, частично определяется площадью участка поверхности, с которого испускаются вторичные электроны. Глубина области их возбуждения меньше глубины проникновения первичного пучка. Глубина возбуждения вторичных электронов в металлах имеет минимальное значение 0,4 нм при энергии вторичных электронов 70 эВ и возрастает до 2,5 нм при уменьшении энергии до 10 эВ. В диэлектриках значение этой характеристики превышает 5 нм. Линейное разрешение изображений, формируемых вторичными электронами, равно сумме диаметров первичного электронного пучка и области размытия в плоскости (последняя величина определяется средней длиной свободного пробега электронов) [24]. Заметим, что вторичные электроны, испускаемые с глубины возбуждения в результате возбуждения отраженными электронами, генерируются на участке большей площади и поэтому приводят к ухудшению разрешения.

Контраст изображений, формируемых отраженными и вторичными электронами, зависит от вариаций потока электронов, попадающего на детектор. Выход отраженных электронов повышается с возрастанием порядкового номера Z элемента-материала образца. (Например, для золота он в 10 раз выше, чем для углерода.) Из-за этого на изображениях, формируемых отраженными электронами, наблюдается контраст между областями материалов, состоящих из различных элементов. Контраст соседних элементов Периодической системы уменьшается по мере возрастания Z и составляет 6,7% для алюминия и кремния [24]. Следовательно, на изображении, сформированном вторичными электронами, можно различить вкрапления алюминия в кремниевой матрице.

Выход вторичных электронов зависит от Z в меньшей степени, чем выход отраженных электронов. При переходе от углерода к золоту выход вторичных электронов повышается лишь в два раза. В большей степени выход вторичных электронов определяется работой выхода электронов из конкретного вещества; для оксидов и материалов с большой шириной запрещенной зоны он существенно выше, чем для кремния. Это обстоятельство при исследовании СБИС обуславливает преимущества анализа изображений, сформированных вторичными электронами, так как области металлизации, кремния и его оксида легко различимы.

Вторым фактором, определяющим контраст изображений, формируемых вторичными электронами, является зависимость выхода электронов от кривизны анализируемой поверхности. Поток вторичных электронов от поверхности переменной кривизны пропорционален углу наклона касательной к неровности поверхности, поэтому на изображениях различаются участки с изменяющимся профилем. Кроме того, детектируемый поток вторичных электронов сильно зависит от ориентации анализируемых участков поверхности относительно детектора: участки, обращенные к детектору, существенно ярче остальных областей изображения.

Пространственное разрешение изображения зависит от размера участка поверхности образца, на котором происходит возбуждение вторичных или отраженных электронов, а также от локальных изменений фазы, состава и ориентации этой поверхности. Кроме того, разрешение определяется характеристиками самого растрового электронного микроскопа. Эти факторы действуют одновременно, и вклад каждого из них по отдельности оценить невозможно. Например, диаметр первичного электронного пучка уменьшается при уменьшении тока пучка и повышении его энергии. Так, для нити накала из LaB₆ и W при энергии 10 кэВ эти значения возрастают до 6 и 13 нм соответственно. Реальное разрешение, достигаемое в РЭМ, может быть, однако, значительно хуже, чем 4–13 нм. Значение минимального тока I_{\min} пучка, необходимого для обеспечения удовлетворительного контраста C изображений соседних участков поверхности, определяется выражением

$$I_{\min} = \frac{4 \cdot 10^{-12}}{\varepsilon C^2 t_f}, \quad (3.10)$$

где ε — эффективность детектирования сигнала; t_f — время сканирования электронным пучком анализируемого участка [23]. Для некоторых образцов контраст изображения соседних участков не превышает 1–5%. В случае использования нити накала из термоионного вольфрама минимальный диаметр пучка должен составлять 230 нм для $C = 1\%$ и 46 нм для $C = 5\%$ [6].

При исследовании СБИС методом растровой электронной микроскопии возникают общие затруднения, связанные с загрязнением образца, радиационными повреждениями образца из-за воздействия электронного пучка и другими изменениями его поверхности при проведении анализа. Загрязнение поверх-

ности возникает в основном вследствие полимеризации углеводородов при облучении поверхности электронами. Хотя современные микроскопы оборудованы мощными системами откачки, способными поддерживать в камере образца вакуум $0,133 \cdot 10^{-3}$ Па, полностью избежать этой проблемы не удается. Радиационные повреждения оксидов также приводят к ухудшению характеристик изготовленных приборов. Облучение электронами обуславливает появление положительных зарядов в оксиде и поверхностных ловушек на границе раздела кремния с оксидом, избежать которых можно за счет достаточно низкой энергии первичного пучка — это предотвратит его проникновение в активные зоны приборов (например, подзатворный оксид). Другие радиационные дефекты можно отжечь при температуре 400–550 °С.

Еще одна проблема, часто возникающая при применении РЭМ для изучения диэлектрических слоев, — это наведенный на поверхности заряд. Этот эффект возможен, если энергия первичных электронов обеспечивает выход вторичных электронов, превышающий единицу. Поверхность при этом становится отрицательно заряженной, что приводит к возмущению траектории первичного пучка и ухудшению изображения. Для предотвращения этого явления используют первичные пучки малой энергии. Единственный известный на сегодня источник электронов с первичным пучком низкой энергии, обеспечивающий получение изображений высокого разрешения, — это источник на основе полевой эмиссии [23]. Некоторые промышленно выпускаемые растровые электронные микроскопы оборудованы такими источниками. Другим способом предотвращения появления наведенного заряда на поверхности образца во время проведения исследования является покрытие поверхности заземленным слоем металлизации толщиной около 10 нм. Так как глубина возбуждения вторичных электронов в металлах (около 0,5 нм) намного меньше, чем в диэлектриках, нанесение тонкого металлического покрытия значительно улучшает пространственное разрешение изображений, формируемых вторичными электронами. К сожалению, нанесение покрытий не позволяет использовать исследованные образцы для последующих технологических обработок.

3.6. Масс-спектроскопия

Масс-спектроскопия — одна из наиболее распространенных аналитических методик для исследования плазменных систем.

Ее основное достоинство заключается в возможности детектирования широкого набора компонентов плазмы. В процессе изучения механизма травления предварительно могут быть сняты масс-спектры поступающих газов в отсутствие разряда, затем спектры с разрядом, но без объекта травления и, наконец, при травлении. Такие спектры разряда на SF_6 до и во время травления пленки Si_3N_4 изображены на рис. 3.12 [6]. Из сопоставления спектров следует, что основными продуктами реакции являются ионы N_2^+ (m/z 28) и ионы SiF_3^+ (m/z 85). Сравнение таких спектров может дать полезную информацию о составе плазмы, основных химически активных агентах, ответственных за травление, и составе продуктов реакции.

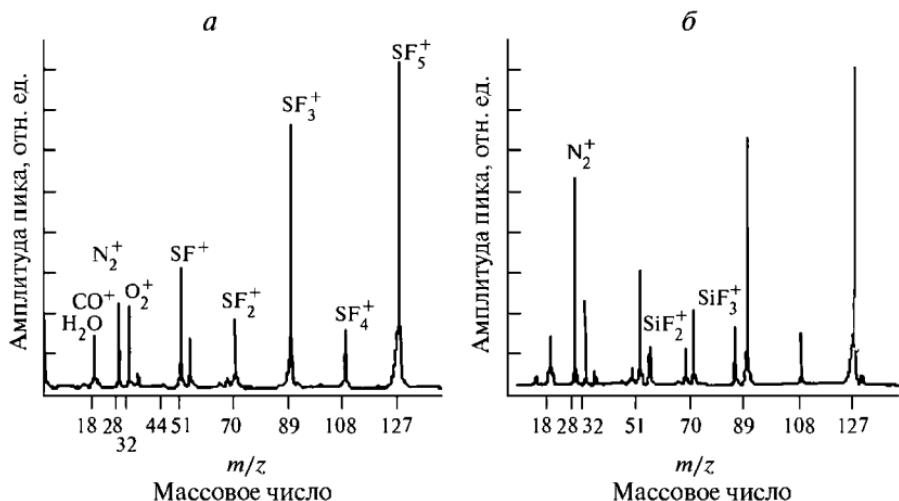


Рис. 3.12. Масс-спектр разряда на SF_6 в отсутствие травления (*а*) и при травлении пленки Si_3N_4 (*б*)

Широкое распространение масс-спектроскопии во многом обусловлено простотой использования промышленных спектрометров. Для анализа плазмы чаще всего применяют квадрупольные масс-спектрометры фирм UTI и Extranuclear Laboratories. Эти системы комплектуются необходимыми средствами для дифференциальной откачки, электроникой и программным обеспечением для обработки информации, поэтому их легко состыковать с плазменным реактором и сравнительно просто эксплуатировать. На рис. 3.13. приведена схема подсоединения квадрупольного масс-спектрометра к плазменному реактору. В этом случае подсоединение спектрометра произведено на выходе реакционной

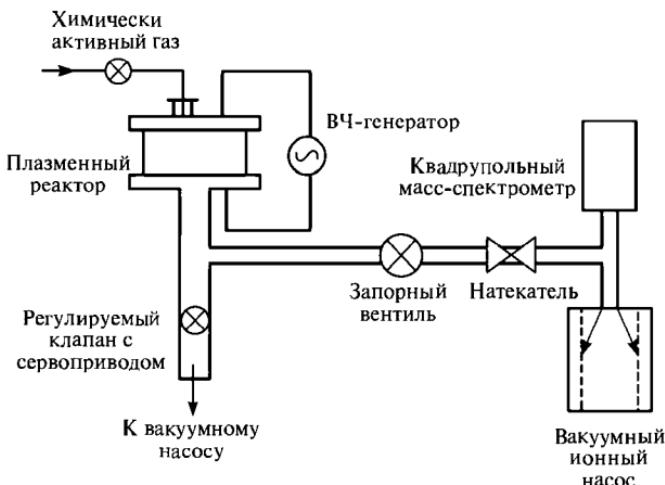


Рис. 3.13. Блок-схема квадрупольного масс-спектрометра, подсоединеного к плазменному реактору

камеры с целью детектирования продуктов взаимодействия. Как показано на рис. 3.13, масс-спектрометр обычно подсоединяется к системе через специальное заборное отверстие и откачивается дифференциально до 10^{-5} Па при давлении в реакторе 10^{-1} Па. Отбор анализируемого газа на выходе из реакционной камеры может использоваться для определения продуктов реакции, идентификации нежелательных примесей в реакторе и детектирования окончания процесса.

Существуют и более сложные масс-спектрометрические системы, например при изучении механизмов травления в тлеющем разряде специальная конструкция плазменной камеры позволяет осуществлять забор газа в различных областях разряда: у электрода, к которому подведена ВЧ-мощность, у заземленного электрода и в области свечения [6, 23, 24]. Такой подход позволяет проанализировать физико-химические процессы в разряде на нескольких углеводородных газах и CF_4 . В работе [25] предложена система, в которой пучок атомов фтора бомбардирует образец моно- или поликристаллического кремния непосредственно внутри ионизационной камеры масс-спектрометра. Эта конструкция позволила изучить кинетику реакции атомов фтора с кремнием и определить продукты взаимодействия. Таким образом была подтверждена гипотеза об образовании как SiF_2 , так и SiF_4 в результате гетерогенной реакции атомов фтора с кристаллическим кремнием. Степень сложности таких уст-

ройств, сочетающих молекулярные пучки с масс-спектрометрическим анализатором, приближается к сложности пучковых систем.

Основное ограничение масс-спектрометрического анализа связано с тем, что отбор газа производится, как правило, на выходе из области тлеющего разряда, в результате чего состав, наблюдаемый в спектрометре, может не в полной мере соответствовать составу газа в реакторе. Реакции, происходящие вне разряда, и рекомбинация химически активных частиц усложняют интерпретацию результатов исследования плазменных систем. Например, в работе [26] наблюдалось образование SiF_4 в качестве первичного продукта при травлении кремния как в CF_4 , так и в CF_3Cl , хотя изотропия и скорости травления существенно отличались, но дальнейшие эксперименты выявили, что при травлении Si в CF_3Cl сначала образуется SiCl_xF_y , который затем претерпевает превращение уже вне разряда, превращаясь в более стабильное соединение SiF_4 . Подобным же образом при реактивном ионном травлении Al в среде BCl_3 масс-спектрометр не обнаруживал никаких алюмосодержащих продуктов процесса, хотя из других исследований совершенно очевидно, что таким продуктом является AlCl_3 . Оказалось, что низкая упругость паров этого вещества не позволила его зарегистрировать спектрометром, расположенным за разрядной камерой.

3.7. Эмиссионная спектроскопия

Спектроскопический анализ излучения плазмы является еще одним наиболее широко распространенным (наряду с масс-спектроскопией) методом диагностики процессов полупроводниковой технологии. Основное преимущество этого метода состоит в том, что излучение тлеющего разряда может наблюдаться и вне реакционной камеры через кварцевые или стеклянные окна без вмешательства в химические процессы, происходящие внутри камеры. Применения зондов или заборников, которые могли бы вызвать возмущения в реакционной камере, не требуется.

Другим достоинством метода эмиссионной спектроскопии является легкость интерпритации экспериментов. Спектроскопический анализ зародился еще в XIX в. одновременно с разработкой систем тлеющего разряда. Эмиссионные спектры атомов и молекул описаны в многочисленных источниках [6, 23], лучшими из которых являются каталоги по молекулярным и атомным спектрам. Таким образом, анализ эмиссионных спек-

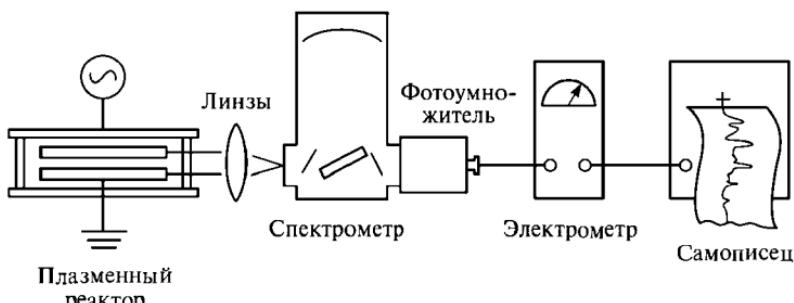


Рис. 3.14. Блок-схема эмиссионного спектрометра

тров может опираться на обширные научные данные, полученные за последнее столетие.

Аппаратура для спектроскопического анализа инфракрасной, видимой и ближней ультрафиолетовой областей спектра может быть довольно простой. Спектрометр (рис. 3.14) состоит из монохроматора, детектора, например фотоумножителя с необходимой электроникой, и записывающего устройства — такого, как самописец. Вместо монохроматора можно использовать и акусто-оптический спектрометр, который имеет очень высокую скорость прохождения всех областей спектра (ИК, видимой, УФ), при этом можно одновременно отслеживать до 7 длин волн [28]. Для большинства практических применений монохроматор должен иметь дисперсионную длину порядка 0,25 нм. В таком случае разрешение спектрометра составит 0,5 нм, что достаточно для выявления атомных и колебательных молекулярных эмиссионных линий. Эмиссионный спектр плазмы CF_4-O_2 , записанный с помощью такого спектрометра, изображен на рис. 3.15. Указанная степень разрешения достаточна для определения температуры газа из анализа неразрешенных вращательных линий в колебательных спектрах двухатомных молекул. Для разрешения отдельных вращательных линий в эмиссионных спектрах необходим спектрометр с большей дисперсией.

В настоящее время спектрометры с программным обеспечением для регистрации и обработки данных выпускают фирмы EG&G Ortec (США), Princeton Applied Research (США), FEP, Plasma-Therm, UTI. Для быстрой регистрации спектров в этих системах применены фотоумножители или фотодиодные панели. Использование компьютера позволяет сравнивать спектры, выделять фон, а также детектировать наиболее интересные части спектра.

Характер информации, получаемой из эмиссионных спектров, иллюстрирует рис. 3.15. Спектр плазмы $\text{CF}_4\text{—O}_2$ (рис. 3.15, *a*) состоит из линий, связанных с излучением атомов F и O, молекул CO и N_2 (азот попадает в реактор вследствие натекания). Резкие линии излучения атомов F и O легко разрешаются и идентифицируются. Молекулы CO и N_2 дают характерные регулярные полосатые структуры. На рис. 3.15, *b* изображен спектр того же разряда во время травления в нем пленки нитрида кремния, осажденной в плазме. Видно, что процесс травления вызвал уменьшение эмиссии атомов фтора, тогда как эмиссия продуктов реакции N_2 и CN возросла. Анализ таких спектров позволяет заключить, что атомы фтора являются основным действующим реагентом при травлении Si_3N_4 или Si в плазме $\text{CF}_4\text{—O}_2$. Роль этих атомов в реакциях травления может быть прослежена и по их эмиссионным спектрам в плазме [6, 23]. Информацию о механизме образования атомов фтора в плазме дает изучение спектров молекул CO.

В нескольких последних работах по эмиссионной спектроскопии использовались фотодетекторы с быстрой срабатыванием, достаточной для временного разрешения эмиссии возбужденных частиц. Эмиссия атомов хлора в разряде на Cl_2 модулирована ВЧ-полем с полной модуляцией на частоте 220 кГц и частичной — на частоте 13,56 МГц. При анализе временной зависимости эмиссии ВЧ-разряда низкой мощности на SiH_4 было обнаружено, что получение атомов Si и H связано с периодом возбуждения около 10 нс, что значительно меньше длительности полупериода колебаний на частоте 13,56 МГц (37 нс) [28]. Подобные исследования временного разрешения эмиссионных процессов в тлеющем разряде позволяют углубить понимание механизмов преобразования энергии ВЧ- поля в химическую энергию.

Хотя метод эмиссионной спектроскопии прост в осуществлении и может дать много полезной информации о механизмах реакции и компонентах плазмы, ему присущи некоторые ограничения. Эмиссионный спектр создается только компонентами, сильно излучающими в анализируемой области спектра. С помощью других аналитических методов в плазме $\text{CF}_4\text{—O}_2$ было подтверждено присутствие CF_3^+ , CF_3^{\cdot} , COF_2 , CO_2 , $\text{CF}_2^{2\cdot}$ [23]. Однако в эмиссионных спектрах (см. рис. 3.15) излучения этих частиц обнаружено не было, потому что в видимой области при той чувствительности спектрометра, которая использовалась в работе, пики излучения отсутствуют.

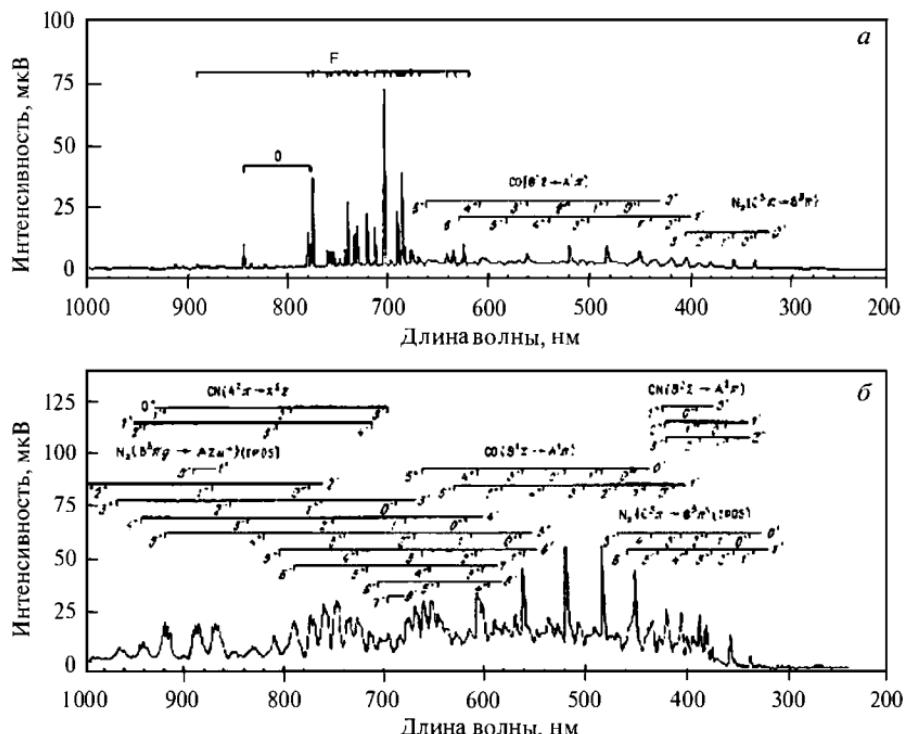


Рис. 3.15. Эмиссионные спектры ВЧ-разряда на смеси CF_4 (92%) — O_2 (8%) (а) и смеси того же состава при травлении пленки нитрида кремния, осажденной в плазме (б)

Спектральный анализ плазмы O_2 , применяемой для удаления фоторезиста, позволил обнаружить в плазме такие компоненты, как O , OH^- , NO и CO [23]. Очевидно, что для поддержания разряда в реакторе должна присутствовать и ионная составляющая, что и было подтверждено экспериментально. Однако интенсивность излучения ионов O^+ в видимой области спектра оказалась на два порядка меньше, чем излучение нейтральных атомов кислорода. Таким образом, если спектр исследуется недостаточно тщательно, может быть упущена существенная информация.

Второе ограничение метода эмиссионной спектроскопии состоит в трудности проведения количественных измерений. Интенсивность излучения определяется как концентрацией излучателей, так и силой оптического осциллятора. Молекулы азота в состоянии $\text{C}_{3\pi_u}$ или CO в состоянии $\text{C}_{1\Sigma}$ дают сильное из-

лучение, даже когда их концентрация в разряде мала. Относительная интенсивность эмиссионной линии или полосы может быть использована для измерения изменения концентрации частиц данного вида от эксперимента к эксперименту. Как было показано в статье [27], скорость травления Si в плазме $\text{CF}_4\text{—O}_2$ коррелирует с интенсивностью излучения фтора на волне 704 нм.

Для решения вопроса о количественной оценке концентрации активных частиц в работах [8, 27] был впервые описан и в последствие стал широко применяться метод *эмиссионной актинометрии*. В основном выражении эмиссионной актинометрии связываются отношение интенсивностей подобранный пары активной частицы (I_x) и актинометра (I_{act}) с отношением их концентраций (N_x / N_{act}) через коэффициенты скорости возбуждения этих линий (k_x / k_{act}):

$$\frac{I_2}{I_{act}} = \frac{k_2}{k_{act}} \frac{N_x}{N_{act}}. \quad (3.11)$$

Значение k_x / k_{act} является константой, если зависимости сечений возбуждения спектральных линий от энергии активной частицы и актинометра идентичны. В качестве актинометра в плазму в небольших количествах (не более 5–6%) добавляется, как правило, инертный газ, который не изменяет условий протекания физико-химических процессов в разряде. Подбор спектральных линий активной частицы и актинометра осуществляется так, чтобы их пороги возбуждения в излучающее состояние имели наиболее близкие значения.

Для увеличения возможностей эмиссионной спектроскопии используются дополнительные методики. Например, в работах [8, 27] метод эмиссионной спектроскопии сочетался с релаксационно-импульсной методикой. Такой прием позволил установить, что в плазме SF_6 гибель атомов фтора описывается кинетическим уравнением первого порядка, при этом объемной гибелю фтора можно пренебречь, а образование атомов фтора происходит под действием прямого электронного удара в объеме плазмы. Обработка кинетических кривых позволила авторам работы получить количественные характеристики K_r и K_{tp} для различных материалов электродов (табл. 3.1).

Полученные с помощью эмиссионной спектроскопии и дополнительных методик основные закономерности элементарных

Таблица 3.1

**Скорости гибели атомарного фтора (K_r)
и травления кремния (K_{tp}) в ВЧ-разряде SF_6**

Материал	K_r , см/с	K_{tp} , см/с
Al	170	520
FeO	80 ... 300	190 ... 1200
Si	4000	3800
W	2100	3800

процессов плазмохимического травления кремния позволяют оптимизировать технологические процессы и конструкцию реакционных камер.

3.8. Зондовые измерения

Зондовые измерения позволяют получить значения плотности электронов и их температуры (энергии) — наиболее важных параметров разряда, поскольку именно электроны передают энергию ВЧ- поля химически активным частицам. Эти частицы образуются в плазме в результате неупругих соударений молекул газа с электронами, ускоренными ВЧ-полем.

На первый взгляд зондовые измерения достаточно просты. Для их осуществления необходимы проволочный зонд, помещаемый в плазму, и электрическая система, позволяющая измерять ток, поступающий на зонд в зависимости от напряжения смещения. Однако интерпретация результатов зондовых измерений может оказаться весьма сложной в силу побочных эффектов, не учитываемых классической теорией. В последние годы опубликовано много интересных исследований по зондовым измерениям [8, 14, 32, 33].

Традиционная теория Ленгмюра применима к разряду при низком давлении, при котором длина свободно пробега электронов превосходит диаметр зонда, толщина области падения потенциала вокруг зонда меньше диаметра зонда, а распределение электронов по энергии максвелловское. В этих идеализированных условиях электронный ток I_e , поступающий на зонд, погруженный в плазму, выражается уравнением

$$I_e = -\frac{1}{4} n_e e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} A \exp\left(\frac{eV_\Phi}{kT_e}\right), \quad (3.12)$$

где n_e — полная плотность электронов; m_e и e — масса и заряд электрона; T_e — температура электронов; A — площадь поверхности зонда; V_ϕ — напряжение смещения на зонде. Как следует из этого уравнения, график зависимости $\log I_e$ от V_ϕ должен быть прямой линией с углом наклона, обратно пропорциональным T_e . Таким образом, температура электронов может быть определена непосредственно из вольт-амперной характеристики (ВАХ) зонда.

На рис. 3.16 представлена типичная ВАХ ВЧ-разряда. Кривая на графике может быть разделена на три части. При напряжениях меньше V_f ток ограничивается плотностью положительных ионов в разряде. Величина тока насыщения в этой области может быть использована для оценки плотности положительных ионов. Однако теория, связывающая плотность ионов с током насыщения ВАХ, усложнена по причине проникновения ионов через границу плазмы вокруг зонда и нарушения условия строго определенной границы плазмы [2, 32]. Тем не менее, при больших отрицательных напряжениях с помощью численных расчетов плотность ионов может быть получена из ВАХ. Такой подход, использованный для анализа плазмы CHF_3 и CF_4 в работе [33], позволил сопоставить плотность ионов и энергию электронов с характеристиками процесса травления Si и SiO_2 в этих разрядах.

При напряжениях, превышающих V_p , ток ограничивается плотностью электронов в разряде. Однако ВЧ-напряжение на зонде вызывает образование дополнительной переменной составляющей, которая сдвигает точку перегиба кривой ВАХ в сторону меньших напряжений и искажает ее форму в области, близкой к насыщению. Проведенные с учетом этих обстоя-

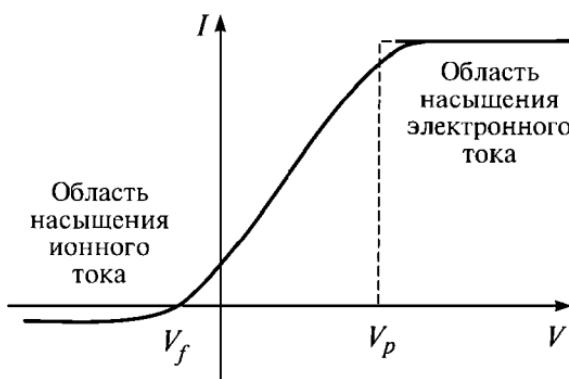


Рис. 3.16. Типичная ВАХ зонда

тельств измерения плотности электронов в плазме $\text{CF}_4\text{—O}_2$ и $\text{CF}_4\text{—H}_2$ в системе реактивно ионного травления при давлении 2,5–13 Па и частоте 13,56 МГц дали величину порядка $10^{10}\text{—}10^{11} \text{ см}^{-3}$.

В области ВАХ между V_f и V_p температура электронов может быть определена по графику зависимости $\log I$ от напряжения смещения V в соответствии с уравнением (3.12). Следует напомнить, что уравнение получено исходя из предположения о максвелловском распределении электронов по энергии, и любое отклонение от линейности графика $\log I\text{—}V$ может быть связано с отклонениями в энергетическом распределении электронов. По свидетельствам различных источников температура электронов в разряде в зависимости от величины давления, мощности и частоты изменяется в диапазоне 3–30 эВ [6, 23].

3.9. Методы анализа поверхности и их применение

Основная задача анализа поверхности состоит из установления качественного элементного состава поверхности, определения природы и количества адсорбированных на ней частиц и выяснения свойств поверхностных атомов или адсорбированных частиц. Под поверхностью, как правило, понимают часть объема материала толщиной порядка 1–10 атомных слоев, лежащую под поверхностным моноатомным слоем. Для анализа поверхности при измерениях применяют различные виды зондирующего воздействия на образец (рис. 3.17) и различные формы отклика, поступающего от изучаемого объекта [24].

Существуют восемь основных видов зондирующего воздействия на мишень, в результате которого возникает поток частиц одного вида или относящихся к нескольким видам сразу (электроны, ионы, нейтральные частицы и фотоны). Поток этих частиц, несущий информацию о поверхности, улавливается соответствующим детектором. Для зондирования поверхности используется нагревание, а также воздействие электрическим, магнитным полями и звуковыми поверхностными волнами. Все это, кроме магнитного поля, вызывает эмиссию вторичных электронов, ионов, фотонов или нейтральных атомов. Поэтому методы анализа поверхности можно классифицировать по видам зондирующего воздействия и типам эмиттируемых частиц. Анализ эмиттируемых частиц дает информацию о их природе и количестве, пространственном и энергетическом распределении.



Рис. 3.17. Основные виды зондирующего воздействия на мишень

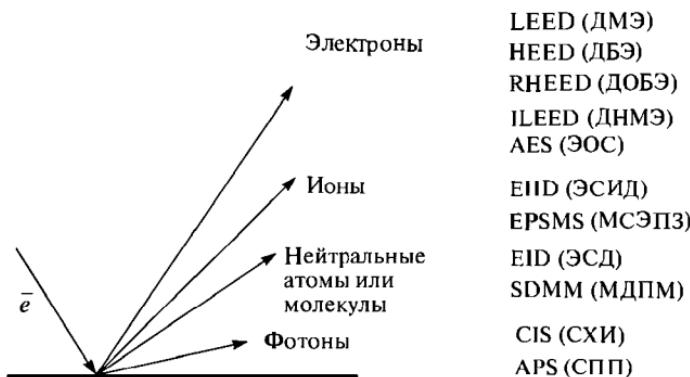


Рис. 3.18. Методы анализа поверхности, основанные на электронном облучении:

LEED (ДМЭ) — дифракция медленных электронов; HEED (ДБЭ) — дифракция быстрых электронов; RHEED (ДОБЭ) — дифракция отраженных быстрых электронов; ILEED (ДНМЭ) дифракция неупруго отраженных медленных электронов; AES (ЭОС) — электронная Оже-спектроскопия; EIID (ЭСИД) — электронно-стимулированная ионная десорбция; EPSMS (МСЭПЗ) — масс-спектрометрия с электронным поверхностным зондом; EID (ЭСД) — электронно-стимулированная десорбция; SDMM (МДПМ) — микроскопия десорбции поверхностных молекул; CIS (СХИ) — спектроскопия характеристического излучения; APS (СПП) — спектроскопия пороговых потенциалов

нии. Эта информация (с учетом, конечно, природы зондирующего пучка) или ее часть позволяет судить о процессах на поверхности образца во время зондирования.

В качестве зондирующих частиц электронные пучки начали использоваться раньше и значительно шире других. Это объясняется доступностью их получения, так как источники электронных пучков наиболее просты и довольно дешевы, их легко приобрести или изготовить.

Облучение поверхности электронами может вызывать эмиссию всех четырех видов вторичных частиц (рис. 3.18). Из всех видов эмиттируемых частиц наиболее часто анализируются вторичные электроны, что обусловлено сравнительной простотой их регистрации.

Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных методов, использующих электронное зондирование.

Эмиссия электронов

Облучая поверхность электронным пучком и детектируя электроны, покидающие эту поверхность, можно определять число эмиттируемых электронов, их энергию и пространственное распределение. В некоторых случаях достаточно один из этих параметров, в других необходимы два или все три. Если регистрируют только отраженные первичные частицы (задерживая все электроны, потерявшие энергию, при помощи тормозящих электродов) и рассматривают пространственное распределение таких электронов, то такой метод исследования называют методом дифракции медленных электронов (LEED — ДМЭ) [24], он позволяет выявлять периодическую структуру на поверхности, свойствами которой и обусловлено возникновение пространственной дифракционной картины. Метод ДМЭ хорошо известен и используется уже почти 50 лет. Поскольку дебройлевская длина волны электронов должна быть сравнимой с ожидаемым периодом структуры на поверхности, их энергия ограничена интервалом от 20 до 200 эВ. Этим диапазоном энергий, считающихся для электронов очень низкими, и определяется название метода. Для реализации метода ДМЭ, то есть определения лишь пространственного распределения рассеянных частиц, очевидно, не требуется сложная аппаратура (рис. 3.19). Однако следует учитывать, что траектории медленных электронов могут быть искажены даже очень слабыми магнитными полями. Поскольку же эти траектории имеют первостепенное значение, очень важно снизить до минимума магнитные поля внутри установки.

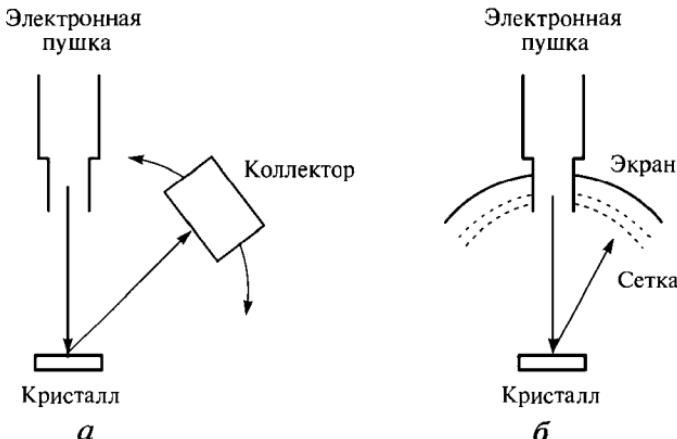


Рис. 3.19. Аанализ поверхности методом ДМЭ: *а* — измерение числа рассеянных электронов; *б* — наблюдение дифракционной картины

Таким образом, осуществление эксперимента по ДМЭ и получение дифракционной картины пятен — не очень сложная задача. Иное дело — правильный анализ полученной картины.

Известно, что однозначно интерпретировать информацию о поверхностных структурах, исходя лишь из пространственного распределения электронов, крайне трудно. Очень важно также измерить с высокой точностью число электронов, приходящих в область каждого пятна. Для этого необходимо использовать передвижной цилиндр Фарадея, что значительно усложняет систему. Однако измерение в каждом пятне не только пространственного распределения, но и числа отраженных частиц как функции энергии первичных электронов, позволяет получить более полную информацию о пространственной периодичности изучаемой поверхностной структуры.

ДМЭ дает сведения о пространственном размещении атомов материала, но не позволяет судить об их химической природе. Необходимо также помнить, что зондирующий электронный пучок не только рассеивается, создавая дифракционную картину, но и взаимодействует с адсорбированными частицами, вызывая изменение этих компонентов.

Хотя для получения дифракционной картины чаще используют медленные электроны, могут быть осуществлены эксперименты и с электронами высоких энергий. Методом дифракции быстрых электронов (НЕЕД — ДБЭ) [24] обычно исследуют тонкие пленки и наблюдают дифракционные картины, создаваемые проходящими сквозь пленку электронами. Ясно, что ин-

формация, получаемая таким методом, относится к объему, поэтому для исследования поверхности метод ДБЭ широко не применяется.

Чувствительность электронов большой энергии к самой поверхности можно увеличить, облучая поверхность быстрыми электронами под скользящими углами. В этих условиях электроны отражаются от поверхностно слоя и рассеянные частицы регистрируются с той же стороны, с которой падает зондирующий пучок. Такой метод называется дифракцией отраженных быстрых электронов (RHEED — **ДОБЭ**) и применяется для анализа поверхности [24].

Выше речь шла об анализе электронов, которые рассеиваются без заметных потерь энергии. Поэтому ДМЭ иногда называют дифракцией упругоотраженных медленных электронов (ДУМЭ). Но при взаимодействии электронов с твердым телом возможны и неупругие столкновения. Электроны также могут выходить из образца, испытав ряд неупругих и упругих столкновений. Можно исследовать пространственное распределение таких электронов, пропуская на коллектор системы лишь частицы, потерявшие определенную дискретную порцию энергии. Такой метод называют методом дифракции неупругоотраженных медленных электронов (ILEED — **ДНМЭ**) [24], и он может дать дополнительную информацию о материале, но ясно, что извлечь ее намного труднее. Необходимо выделять электроны с определенной энергией, а также придется иметь дело со значительно более слабыми сигналами. Метод нашел очень ограниченное применение, по-видимому, из-за существенного усложнения экспериментальной установки.

Различные методы, о которых говорилось выше, в принципе, дают сведения только о периодичности структуры материала, причем в случае периодичности объем получаемой информации может быть очень большим, особенно при проведении точных количественных измерений в дополнение к определению пространственного распределения. Если же структура не периодична (по крайней мере на протяжении 10–20 межатомных расстояний), эти методы бесполезны.

В описанных выше методах анализируются в основном упругорассеянные электроны. В то же время многочисленные исследования были посвящены изучению неупругорассеянных и вторичных электронов и разработке методов их анализа. Один из самых известных и относительно недавно разработанных методов — это метод электронной Оже-спектроскопии (AES —

ЭОС) [24]. Принцип этого метода поясняется схемой энергетических уровней на рис. 3.20.

Электрон, падающий на мишень с достаточно высокой энергией, может выбить электрон внутренней оболочки атома. Из возбужденного состояния атом может вернуться в основное одним из нескольких возможных путей. Один из вариантов: переход электрона с более высокого энергетического уровня на более низкий. Освободившаяся при этом энергия может быть испущена в виде фотона обычного характеристического рентгеновского излучения (наклонная стрелка вверх на рисунке). В ином варианте энергия может быть передана другому электрону, который тогда сможет покинуть атом и образец. Кинетическая энергия такого электрона определяется исключительно разностью энергий, показанной на рис. 3.20. Такой электрон и называют Оже-электроном. Анализ энергетического распределения этих частиц позволяет определить химическую природу атомов точно так же, как и анализ характеристического рентгеновского излучения.

Для реализации метода ЭОС необходимо создать пучок электронов с энергиями, достаточными для возбуждения уровней изучаемых атомов, как правило, с значением в интервале от 1000 до 3000 эВ. Получение таких пучков — задача несложная.

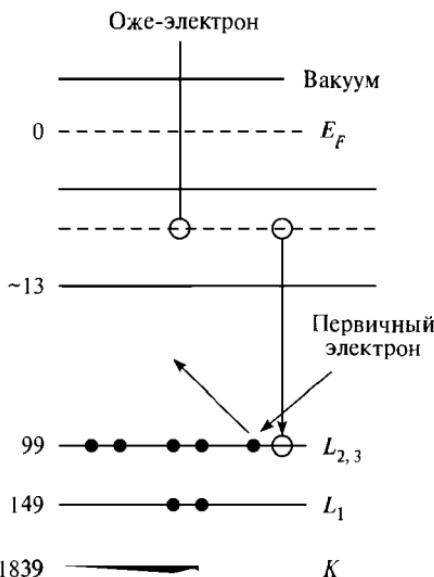


Рис. 3.20. Диаграмма энергетических уровней, иллюстрирующая механизм эмиссии Оже-электронов. Цифры слева характеризуют энергию уровней (чем больше число, тем ниже уровень)

Вторая часть метода — анализ распределения Оже-электронов по энергиям. Устройства для энергетического анализа электронов хорошо известны и также весьма просты. Сложность метода заключается в том, что приходится измерять малое число Оже-электронов на фоне большого тока вторичной электронной эмиссии (Оже-электроны образуют лишь очень небольшой изгиб на кривой зависимости интенсивности вторичных электронов от их энергии). Проблема была решена после того, как было предложено для выделения этих малых приращений дифференцировать сигнал. Такая операция проводится с помощью сравнительно простых и доступных синхронных детекторов. Без особого труда можно собрать или приобрести готовый блок, который позволит отличить Оже-сигнал материала мишени от сигнала адсорбированных частиц, доля которых составляет всего ~1% моноатомного слоя.

Итак, метод ЭОС дает информацию о химической природе изучаемых компонентов. Для получения наибольшего числа Оже-электронов, как правило, используют первичные пучки с энергией 2,5 кэВ. Такие пучки проникают в материал на значительную глубину. Однако для Оже-электронов, образующихся в объеме образца, весьма велика вероятность неупругих столкновений на пути к поверхности, поэтому они не дают вклада в наблюдаемый в спектре Оже-пик. Практически могут быть зарегистрированы лишь Оже-электроны, образовавшиеся на глубине не более 10–30 Å. Эта глубина детектирования зависит от материала изучаемого образца, но почти всегда лежит в интервале от 3 до 10 атомных слоев. Вклад электронов из различных слоев уменьшается экспоненциально с их глубиной, в итоге сигнал очень сильно зависит от поверхностного моноатомного слоя. Если анализируется рентгеновское излучение, то сигнал формируется и на больших глубинах, так как длина свободного пробега рентгеновских квантов намного больше, чем глубина проникновения первичного пучка. Благодаря своей чувствительности к поверхности Оже-спектроскопия стала самым распространенным методом анализа поверхности.

Для простого определения химической природы атомов можно использовать несложную экспериментальную систему. Для получения количественных данных, то есть соотношения амплитуды Оже-пика или его интегральной площади к количеству данного материала, необходима очень точная калибровка измерительной системы, а также тщательная и контролируемая работа анализатора. Если требуется определить, получен ли сиг-

нал от изолированного атома или от атома, входящего в состав молекулы, то требуется высокое разрешение (различие энергетических уровней). Например, энергетические уровни кислорода будут несколько различаться для его атомного состояния, молекулярного состояния или для кислорода в составе различных молекул, таких как оксид углерода, оксид кремния и т. д., и проявляться в небольшом различии энергий и форм пиков Оже-электронов. Пики с хорошим разрешением могут быть проанализированы с привлечением результатов калибровочных измерений. Ясно, что такого рода сведения представляют значительно большую ценность при изучении поверхностей и взаимодействия с ними адсорбированных частиц.

В итоге можно сказать, что электронная Оже-спектроскопия — самый распространенный и необычайно перспективный метод исследования поверхности. Метод ЭОС определяет главным образом химическую природу исследуемой поверхности, а при значительных усилиях дает сведения и о количестве материала, а также иногда допускает идентификацию молекул.

Отметим один интересный комбинированный метод. Сетки, используемые в стандартных системах ДМЭ, могут служить энергоанализатором. Добавив к стандартному прибору ДМЭ соответствующую электронную схему, можно проводить на одном и том же приборе измерения и методом ДМЭ, и методом ЭОС. Такая комбинированная система дает сведения как о химической природе частиц, так и о периодической структуре на поверхности мишени. Прибор такого типа представляется чрезвычайно ценным, и может сложиться впечатление, что он должен получить широкое распространение. К сожалению, применение набора сеток прибора ДМЭ в качестве энергоанализатора приводит к уменьшению отношения сигнала к шуму, в связи с чем для получения Оже-спектра требуется много времени. Однако оснащение системы другими видами анализаторов, например, цилиндрическим зеркалом, позволяет снизить время затраты в 100–1000 раз.

Рентгеновская фотозелектронная спектроскопия

Облучение поверхности образца рентгеновским пучком также способно в случае высоких энергий рентгеновских квантов вызвать эмиссию вторичных электронов за счет возбуждения внутренних электронных оболочек атомов. Если энергию первичного рентгеновского пучка обозначить как E_0 , энергию связи возбужденного электрона — как E_b , а разность работ выхода электронов

из материалов образца и анода рентгеновского источника — через $\Delta\Phi$, то энергия эмитируемого электрона (кинетическая энергия фотоэлектрона) E_{xp} определяется из выражения

$$E_{xp} = E_0 - E_b - \Delta\Phi, \quad (3.13)$$

в том случае, если $\Delta\Phi$ и E_0 постоянны для данных условий эксперимента. Электроны с различными энергиями связи обусловливают появление раздельных пиков фотоэлектронного спектра. Применение этого явления для химического анализа облучаемой поверхности получило название рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (**РФЭС**), называемой также электронной спектроскопией с целью химического анализа (**ЭСХА**).

Первичный рентгеновский пучок обычно возбуждается в результате облучения электронами низких энергий анода из алюминия или магния. Энергия квантов K_α излучения и энергетическая ширина соответствующих характеристических линий равны 1253,9 и 0,7 эВ для магния и 1487,0 и 0,85 эВ для алюминия. Так как $\Delta\Phi$ составляет ~ 1 эВ, энергия фотоэлектронов, возбуждаемых при использовании алюминиевых и магниевых источников, достаточно низкая, и глубина выхода вторичных электронов менее 5 нм. Поэтому появляется возможность анализировать химический состав тонкого (несколько атомных монослоев) приповерхностного слоя, аналогично тому как это осуществляется в методе ЭОС.

Системы детектирования и анализа вторичных электронов в методе РФЭС сходны с применяемыми в методе ЭОС. Как и в ЭОС, для исследования профилей распределения примесей по глубине осуществляется ионное распыление поверхностных слоев. Разрешение по глубине для обоих методов одинаково. Но в плоскости разрешение РФЭС очень низкое, так как диаметр первичного рентгеновского пучка составляет 1–2 мм.

Метод РФЭС часто используется как равнозначный методу ЭОС или как дополнение к нему благодаря следующим преимуществам. Во-первых, метод РФЭС обеспечивает возможность исследования радиационно нестойких материалов, так как сечение рассеяния процессов диссоциации и десорбции при возбуждении рентгеновскими квантами существенно меньше, чем при электронном возбуждении. Во-вторых, использование электрически нейтрального первичного пучка значительно снижает вероятность заряда поверхности исследуемых диэлектриков. В-третьих, по данным РФЭС можно получать информацию о химической связи, так как энергетические уровни электронов

внутренних оболочек зависят от валентного состояния и типа химической связи. Типичное энергетическое разрешение пиков спектров РФЭС составляет ~ 5 эВ, и, поскольку различные типы химической связи часто обусловливают сдвиги энергии связи на большие величины, такие сдвиги можно детектировать с целью идентификации характера связи.

Зондирование ионами

При разработке каждого конкретного метода в первую очередь учитываются предполагаемые технические характеристики и вид получаемой информации, однако также важное значение имеет и уровень сложности эксперимента. Поэтому, хотя метод зондирования поверхности ионными пучками в принципе мог бы явиться очень ценным методом ее исследования, но из-за значительных трудностей создания контролируемого ионного пучка (по сравнению с электронным), он применяется гораздо реже.

Как и электронные, пучки ионов могут вызывать эмиссию всех четырех типов частиц (рис. 3.21); как при электронном облучении чаще всего регистрируют вторичные электроны, так и при ионном облучении детектируются главным образом эмитируемые ионы. Основное отличие метода облучения ионами от метода электронного облучения заключается в том, что в первом случае может происходить значительный обмен кинетической энергией, так как масса ионов сравнима с массой атомов мишени. Это может приводить к значительному распылению, а следовательно, и к большим изменениям поверхности во время измерений. Поэтому при использовании ионных пучков необходимо

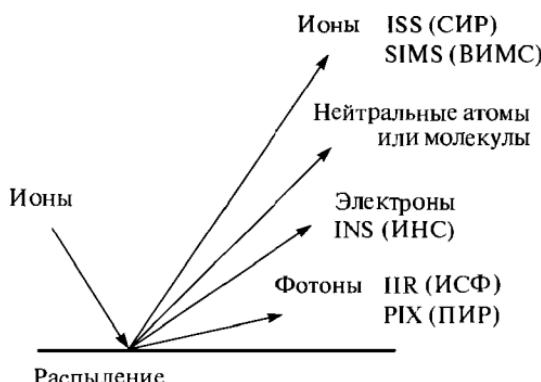


Рис. 3.21. Методы, основанные на ионном облучении

ходимо обращать особое внимание на то, чтобы исследуемая поверхность не оказалась разрушенной, прежде чем будут получены сведения об ее состоянии.

Эмиссия ионов

Как и при анализе электронов, в этом случае можно измерять число эмиттируемых ионов, их энергетическое и пространственное распределение, но в случае эмиссии ионов существует дополнительная возможность проведения масс-анализа, естественно, отсутствующая в случае электронов. Так, зондирующий ионный пучок может приводить к образованию отраженных первичных ионов и вторичных положительных и отрицательных ионов материала мишени. Поскольку при этом образуются положительные и отрицательные ионы с разным отношением массы к заряду, а также много отраженных первичных частиц, измерение лишь полного числа вторичных ионов не дает определенной информации. Поэтому измерения числа частиц всегда сопровождаются получением по крайней мере еще одной характеристики. Хотя из пространственного распределения эмиттируемых ионов можно извлечь некоторую информацию, это направление почти не привлекло внимание исследователей. Большая сложность проведения такого эксперимента вместе с ограниченностью объема сведений о поверхности, которые могут быть из него получены, воспрепятствовали сколько-нибудь серьезным разработкам в этом направлении. Поэтому при ионном зондировании поверхности определяют число ионов и одновременно анализируют их распределение по энергии или массе (или и то, и другое).

Основной метод анализа распределения по энергиям называют спектрометрией ионного рассеяния (ISS — СИР) [24]. Предполагается, что бомбардирующий ион претерпевает простое парное столкновение с атомом мишени и теряет энергию в результате простого обмена кинетической энергией. Исходя из этого, можно рассчитать энергию рассеянного первичного иона как функцию массы рассеивающего атома и угла рассеяния. При фиксированном значении угла рассеяния (его часто выбирают равным 90°) отношение энергии отраженной первичной частицы к ее начальной энергии оказывается простой функцией отношения масс рассеивающего атома и бомбардирующего иона. Следовательно, эксперимент сводится к облучению поверхности первичным пучком с энергией порядка нескольких килоэлектронвольт и анализу энергии отраженных первичных частиц.

Таким образом получают спектр, аналогичный изображенному на рис. 3.22.

Интересно отметить, что пики наблюдаются при энергиях, очень близких к предсказанным на основе приближения простых парных столкновений. Если первичный пучок проник в глубь образца, вероятность того, что ион испытает в объеме материала простое парное столкновение и затем выйдет обратно без дополнительной потери энергии, очень мала. Следовательно, такой метод очень чувствителен к поверхности и получаемый сигнал должен быть связан почти исключительно с поверхностным моноатомном слоем, тогда как вклад второго или третьего слоя, по-видимому, предельно мал.

Важное достоинство метода СИР заключается в простоте аппаратуры и высокой чувствительности к моноатомному поверхностному слою. Сложность же его применения связана с созданием контролируемого ионного пучка в условиях, когда вблизи образца поддерживается высокий вакуум, обычно необходимый для многих поверхностных экспериментов. Как можно видеть из рис. 3.22, разрешение прибора, достигаемое при разумном отношении сигнала к шуму, невелико, так что в настоящее время метод используется лишь для анализа простых поверхностей.



Рис. 3.22. Спектр, полученный при анализе распределения по энергиям рассеянных первичных ионов (данные фирмы 3М). Образец оксида алюминия бомбардировался ионами Не с энергией 1500 эВ. График иллюстрирует характер результатов сравнительно нового метода РМИ

Если вместо анализа энергий отраженных первичных частиц проводить масс-анализ распыленных ионов, то получаем метод, который обычно именуют вторично-ионной масс-спектрометрией (**SIMS — ВИМС**) [6, 23, 24]. В этом методе блок зондирующей пушки остается таким же, как в спектрометрии ионного рассеяния, и лишь энергоанализатор заменяется соответствующим масс-спектрометром. При этом можно определить число и вид как положительных, так и отрицательных ионов, выбитых из поверхности. Ряд существенных отличий данного метода от спектроскопии ионного рассеяния заключается в численном превосходстве вторичных ионов разных видов над отраженными первичными, а также значительно большем разрешением анализатора. Большое число пиков вторичных ионов значительно усложняет спектр, но в то же время дает более полную картину о химических процессах на поверхности. Данный метод требует несколько более сложной регистрирующей системы, чем при методе РМИ (рассеяние медленных ионов — модификация более общего метода СИР), но зато несет больше информации о составе поверхности. Как и метод рассеяния ионов, метод ВИМС весьма чувствителен к поверхности, ибо лишь очень немногие ионы, попавшие в процессе распыления внутрь образца, могут пройти сквозь слой материала и попасть в анализатор. Очевидно, что вторично-ионный масс-спектрометр также может быть с успехом применено для снятия профилей концентрации (рис. 3.23). Оба метода допускают объединение с методами вспышки (стимулирование десорбции облучением видимым светом) или электронно-стимулированной десорбции. Можно также сфокусированный ионный пучок развертывать в растр на поверхности образца и получать картину распределения компонентов по поверхности. Конечно, все это оказывается на значительном усложнении аппаратуры.

Информация, получаемая методами СИР и ВИМС, в известной мере сходна с информацией, которую дает электронная Оже-спектроскопия (ЭОС). У каждого из них имеются определенные преимущества и недостатки, которые были отмечены выше, но в данный момент ЭОС применяется шире, чем РМИ или ВИМС, так как большинство исследователей лучше знакомы с методами получения и регистрации электронных пучков. Вероятно, что по мере совершенствования техники контролируемых ионных пучков, методы, связанные с ионным облучением, получат более широкое распространение. Это относится в пер-

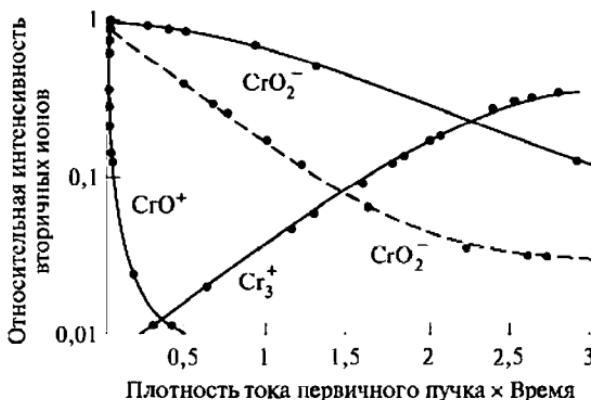


Рис. 3.23. Изменение интенсивностей вторичных ионов при распылении различных слоев оксидов на поверхности хрома [24]. Зависимость, показанная штриховой линией, отвечает дозе окисления около 100 Ленгмюров, а все другие — дозе 1200 Ленгмюров (1 Ленгмюр = 10^{-6} Торр · с). График иллюстрирует возможность изучения профилей концентрации — одного из новых ценных источников информации, получаемых с помощью анализирующих поверхность приборов

вую очередь к методу ВИМС, так как широкий набор образующихся вторичных ионов может дать ценную информацию о молекулярных связях, а при дополнительных усилиях можно проводить измерение профилей концентрации и очистку поверхности распылением. Следует отметить, что обнаружение водорода, невозможное при методе ЭОС, оказывается возможным при методе ВИМС.

Атомно-силовая микроскопия

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) был изобретен в 1986 г. Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйтом и Кристофером Гербером [31]. В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце (рис. 3.24). Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Качественно работу АСМ можно пояснить на примере сил Ван-дер-Ваальса [32]. Наиболее часто энергию ван-дер-ваальса взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r

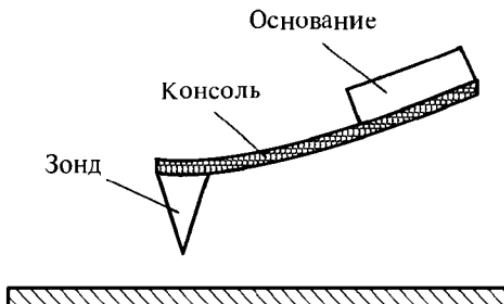


Рис. 3.24. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

друг от друга (рис. 3.25), аппроксимируют степенной функцией — потенциалом Леннарда-Джонса (рис. 3.26).

Первое слагаемое в данном выражении описывает дальнодействующее притяжение, обусловленное в основном диполь-ди-

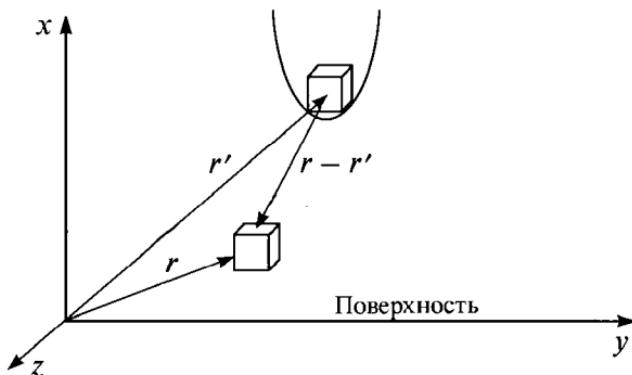


Рис. 3.25. К расчету энергии взаимодействия зонда и образца

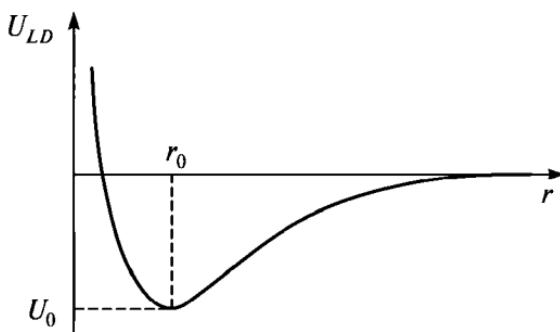


Рис. 3.26. Качественный вид потенциала Леннарда-Джонса

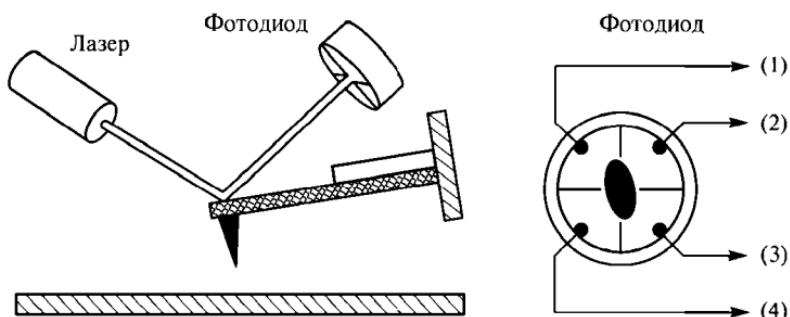


Рис. 3.27. Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика АСМ

польным взаимодействием атомов. Второе слагаемое учитывает отталкивание атомов на малых расстояниях. Параметр r_0 — это равновесное расстояние между атомами, а U_0 — значение энергии в таком положении.

Получение АСМ-изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В атомно-силовой микроскопии для этой цели широко используются оптические методы (рис. 3.27).

Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника. В качестве позиционно-чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные полупроводниковые фотодиоды.

Основные регистрируемые оптической системой параметры — это деформации изгиба консоли под действием Z -компонент сил притяжения или отталкивания (F_Z) и деформации кручения консоли под действием латеральных компонент сил (F_L) взаимодействия зонда с поверхностью. Если обозначить исходные значения силы фототока в секциях фотодиода через $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{04}$, а через I_1, I_2, I_3, I_4 — значения сил токов после изменения положения консоли, то разностные токи с различных секций фотодиода $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$ будут однозначно характеризовать величину и направление изгиба консоли зондового датчика АСМ. Действительно, разность токов вида

$$\Delta I_Z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$$

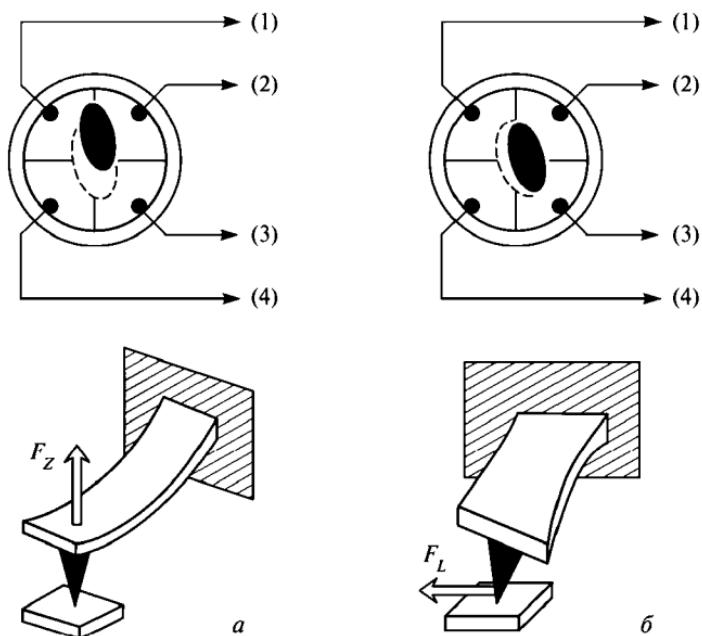


Рис. 3.28. Соответствие между типом изгибных деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде

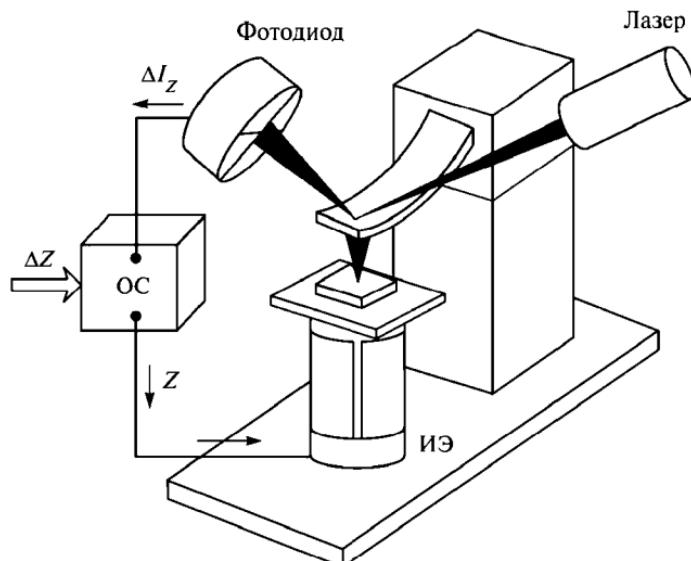


Рис. 3.29. Упрощенная схема организации обратной связи в атомно-силовом микроскопе

пропорциональна изгибу консоли под действием силы, действующей по нормали к поверхности образца (рис. 3.28, *a*), а комбинация разностных токов вида

$$\Delta I_L = (\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3)$$

характеризует изгиб консоли под действием латеральных сил (см. рис. 3.28, *б*).

Величина ΔI_Z используется в качестве входного параметра в петле обратной связи АСМ (рис. 3.29). Система обратной связи (ОС) обеспечивает $\Delta I_Z = \text{const}$ с помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента, который поддерживает изгиб консоли ΔZ равным величине ΔZ_0 , задаваемой оператором.

В процессе сканирования образца в режиме $\Delta Z = \text{const}$ зонд перемещается вдоль поверхности, при этом напряжение на Z -электроде сканера записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности $Z = f(x, y)$.

Пространственное разрешение АСМ определяется радиусом закругления зонда и чувствительностью системы, регистрирующей отклонения консоли. В настоящее время реализованы конструкции АСМ, позволяющие получать атомарное разрешение при исследовании поверхности образцов.

Технология изготовления зондовых датчиков АСМ. Для изготовления зондовых датчиков (рис. 3.30 и 3.31) используются пластины кристаллического кремния с кристаллографической ориентацией (110). На поверхность пластины осаждается тонкий слой фоторезиста (рис. 3.32, этап 2). Затем фоторезист экспонируется через фотошаблон, и часть фоторезиста удаляется посредством химического травления. Далее проводится имплантация ионов бора, так что ионы проникают на глубину по-

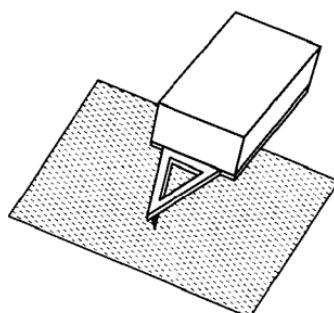


Рис. 3.30. Общий вид зондового датчика с треугольным кантилевером

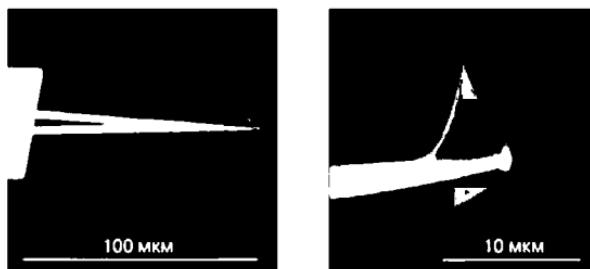


Рис. 3.31. Электронно-микроскопическое изображение ACM-зонда, расположенного на треугольном кантилевере [12]

рядка 10 мкм в область кремния, не защищенную фоторезистом (этап 3). После этого фоторезист смывается в специальном травителе, и затем проводится термический отжиг пластины, в результате которого атомы бора встраиваются в кристаллическую решетку кремния. Кремний, легированный бором, образует так называемый стоп-слой, который останавливает процесс травле-

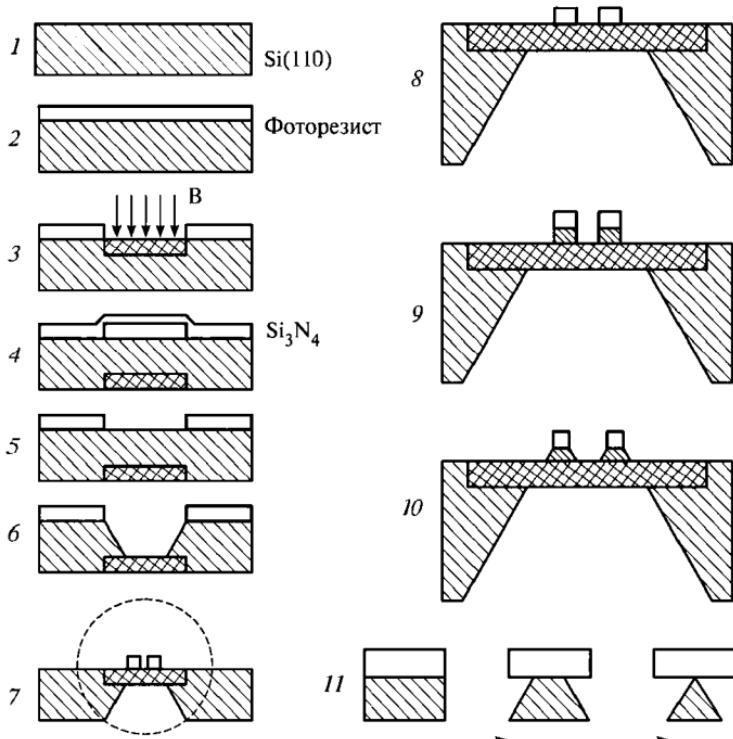


Рис. 3.32. Основные этапы процесса изготовления зондовых датчиков

ния для некоторых селективных травителей. Затем на обратной стороне пластины вновь проводится фотолитография, в результате которой формируется слой фоторезиста точно над областью с имплантированным бором. После этого пластина покрывается тонким слоем Si_3N_4 (этап 4), проводится селективное травление фоторезиста, причем в процессе растворения фоторезист набухает и срывает расположенную непосредственно над ним тонкую пленку Si_3N_4 (этап 5). Пластина кремния протравливается насеквоздь до стоп-слоя с помощью селективного травителя, который взаимодействует с кремнием и не взаимодействует с легированным кремнием и слоем Si_3N_4 (этап 6). После этого Si_3N_4 смывается, и на обратной стороне пластины в легированной области методом фотолитографии формируются островки из фоторезиста (этап 7, 8). Затем проводится травление кремния, в результате которого получаются столбики кремния под островками фоторезиста (этап 9). Далее с помощью плазменного травления из столбиков кремния формируются иглы (этап 10, 11). Для улучшения отражательных свойств кантилевера (наиболее распространенная конструкция микромеханического зонда) с обратной стороны (по отношению к острию) его покрывают тонким слоем металла (Al, Au) методом вакуумного осаждения. В результате данных технологических операций изготавливается целый набор зондовых датчиков на одной кремниевой пластине (см. разд. 5.3.1). Для проведения электрических измерений на зонд наносятся проводящие покрытия из различных материалов (Au, Pt, Cr, W, Mo, Ti, W_2C и др.). В магнитных АСМ-датчиках зонды покрываются тонкими слоями ферромагнитных материалов, таких как Co, Fe, CoCr, FeCr, CoPt и др.

Ближнепольная оптическая микроскопия

Традиционные методы получения оптических изображений объектов имеют существенные ограничения, связанные с дифракцией света. Одним из основополагающих законов оптики является существование так называемого дифракционного предела, который устанавливает минимальный размер (R) объекта, изображенное которого может быть построено оптической системой при использовании света с длиной волны λ :

$$R \approx \lambda / 2n,$$

где n — показатель преломления среды. Для оптического диапазона длин волн предельный размер составляет величину порядка 200—300 нм.

В ближнепольной оптической микроскопии используются другие принципы построения изображения объекта, которые позволяют преодолеть трудности, связанные с дифракцией света, и реализовать пространственное разрешение на уровне 10 нм и лучше.

Основные области применения ближнепольных оптических микроскопов — исследование локальных оптических и фотоэлектрических свойств полупроводниковых фоточувствительных структур, исследование биологических объектов и наноструктурированных материалов.

Ближнепольный оптический микроскоп (БОМ) был изобретен Дитером Полем (лаборатория фирмы IBM, г. Цюрих, Швейцария) в 1982 г. сразу вслед за изобретением туннельного микроскопа. В основе работы данного прибора используется явление прохождения света через субволновые диафрагмы (отверстия с диаметром много меньше длины волны падающего излучения).

При прохождении света через субволновое отверстие наблюдается ряд явлений [34]. Электромагнитное поле в области диафрагмы имеет сложную структуру. Непосредственно за отверстием на расстояниях $Z < 100 \text{ \AA}$ располагается так называемая ближняя зона, в которой электромагнитное поле существует в основном в виде эванесцентных (не распространяющихся) мод, локализованных вблизи поверхности диафрагмы. В области расстояний $Z > 100 \text{ \AA}$ располагается дальняя зона, в которой наблюдаются лишь излучательные моды. Мощность излучения за субволновой диафрагмой в дальней зоне может быть оценена по следующей формуле [34]:

$$P_{tr} = (128/27\pi)k^4a^6W_0,$$

где k — волновой вектор; a — радиус отверстия; W_0 — плотность мощности падающего излучения.

Оценки показывают, что для излучения с длиной волны порядка $\lambda = 500 \text{ нм}$ и диафрагмы с отверстием $\sim 5 \text{ нм}$ мощность излучения в дальней зоне составляет около 10^{-10} от мощности падающего излучения. Поэтому, на первый взгляд, кажется, что использование малых отверстий для построения растровых оптических изображений исследуемых образцов практически невозможно. Однако если поместить исследуемый объект непосредственно за отверстием в ближней зоне, то вследствие взаимодействия эванесцентных мод с образцом часть энергии

электромагнитного поля переходит в излучательные моды, интенсивность которых может быть зарегистрирована оптическим фотоприемником.

Таким образом, ближнепольное изображение формируется при сканировании исследуемого образца диафрагмой с субволновым отверстием и регистрируется в виде распределения интенсивности оптического излучения в зависимости от положения диафрагмы $I(x, y)$. Контраст на БОМ-изображениях определяется процессами отражения, преломления, поглощения и рассеяния света, которые, в свою очередь, зависят от локальных оптических свойств образца.

Зонды БОМ на основе оптического волокна. На сегодняшний день существует несколько схем реализации ближнепольного оптического микроскопа. Наиболее широкое применение нашли БОМ с зондами на основе оптического волокна, представляющего собой аксиально-симметричный оптический волновод из материалов с отличающимися показателями преломления (рис. 3.33).

Оптическое волокно состоит из сердцевины (core) и оболочки (cladding). Снаружи волокно покрывается защитным слоем. Сердцевина и оболочка изготавливаются, как правило, из особого кварцевого стекла. При этом стекло, используемое для оболочки, имеет меньший показатель преломления, чем стекло для сердцевины. На практике показатель преломления стекла регулируется с помощью легирующих добавок, так что коэффициенты преломления сердцевины и оболочки различаются на величину порядка 1%. Такая система, вследствие явления полного внутреннего отражения, позволяет локализовать оптическое излучение в области сердцевины и практически без потерь транспортировать его на большие расстояния.

Зонды для БОМ изготавливаются следующим образом. Очищенный от защитного слоя конец оптического волокна погружается в раствор, состоящий из двух несмешивающихся жидкостей — смеси HF , NH_4F , H_2O , которая является травите-

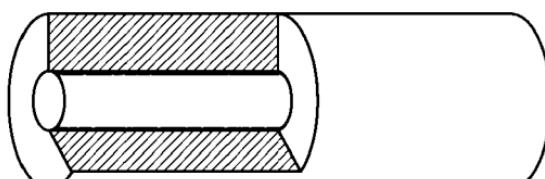


Рис. 3.33. Схематическое изображение строения оптического волокна

лем для кварца, и жидкости с меньшей плотностью, например толуола. Толуол располагается поверх травителя и служит для формирования мениска смачивания на границе толуол—травитель-волокно (рис. 3.34, *a*). По мере травления толщина волокна уменьшается, что приводит к уменьшению высоты мениска. В результате в процессе травления на конце волокна происходит формирование конусообразного остря (рис. 3.34, *б*) с характерными размерами меньше 100 нм. Затем кончик зонда покрывается тонким слоем металла. Покрытие наносится с помощью вакуумного напыления под углом порядка 30° к оси волокна, так что на кончике остря в области тени остается незапыленный участок малой апертуры, который и является ближнепольным источником излучения. Оптимальный угол при вершине зонда составляет порядка 20°.

«Shear-force» — метод контроля расстояния между зондом и поверхностью в БОМ. Для работы БОМ необходимо удерживать зонд над поверхностью на расстояниях порядка 10 нм и менее. Существуют различные решения данной проблемы, однако наиболее широкое распространение получили БОМ с так называемым «shear-force» методом контроля расстояния между зондом и образцом.

Чаще всего для реализации «shear-force»-контроля применяются схемы с использованием пьезодатчика на основе кварцевого резонатора камертонного типа (рис. 3.35). Зонд БОМ крепится к кварцевому резонатору с помощью клея. Вынужденные колебания камертона на частоте, близкой к резонансной частоте системы зонд—кварцевый резонатор, возбуждаются с помощью дополнительного пьезовибратора. При этом зонд совершает колебательное движение параллельно поверхности образца. Изме-

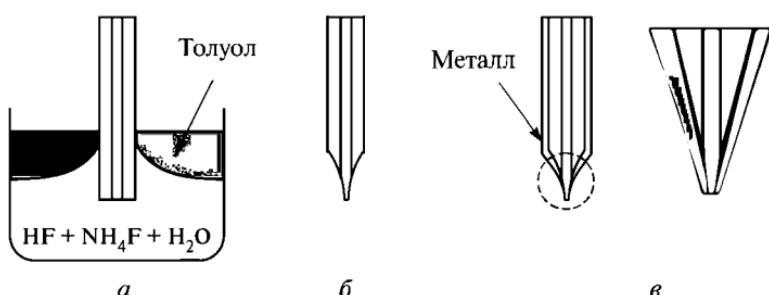


Рис. 3.34. Изготовление БОМ-зондов на основе оптического волокна: *а* — химическое травление волокна; *б* — вид кончика волокна после травления; *в* — напыление тонкой пленки металла

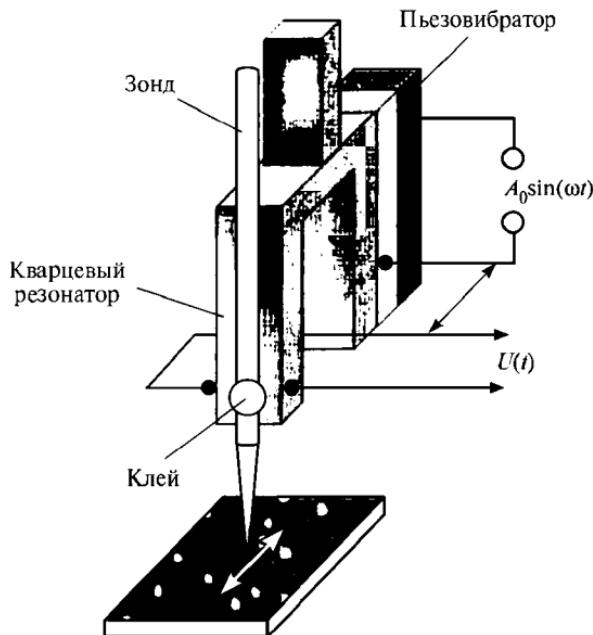


Рис. 3.35. Схема «shear-force» датчика расстояния зонд—поверхность на основе кварцевого резонатора камертонного типа

рение силы взаимодействия зонда с поверхностью производится посредством регистрации изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний кварцевого резонатора на частоте возбуждения (по переменной составляющей напряжения на электродах резонатора $U(t)$).

Теория «shear-force»-контроля достаточно сложна, и здесь мы ограничимся лишь качественными соображениями. По мере сближения зонда и образца наблюдается несколько эффектов. Во-первых, появляется диссипативное взаимодействие зонда с поверхностью за счет сил вязкого трения в тонкой прослойке воздуха, прилегающего к поверхности, и в тонком слое адсорбированных молекул на поверхности образца (рис. 3.36). Это приводит к уменьшению добротности системы, а следовательно, к уменьшению амплитуды колебаний и уширению АЧХ и ФЧХ системы зонд—резонатор на резонансной частоте. Во-вторых, при малых расстояниях между зондом и поверхностью происходит изменение моды колебаний в системе зонд—резонатор. В свободном состоянии мода колебаний соответствует колебаниям стержня со свободным концом, а при сближении с образцом (в пределе при касании зонда поверхности) переходит в колебания стержня с за-

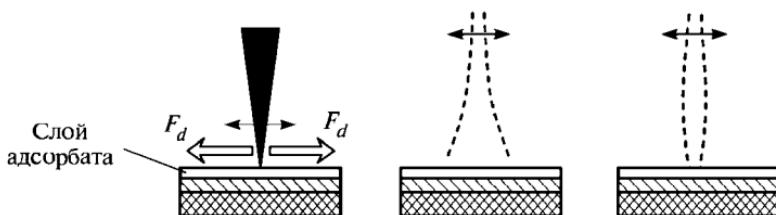


Рис. 3.36. Диссипативные силы, действующие на зонд, и смена моды колебаний зонда вблизи поверхности образца

крепленным концом. Это приводит к увеличению резонансной частоты в системе зонд–резонатор, то есть сдвигу АЧХ в сторону более высоких частот. Экспериментально данные явления наблюдались и описаны в работе [34].

Изменения амплитуды и фазы изгибных колебаний в системе зонд–резонатор используются в качестве сигналов обратной связи для контроля расстояния зонд–поверхность в ближнепольных оптических микроскопах.

Конфигурации БОМ. На практике используются несколько конструктивных схем ближнепольного оптического микроскопа [34], основные из которых схематично изображены на рис. 3.37. Наиболее часто реализуется схема, в которой оптическое излучение лазера локализуется в пространстве с помощью волоконного зонда. Такая схема позволяет получить максимальную мощность излучения в области субволнового отверстия и проводить исследование образцов как на отражение (рис. 3.37, *а*), так и на просвет (рис. 3.37, *б*). Для увеличения чувствительности излучение, отраженное от образца или прошедшее сквозь образец, собирается на фотоприемнике с помощью фокусирующего зеркала или линзы. Кроме собственно микроскопии, данная конфигурация БОМ широко используется в экспериментах по ближнепольной оптической литографии.

В экспериментах иногда требуются высокие уровни оптической накачки, например, при исследовании локальных нелинейных свойств образцов. В таких случаях мощное лазерное излучение направляется на исследуемую структуру, а прием осуществляется с помощью ближнепольного зонда (рис. 3.37, *в* и *г*).

На рис. 3.38 в качестве примера приведено изображение полупроводниковой структуры InAs/GaAs с квантовыми точками, полученное с помощью микроскопа, работающего по схеме на рис. 3.37, *а* [34]. В эксперименте использовался HeCd лазер ($\lambda = 442$ нм). Ближнепольное оптическое изображение образца

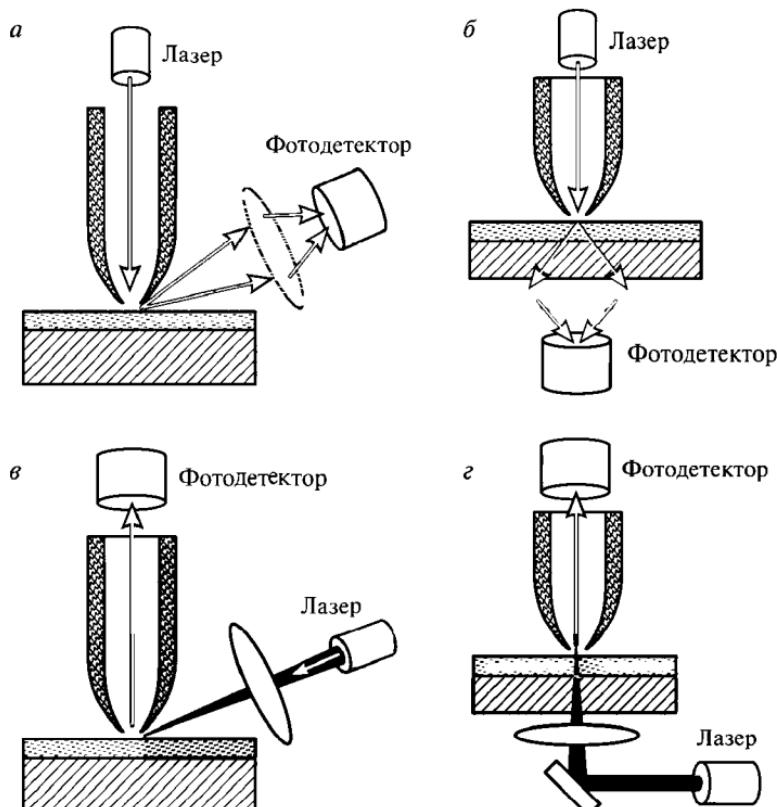


Рис. 3.37. Возможные конфигурации ближнепольного оптического микроскопа

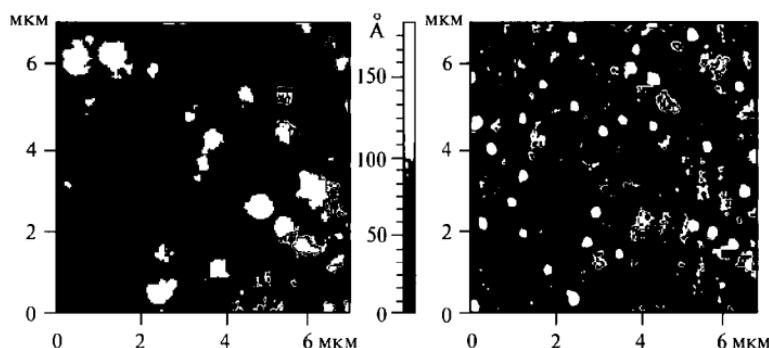


Рис. 3.38. «Shear-force» ACM-изображение рельефа поверхности (слева) и ближнепольное оптическое изображение (справа) образца с квантовыми точками InAs [34]

представляет собой совокупность отраженного от поверхности образца излучения и люминесцентного излучения, соответствующего переходу между уровнями размерного квантования в квантовых точках InAs.

Интересная, но менее распространенная схема, в которой возбуждение структуры и прием ближнепольного излучения осуществляются через зонд микроскопа, приведена на рис. 3.39.

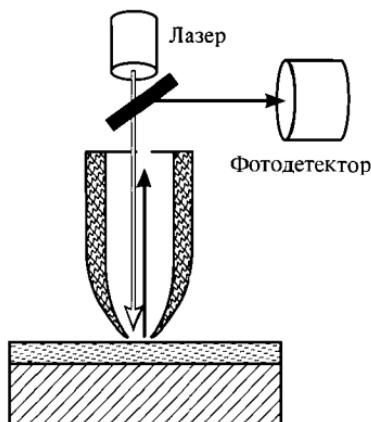


Рис. 3.39. Схема ближнепольного оптического микроскопа, в котором засветка образца и прием излучения осуществляются с помощью одного и того же зонда

Такое совмещение ближнепольного источника с ближнепольным приемником является весьма многообещающим методом, обеспечивающим очень высокое разрешение. Однако в данной схеме излучение дважды проходит через субволновое отверстие. Это приводит к тому, что приходящий на фотоприемник сигнал имеет очень низкую интенсивность, поэтому для его регистрации требуются высокочувствительные методы. Сопряжение БОМ с оптическим монохроматором позволяет проводить локальные спектроскопические исследования образцов.

3.10. Аппаратура и методы исследования процессов ионно-плазменного травления и анализа образцов после обработки

В данном разделе мы приведем пример проведения лабораторных исследований процессов ПХТ [14]. Разработка новых технологических процессов, а также оптимизация уже существующих

требует глубокого исследования физико-химических процессов как на поверхности твердых тел и на некоторой их глубине под воздействием ионно-плазменной обработки, так и в объеме ионно-плазменного потока.

Состав ионно-плазменных потоков в процессе травления анализировался с помощью масс-спектрометрии не только самих потоков, но и устойчивых продуктов их взаимодействия с обрабатываемым материалом, что дает более полную информационную картину.

Для исследований была использована установка с квадрупольным датчиком масс-спектрометра КМ-2, встроенным напротив ионного источника. В датчик ХАЧ проникали через медную диафрагму с отверстием диаметром 1,5 мм (рис. 3.40) [14]. В случае необходимости между источником и диафрагмой размещалась подложка с травимым слоем и также снимался спектр. Давление остаточного газа в квадрупольном датчике масс-спектрометра составляло $3 \cdot 10^{-4}$ Па. При включении напускного клапана в датчике масс-спектрометра устанавливалось давление $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ Па при рабочем давлении в реакторе $\sim 5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$ Па. Энергия ионного пучка квадрупольного датчика составляла ~ 90 эВ. Регистрация масс-спектра осуществлялась самописцем типа КСП-4.

Поверхность и приповерхностные слои исследовались методами эллипсометрии, Оже-электронной спекгроскопии и ИК-спектроскопии.

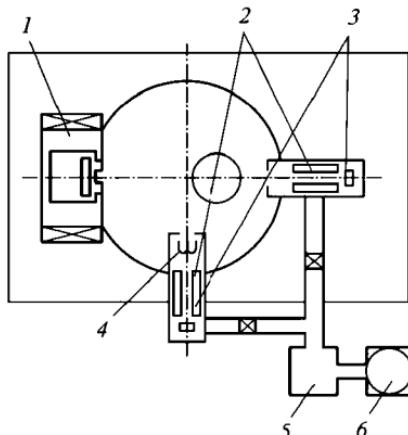


Рис. 3.40. Схема установки для масс-спектрометрических исследований:

1 — источник «Радикал»; 2 — фильтр масс; 3 — коллектор; 4 — автономный ионный источник; 5 — паромасляный насос; 6 — форвакуумный насос

Исследование тонких слоев на кремнии и других материалах эллипсометрическим методом проводилось на аппаратуре ЛЭФ-ЗМ, описание которой есть в работе [35]. Основанием эллипсометра служит лазер непрерывного действия с неон-гелиевой смесью типа ЛГ-55 и длиной волны 632,8 нм. Экспериментальные исследования тонких диэлектрических пленок осуществляли в два этапа. Сначала определялись оптические константы подложки, а затем оптические характеристики исследуемых пленок. Измерения проводились на воздухе и в тетрахлорметане. Точность определения величины показателя преломления и толщины исследуемых пленок была не хуже 5%.

Элементный состав исследуемых пленок определялся методами Оже-электронной и ИК-спектроскопии.

Оже-электронная спектроскопия обладает чувствительностью $\sim 0,1\%$ моноатомного слоя [14]. Исследования проводились на Оже-спектрометре фирмы Riberg типа LAS-300 со следующими характеристиками: энергия первичных электронов Оже-спектрометра — 3000 эВ, ток электронного пучка — $2,5 \cdot 10^{-6}$ А, давление в рабочей камере — не выше 10^{-7} Па. Полученные Оже-спектры сравнивались со стандартными Оже-спектрами чистых материалов. Количественный анализ элементного состава поверхности проводился с точностью $\pm 20\%$ для абсолютных концентраций и $\pm 5\%$ для относительных [14].

В простейшем случае [104]:

$$A_i = \frac{\alpha_i I_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j I_j},$$

где A_i — концентрация химического элемента; I — амплитуда Оже-сигнала химического элемента; α — коэффициент относительной чувствительности элемента. Коэффициенты α для некоторых химических элементов представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Величина коэффициента относительной чувствительности для различных элементов

Химический элемент	Si	S	O	F	C	N	Al	Cl	Na
Энергия Оже-электронов, эВ	92	78	495	660	272	383	1396	181	990
α	1,0	1,9	6,0	2,3	3,0	1,4	1,0	0,8	13

Спектры инфракрасного поглощения регистрировались на двухлучевом спектрометре ИКС-29.

Одним из важнейших аспектов успешного применения ионно-плазменных процессов является минимальное воздействие на параметры активных структур интегральных микросхем.

Для исследования зарядовых свойств структуры $\text{SiO}_2\text{—Si}$, определяющих стабильность функционирования активных элементов микросхем, был выбран метод изучения вольт-фарадных характеристик этой структуры после различных обработок.

Плотность эффективного и подвижного зарядов определяли по формулам:

$$N_{\text{эфф}} = C_0 V_{\text{пз}} / eS, \quad (3.14)$$

$$N_{\text{подв}} = C_0 V_{\text{пп}} / eS, \quad (3.15)$$

где $N_{\text{эфф}}$ — плотность эффективного заряда ($10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$); $N_{\text{подв}}$ — плотность подвижного заряда ($10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$); C_0 — максимальная емкость структуры $\text{SiO}_2\text{—Si}$; $V_{\text{пз}}$ — изменение напряжения плоских зон после термополевых воздействий (В); $V_{\text{пп}}$ — напряжение термополевого воздействия (В); e — заряд электрона (Кл); S — площадь полевого электрода (см^2).

Ошибка в измерении $N_{\text{эфф}}$ и $N_{\text{подв}}$ в основном определяется ошибкой измерения $V_{\text{пз}}$ и, как правило, не превышала 20%.

Воздействие ионно-плазменных обработок и очисток оценивалось также сравнением получаемых вольт-амперных характеристик диодов Шоттки Al—Si—Si с идеальными ВАХ диодов, формируемых по стандартной технологии.

Исследования плазмохимического травления заключалось в получении основных параметров: глубина стравленного слоя материала, скорость травления, профиль локального травления и маскирующих слоев, соотношение линейных размеров маски и соответствующих участков в материале травления.

Измерения глубины стравленного слоя материала проводились с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4 и профилографа-профилометра М-201 на ступеньке травления, получаемой с помощью маскирующего покрытия после удаления последнего. В ряде случаев измерения проводились по сколу в плоскости травления с помощью растрового электронного микроскопа S-4 (Англия), с разрешением 30 нм.

Согласно паспортным данным микроинтерферометр МИИ-4 позволяет измерять высоту рельефа в пределах от 30 нм до 1000 нм с абсолютной погрешностью $\Delta_1 = 15$ нм, а линейные размеры с абсолютной погрешностью измерения $\Delta_2 = 150$ нм.

Скорость травления материала определяется из выражения:

$$V_{\text{тр}} = d/t, \quad (3.16)$$

где $V_{\text{тр}}$ — скорость травления ($\text{нм} \cdot \text{с}^{-1}$); d — величина стравленного слоя (нм); t — время травления (с), при этом ошибка ее измерения зависит от абсолютной ошибки измерения толщины Δd (нм) и абсолютной ошибки измерения времени Δt (с):

$$\Delta V_{\text{тр}} = \Delta d/t + (d\Delta t)/t^2.$$

Очевидно, что при максимальной ошибке измерения времени $\sim 1-2$ с и среднем времени одного эксперимента 180 с, вторым компонентом выражения (3.16) можно пренебречь, тогда

$$\Delta V_{\text{тр}} = \Delta d/t = 15 \text{ нм} / 180 \text{ с} = 0,08 \text{ нм/с.}$$

При измерении толщины стравленного слоя с помощью профилометра М-201 при усилении в $4 \cdot 10^4$ раз $\Delta d = 0,4/(4 \cdot 10^4) = 10 \text{ нм}$, тогда $\Delta V_{\text{тр}} = 10 \text{ нм}/180 \text{ с} = 0,06 \text{ нм/с}$, то есть абсолютные ошибки измерения толщины стравленного слоя и скорости травления для приборов МИИ-4 и М-201 приблизительно одинаковы по величине.

Таким образом, совокупность всех трех способов измерений дает необходимую и достоверную информацию по определению глубин и профилей травления.

Исследования механизмов плазмохимического травления любого материала могут быть акцентированы на:

- количественной диагностике внешних и внутренних параметров плазмы;
- количественном кинетическом анализе химических реакций в плазме, включая изучение механизмов образования и гибели химически активных частиц;
- собственно исследовании механизмов травления и пассивации материалов.

С этой целью в работах [8, 29] был разработан другой комплекс методов диагностики: спектральных — для исследования концентрации быстрых электронов, концентраций атомов и других химически активных частиц, зондовых — для измерения потоков и энергий ионов, электронов и релаксационно-импульсного — для исследования кинетики образования и гибели химически активных частиц. Применение этих методов позволило измерять непосредственно потоки и энергии частиц, воздействующих на поверхность материалов, что необходимо для выяснения механизмов травления, времени жизни некоторых ХАЧ и коэффициентов гибели на различных поверхностях.

Глава 4

Разработка процессов плазмохимического травления кремния с использованием компьютерного моделирования

Повышение степени интеграции, увеличение быстродействия, создание принципиально новых устройств обусловило исследование и разработку процессов плазмохимического травления с использованием компьютерного моделирования. Ранее моделирование профилей базировалось в основном на феноменологических моделях, не учитывающих специфику взаимодействия плазмы с поверхностью. Так, основными параметрами модели анизотропного травления были вертикальная и горизонтальная составляющие скорости травления, в то время как физическая сторона вопроса о происхождении анизотропии, как правило, не исследовалась, а все внимание уделялось исследованию эволюции профиля травления.

Чтобы усовершенствовать модель процесса травления необходимо учитывать основные механизмы взаимодействия частиц плазмы с травящейся поверхностью. Результаты моделирования, полученные в течение последних 20 лет в этом направлении будут рассмотрены ниже на примерах процессов плазмохимического травления субмикронных структур в кремнии и других материалах.

4.1. Основы моделирования процессов травления в плазме

«Идеальную» модель травления в плазме можно описать тремя модулями моделирования отвечающих трем основным явлениям плазменного травления:

- модуль образования плазмы (активация);
- модуль транспортировки частиц;
- модуль реакции на поверхности [44].

Модуль плазмы, учитывающий внешние вводимые (входные) параметры, такие как рабочее давление, расход газов и газовых смесей, мощность на подложкодержателе и конструкция

реактора, должен вычислять концентрации и энергии (температуры) образованных в плазме частиц (ионы, электроны, радикалы, нейтральные молекулы и атомы), которые являются выходными параметрами модели.

Полученные значения выходных параметров вводятся в модуль транспортировки, который включает в себя транспортировку частиц в области пространственного заряда (ОПЗ) или в плазме и транспортировку частиц по поверхности, как входные. Модуль транспортировки в ОПЗ учитывает рабочее давление и конструкцию реактора и предсказывает, полагаясь на концентрации частиц в плазме и их температуру, функцию распределения по энергиям и по углам (**ФРЭ** и **ФРУ**), и абсолютные потоки плазменных частиц на границе между ОПЗ плазмы и поверхностью образца. Модуль транспортировки реагента по поверхности учитывает такие эффекты, как затенение, отражение или адсорбция плазменных частиц вблизи образца и на его поверхности.

Локальные расходы плазменных частиц — это входные параметры модуля реакции на поверхности. Этот модуль описывает реакции плазменных частиц с поверхностью, учитывая материал и температуру пластины. Выходными параметрами модуля являются локальные скорости травления или осаждения, которые впоследствии приводят к изменению геометрии поверхности. Геометрия поверхности представляет собой профиль травления, который является окончательным результатом моделирования процесса плазменного травления.

Идеальная модель плазменного травления схематично изображена на рис. 4.1. Индивидуальные модули расположены в центре. Дополнительные или граничные условия, такие как рабочее давление или конструкция реактора, показаны слева. Выходные параметры одного модуля, которые являются входными параметрами для следующего модуля моделирования, расположены тоже в центре и связаны с модулями моделирования стрелками, указывающими направление вычисления. На правой стороне рисунка указаны три основных явления — образование, транспортировка (диффузия, дрейф, адсорбция, отражение, десорбция и затенение) и реакция, которые вносятся и определяются своим модулем моделирования.

Может показаться, что процесс моделирования весьма прост: начиная вычисления сверху, с модуля плазмы с начальными и граничными условиями, и продолжая расчет по направлению стрелок, всегда рассматриваются применимые граничные усло-

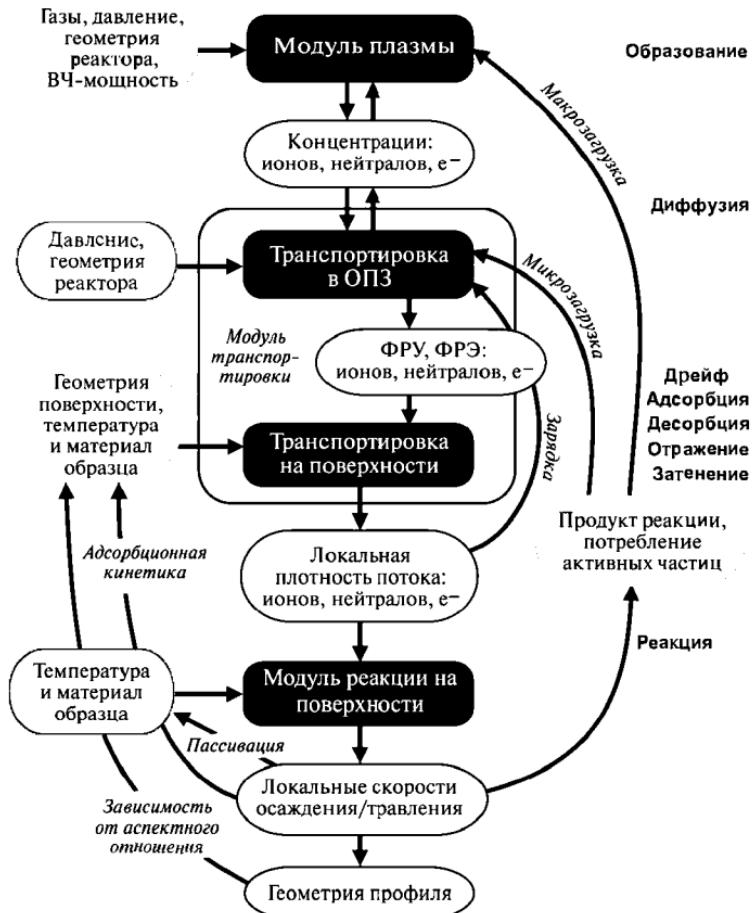


Рис. 4.1. Идеальная модель плазменного травления. Слева изображены внешние параметры, например рабочее давление или температура образца. Внутренние параметры, такие как концентрация частиц или распределение по энергиям, расположены в центре, связывая собой отдельные модули моделирования

вия. Однако в реальности все модули или все физические эффекты и явления, имеющие место, взаимосвязаны и определяются не только входными параметрами.

В действительности, существуют каналы обратной связи, по которым выходные параметры одного модуля влияют на граничные условия предыдущих модулей. Эти каналы обратной связи представлены обратными стрелками на рис. 4.1.

По причине транспортировки заряженных частиц в реакторе и их адсорбции на поверхности пластины, электрический по-

тенциал таких частиц растет и влияет на транспортировку в ОПЗ и, следовательно, на распределение по энергиям и по углам (ФРЭ и ФРУ) плазменных частиц. В частности, локальная зарядка поверхности приводит к искажениям траекторий ионов (эффект зарядки), что стимулирует подтрав под маску.

Транспортировка плазменных частиц к поверхности реактора или пластине определяет потерю в модуле образования плазмы и, таким образом, модуль транспортировки имеет обратную связь с модулем плазмы.

Реакции плазменных частиц на поверхности образца потребляют частицы и производят продукты, которые выделяются (в случае травления) обратно в газовую fazу. Это можно рассматривать как глобальную потерю (реагент) или образование (продукты травления) для модуля плазмы. В модели эти процессы обозначаются эффектом макрозагрузки.

Высокая плотность открытых локальных областей может привести к истощению травителей вблизи области травления на пластине из-за большого их потребления, так как транспортировка реагента из плазмы ограничена. В процессе моделирования этот эффект может быть определен как обратная связь между модулем реакции на поверхности и модулем транспортировки. Его принято называть эффектом микрозагрузки.

Благодаря реакциям осаждения и травления на поверхности пластины, геометрия образца, температура и материал изменяются, что в свою очередь затрагивает модуль транспортировки реагента к поверхности (через адсорбционные свойства, затенение, отражение и т. д.) и непосредственно модуль реакции на поверхности.

В итоге, объединение всех трех модулей, каждый из которых включает комплекс алгоритмов, в единую модель с учетом обратных связей делают такую совершенную (идеальную) модель профиля плазменного травления практически не реализуемой. Применяемая на практике модель показана на рис. 4.2.

Размеры структур на поверхности составляют от десятков до сотых долей микрона и меньше, что существенно меньше размеров камеры (десятки сантиметров), длины свободного пробега (сантиметры и больше), размеров ОПЗ (от единиц до десятка миллиметров) и размеров пластины (100–300 мм). В этом случае можно принять, что все частицы сталкиваются только с поверхностью структуры, а не между собой. Поэтому в дальнейшем нас будет интересовать модуль реакции на поверхности. В таком ва-

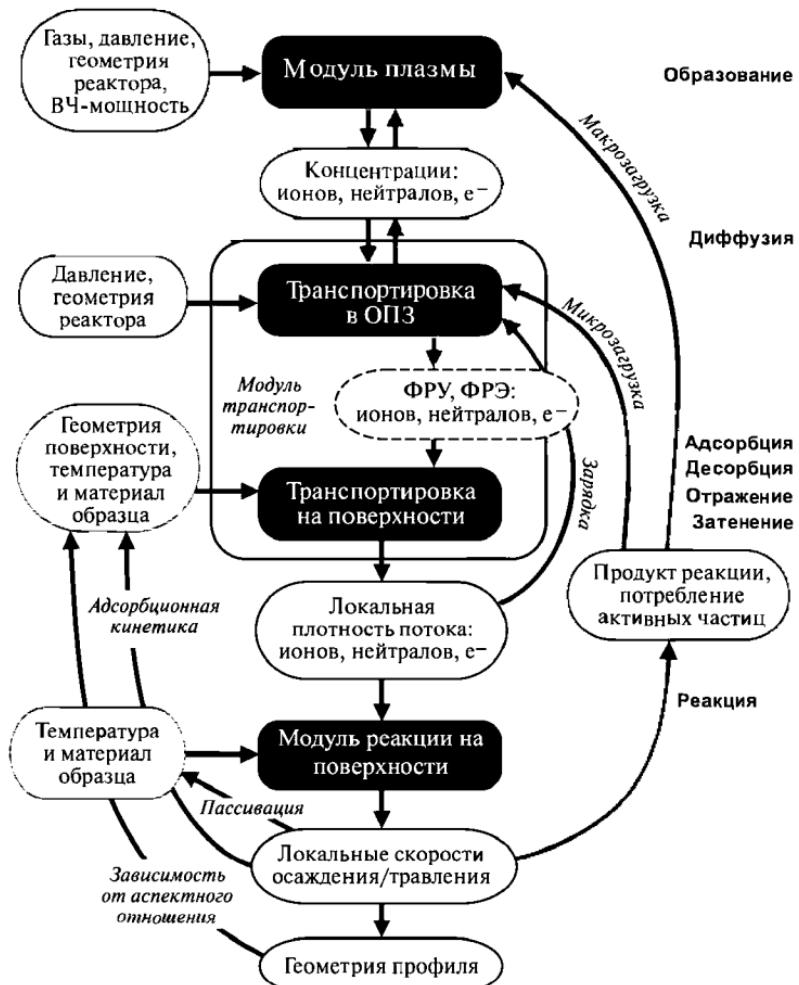


Рис. 4.2. Применяемая модель плазменного травления. Образование плазмы и транспортировка в плазме не учитываются. ФРУ и ФРЭ получаются подгонкой и калибровкой

рианте моделирования профиля травления модуль образования плазмы и модуль транспортировки не учитываются, а функции распределения по углам и энергиям определяются подгонкой.

В моделирование входят две основные задачи: расчет профилей травления узких канавок в кремнии в галогенсодержащей плазме и исследование микронеоднородности плазмохимического травления.

Первая задача связана с созданием активного элемента для щелевых МОП*-транзисторов. Канавки в таких структурах должны удовлетворять достаточно жестким требованиям: они должны иметь гладкие вертикальные боковые стенки, закругленное дно, большое аспектное отношение, и, если привносить, то малую дефектность. Эти требования к процессу травления связаны с последующими этапами обработки структур: окислением внутренней части канавки и заполнением ее поликристаллическим кремнием для формирования вертикального затвора [40].

Вторая задача, как оказалось, связана с первой и заключается в том, что канавки разной ширины, особенно в области размежевов менее микрометра, травятся с разной скоростью.

Опубликовано большое число экспериментальных работ по формированию профилей травления в различных материалах и разрядах, мы же остановимся на наиболее интересных.

4.2. Особенности расчетов профилей при плазмохимическом травлении кремния

Одним из способов исследования эффектов, возникающих при травлении глубоких канавок, становится расчет конкретных профилей на основе физических моделей взаимодействия частиц с поверхностью.

В качестве объекта моделирования обычно выбираются ограниченные или бесконечные в одном направлении канавки, а также круглые отверстия. Такие структуры, во-первых, являются основным элементом многих ИС, и, во-вторых, позволяют исследовать основные особенности эволюции более сложного рельефа при травлении.

В большинстве работ рассматривается двухмерная задача. Это существенное упрощение, которое в ряде случаев не нарушает общности рассмотрения, например, при анализе формирования длинной (по сравнению с шириной) канавки. Рассмотрение же общего трехмерного случая требует больших временных затрат и возможно лишь с применением мощных компьютеров. Наиболее остро эта проблема проявляется при анализе многослойных структур.

На рис. 4.3. представлена обобщенная структура модели формирования профилей, которая своей частью или полностью включает в себя существующие в литературе модели. Рассмотрим каждую из частей модели.

■ МОП — металл—оксид—полупроводник.



Рис. 4.3. Схема модели формирования профилей травления [41]

4.2.1. Физико-химические основы модели

Для нахождения локальной скорости травления необходимо определить набор частиц, участвующих в процессе, величины их потоков и механизмы взаимодействия с поверхностью травимого материала. Основные процессы на поверхности кремния можно описать, учитывая три вида частиц: 1) ионы; 2) химически активные радикалы, молекулы и атомы; 3) пассивирующие радикалы, молекулы, полимеры.

1. Ионы, разгоняясь в электрическом поле темного пространства разряда, бомбардируют поверхность. В зависимости от средней энергии ионы могут физически распылять поверхность, химически взаимодействовать с кремнием, стимулировать химические реакции на поверхности и десорбировать частицы с поверхности. В первом случае процесс характеризуется коэффициентом распыления, который зависит от угла падения, и имеет характерный максимум в области углов 60° (см., например, [4]). В двух других случаях процесс характеризуется коэффициентами Y_{Si} и $Y_{e,p}$ — средним числом выбитых с поверхности атомов кремния и средним числом десорбированных с поверхности частиц на один ион [48]. Входными параметрами моделирования влияния ионной компоненты на процесс травления являются функции распределения по углам и по энергиям (ФРУ и ФРЭ). Коэффициенты Y_{Si} и $Y_{e,p}$ в общем случае неизвестны и являются параметрами задачи. ФРУ либо рассчитывается методом Монте-Карло [47, 48, 60–63], либо выбирается гауссовой [64, 65], либо равновероятностной [48].

2. Электрически нейтральные химически активные частицы, например радикалы, считаются равномерно распределенными по углам с максвелловским распределением по энергиям. Эти частицы, адсорбируясь на поверхности, могут взаимодействовать с подложкой как спонтанно, так и под действием ионной бомбардировки. В первом случае вводят изотропную составляющую скорости травления. Во втором — скорость считают пропорциональной потоку ионов, степени заполнения поверхности активными частицами и вероятности прилипания иона к поверхности.

3. Пассивирующие частицы не вступают в химическую реакцию с материалом подложки и занимают адсорбционный центр. Под действием потока ионов эти частицы могут быть десорбированы с освобождением этого центра. ФРУ и ФРЭ пассивирующих частиц в газовой фазе считаются такими же, как для

активных частиц. Кроме того, пассивирующие частицы могут образовываться непосредственно на поверхности под действием ионов. Например, полимеры $(CF_2)_n$ в плазме $CBrF_3$, CF_4 .

Вероятность взаимодействия частиц с поверхностью.

Наиболее исследованным является механизм взаимодействия высокозэнергетических ионов с поверхностью — процесс физического распыления [4]. Однако в плазменных процессах характерные энергии частиц существенно ниже, чем при физическом распылении. В работе [48] было использовано полуэмпирическое соотношение для вероятности отражения частиц [66]:

$$F(\theta) = b(1 - \cos \theta)^\beta, \quad (4.1)$$

где θ — угол падения частицы на поверхность, а параметры b и β меняются в следующих пределах — $0,2 < b < 0,6$; $1,0 < \beta < 2,6$. Кроме того, отражение частицы от поверхности может быть зеркальным, диффузным или смешанным. При моделировании вводится коэффициент диффузности s в смешанном зеркально-диффузном отражении, который меняется от 0 до 1 [48].

Взаимодействие с поверхностью низкоэнергетических частиц (ионов и нейтральных) описывается с помощью коэффициента прилипания α , который зависит как от вида падающей частицы, так и от состава и состояния поверхности. В простейшем случае α прямо пропорционально отношению масс падающей частицы и частицы мишени. Увеличение средней энергии частиц (при уменьшении давления) приводит, во-первых, к зависимости α от угла падения, и, во-вторых, к увеличению вероятности отражения.

Диффузия по поверхности. Доставка радикалов к травяящейся поверхности может осуществляться за счет диффузии по поверхности [67]. При температуре ниже температуры десорбции радикалы на поверхности могут обладать большой подвижностью. Если диффузионная длина велика, то они могут перераспределяться по поверхности, влияя на скорость реакции в различных ее точках [43, 68].

Основой подхода является уравнение диффузии, описывающее концентрацию радикалов C вдоль двухмерной травящейся поверхности:

$$-D\nabla_s^2 C + kC = \alpha N(A), \quad (4.2)$$

где D — коэффициент диффузии радикалов по поверхности; ∇_s^2 — поверхностный Лапласиан; k — частота реакций; α — коэффициент прилипания радикалов; $N(A)$ — поток радикалов в точку A .

Коэффициент диффузии находится из уравнения

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_d}{k_B T}\right), \quad (4.3)$$

где $D_0 = n l^2 v$, с расстоянием между адсорбционными центрами l , частотой колебаний адсорбируемой частицы v и числом ближайших адсорбционных центров n ; E_d — потенциальный барьер для диффузии на поверхности и $k_B T$ — тепловая энергия адсорбируемой частицы [69].

Источник радикалов на поверхности, поступающих из плазмы, дается членом $\alpha N(A)$ — см. (4.2). Предполагается, что общий поток радикалов в любой точке поверхности A достигает квазистационарного значения за время много меньшее времени травления или существенного изменения профиля. В отсутствие отражения от поверхности $\alpha = 1$. Для случая травления канавок уравнение (4.2) сводится к одномерному

$$-D \frac{d^2 C}{ds^2} + k C \zeta(s) = N(s), \quad (4.4)$$

где s — координата вдоль профиля; $\zeta(s)$ — обобщенная функция, которая равна нулю, когда s соответствует точкам на маске, и равна единице, когда s соответствует точкам на травящейся поверхности. Введение функции учитывает тот факт, что маска не травится радикалами, но предполагает одинаковым коэффициент диффузии на маске и на подложке.

Диффузия адсорбируемых частиц по поверхности является существенным механизмом их транспортировки в плазменном травлении. Однако, чтобы описать транспортировку потока частиц к основанию канавки следует учитывать и другие механизмы.

4.2.2. Математические основы модели

4.2.2.1. Способы описания временной эволюции профиля

Продвижение фронта травления представляет собой в основном геометрическую задачу. Выбор способа описания эволюции определяет точность аппроксимации профиля и затраты машинного времени. Для моделирования используются три основных способа и их модификации: 1) метод струны; 2) метод характеристик; 3) метод ячеек. Рассмотрим каждый из этих способов.

Метод струны. Метод струны для расчета эволюции профиля многослойной структуры впервые был упомянут в работах [70, 71]. В методе струны поверхность профиля разделена на узлы, которые связаны линейными отрезками. Начальное расстояние между узлами l (размер сегмента) задается одинаковым, что определяет пространственную разрешающую способность метода. Время травления делится на малые конечные приращения или интервалы dt . Скорость движения поверхности является скоростью травления V , и движение поверхности происходит каждый интервал времени с образованием продукта Vdt . Узлы рассматриваются как объекты, которые хранят информацию о своем положении на поверхности материала (кремний или маска из фоторезиста) и о свойствах материала. В процессе эволюции узлы передвигаются со скоростями, определяемыми локальными переменными. По мере эволюции профиля происходит добавление точек (если длина сегмента превышает максимальную $l + dl$), либо их исключение (если длина сегмента становится меньше минимального значения $l - dl$) для поддержания точности вычислений. Модели, использующие метод струны, отличаются лишь способом вычисления этих скоростей. На рис. 4.4, *a* изображена схема метода струны для характерного участка рельефа.



Рис. 4.4. Метод струны (*а*) и образование петли (*б*). Узел движется вдоль вектора, направленного по биссектрисе угла, образованного соседними линейными сегментами. Если расстояние между двумя узлами больше максимального размера сектора, то добавляется новый узел (*а*). Если какие-нибудь два узла находятся ближе друг другу чем минимальный размер сектора, то они объединяются в один, таким образом избегая образования петли. Избыточные узлы отбрасываются (*б*)

В примере изотропного травления вектор перемещения направлен по биссектрисе угла, образованного соседними сегментами. Величина этого перемещения вычисляется для виртуальной плоскости, перпендикулярной этому вектору. Видно, что этот метод неадекватно описывает перемещение неплоской поверхности, как показано в данном примере — на выступающих углах могут образовываться петли (рис. 4.4, б). Для избежания вышеупомянутых трудностей через некоторые отрезки времени необходимо проводить сглаживание профиля травления.

Алгоритм вычисления вектора перемещения дан на рис. 4.5. Рис. 4.5, а иллюстрирует случай вогнутого, рис. 4.5, б — выступающего угла. Алгоритм одинаков для обоих случаев. Проводим биссектрису угла ABC и биссектрисы соседних углов DAB и BCF. Точки B, A, C (точки вычисления) движутся с локальными скоростями вдоль соответствующих биссектрис. Получаем точки новой поверхности A' , B' , C' , которые соединяем отрезками. Если длина отрезка превышает максимальную, то добавляем новую точку (см. рис. 4.5, а), если длина отрезка меньше минимального, то исключаем (см. рис. 4.5, б).

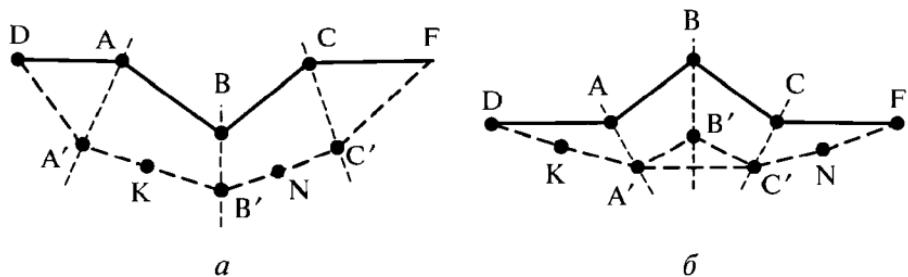


Рис. 4.5. Эволюция профиля методом струны для участка поверхности с вогнутым (а) и выступающим углом (б). Точки К и N — добавочные, точка B' исключается

Метод струны устойчив в том случае, если движение поверхности в пределах одного интервала времени меньше чем расстояние между узлами [69]. Поэтому приращение времени dt должно быть подобрано так, чтобы движение профиля со скоростью травления за промежуток времени было меньше, чем начальный размер сегмента. В программе можно задать любое приращение dt , но чем меньше этот интервал времени, тем больше время выполнения программы.

Метод характеристик. Эволюция границы раздела двух фаз, хорошо известная из термодинамики, может быть применена для описания развития профиля травления в плазме. В работах [43, 72] подробно изложен этот метод, состоящий в следующем. Пусть $F(x, t) = 0$ определяет профиль травления в момент времени t , тогда в момент $t + \Delta t$ он определяется уравнением

$$F(x + v(n)\Delta t, t + \Delta t) = 0, \quad (4.5)$$

где v — скорость движения границы, а n — единичный вектор нормали к поверхности. Уравнение (4.5) совместно с $n = \nabla F / |\nabla F|$ дает уравнение эволюции профиля

$$vn = -\frac{1}{|\nabla F|} \frac{\partial F}{\partial t}, \quad (4.6)$$

где $vn = V$ — скорость травления. Вводя вектор эффективного потока

$$vn = Gn, \quad (4.7)$$

получаем уравнение эволюции профиля

$$\frac{\partial F}{\partial t} + G \nabla F = 0. \quad (4.8)$$

В случае бесконечного в одном направлении профиля можно рассмотреть двухмерное поперечное сечение. Тогда, определяя $F(z, y, t) = z - \eta(y, t)$, получаем

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + G_y \frac{\partial \eta}{\partial y} = G_z, \quad (4.9)$$

где $z = \eta(y, t)$ определяет границу раздела в координатной системе, показанной на рис. 4.5; G_y и G_z — соответственно y - и z -координаты вектора G . Уравнение (4.9) методом характеристик может быть сведено к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy}{dt} = G_y(\eta, y); \quad (4.10)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = G_z(\eta, y). \quad (4.11)$$

Эти уравнения описывают кривую в плоскости (y, z) , параметризованной временем t . Вектор эффективного потока G выбирается в зависимости от принимаемой модели травления. Так, для случая коэффициента прилипания равного единице, в работах [43, 72] он выбирался в виде

$$Gn = k_i(En) + k_r(jn), \quad (4.12)$$

где En и jn — соответственно поток ионов и поток радикалов, падающих на поверхность с нормалью n ; коэффициенты k_i и k_r — удельный объем, удаляемый ионами и радикалами. Вычисление векторов E и j включает векторное суммирование с направлений, которые имеют непосредственный доступ к поверхности травления, то есть с незатененных участков.

Метод характеристик описывает эволюцию точного профиля, в то время как метод струны оперирует с продвижением изначально линейно-приближенного профиля. Последнее приводит к большим ошибкам при быстром изменении травящейся поверхности, например, когда появляются нарушения непрерывности профиля травления (разрывы в наклоне) поверхности. В методе характеристик такая проблема исключена, так как траектории не движутся вдоль нормали к поверхности, и первоначальное уравнение в частных производных точно сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Таким образом, преимущество метода характеристик в том, что точки, движущиеся вдоль траекторий, всегда лежат на травящейся границе раздела с той точностью, с которой решаются исходные уравнения.

Метод ячеек. Третьим основным методом эволюции профилей при моделировании является метод ячеек [45]. В противоположность обоим рассмотренным выше методам весь объем подложки, подлежащий моделированию, разбивается на матрицу малых ячеек (рис. 4.6).

Каждая ячейка представлена счетчиком, который уменьшает свое значение в соответствии со временем, скоростью травления и свободной поверхностью. Если значение счетчика достигает нуля, ячейка удаляется. При рассмотрении структур малых размеров ячейки достигают размеров одного порядка с элементарной ячейкой кристалла, комплексом молекул и даже с атомом поверхности. Таким образом, удаление ячеек не требует описания с помощью макроскопических скоростей и можно моделировать элементарные процессы на поверхности.

Обычно подложка рассматривается состоящей из ряда ячеек. Свойства каждой ячейки определяются набором характеристик (ее содержимым): видом атома или молекулы, их соседями и состоянием поверхности (она может быть гладкой, шероховатой или заряженной). Можно рассматривать упрощенную модель, в которой массив атомов подложки бомбардируется низкоэнергетическими реактивными частицами. Эти частицы адсорбиру-

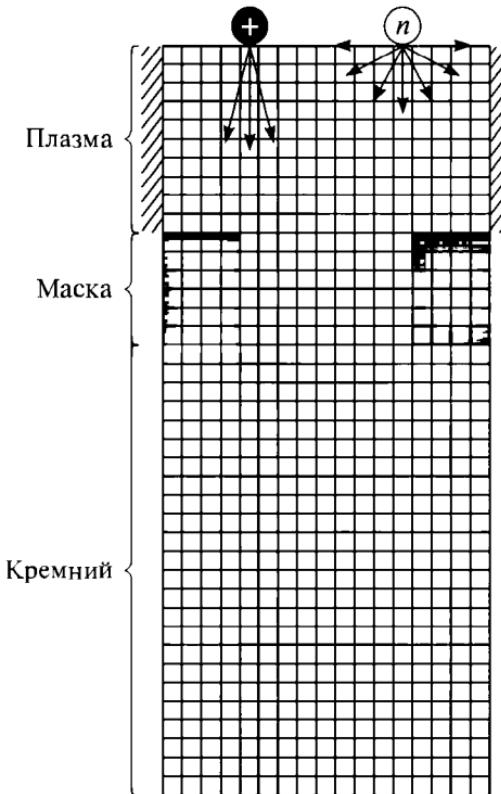


Рис. 4.6. Схема разбиения поверхности на ячейки. Ячейки разного цвета принадлежат разным материалам. Движение радикалов (n) изотропно

ются на поверхности, образуя некоторые продукты реакции, состоящие из поверхностного атома и адсорбированной частицы. Энергия связи такого модифицированного атома подложки уменьшается. На следующей стадии высокоэнергетичная частица может попасть в эту модифицированную поверхностную область и удалить ее.

В целях программной реализации эта модель еще более упрощается без ограничения общности. Матрица поверхностных атомов заменяется массивом ячеек, содержащих целые числа N . Изменение состояния ячейки за счет адсорбированной частицы или уменьшения энергии связи отмечается различными числами в соответствующем месте массива. Удаление ячейки отмечается обнулением ее содержимого. Добавление ячейки происходит, если количество атомов в ячейке становится $2N$.

Для уменьшения количества недостатков вышеописанных методов, существуют варианты их объединения. Например, в работе [73] авторы использовали клеточно-струнный алгоритм формирования профиля канавки, который базируется на решении множества дискретных двумерных задач. В случае удаления клетки всегда возникает вопрос целостности поверхности при сохранении достаточной для расчетов производительности. В любой момент времени должна быть известна цепочка смежных поверхностных клеток, составляющих поверхностный реакционный слой модели. Данная цепочка используется для расчета места попадания и угла падения частиц плазмы на поверхность профиля, а также для быстрой локальной модификации геометрии профиля при добавлении и удалении клеток. Поверхностная цепочка клеток аппроксимируется линией (струной), по которой определяется точка пересечения профиля с траекторией падающей частицы.

В простом струнном методе на неровных участках профиля канавки возникают трудноустранимые запутанные петли, что является существенным недостатком метода. Клеточно-струнный метод лишен данного недостатка. Как и в случае образования выступающих клеток, так и в случае образования наклонных стенок (45°) струна идет по линии, соединяющей середины боковых сторон клеток. Струна позволяет уменьшить погрешность неровности поверхности при использовании клеточного метода, при этом обеспечивается оптимальное соотношение качества и скорости расчетов. Построение струны по линии соединяющей только центры клеток приводит к излишним вычислительным сложностям, неправильному распределению локальных потоков частиц плазмы на поверхности профиля и, как следствие, ошибкам в оценке профиля канавки.

4.2.2.2. Методы расчета потоков частиц

Метод Монте-Карло. В реальных процессах травящаяся поверхность бомбардируется различными частицами — ионами, молекулами, радикалами и атомами. Каждая из этих частиц приводит к специфическим поверхностным реакциям в зависимости от ее вида, энергии и состояния поверхности в месте соударения. Для учета различных частиц, бомбардирующих поверхность с различными углами падения и различными энергиями используется метод Монте-Карло. Генератор случайных чисел определяет вид частицы, ее энергию и угол падения, а также место падения на поверхность.

Сущность метода Монте-Карло состоит в следующем: требуется найти значение a некоторой изучаемой величины. Для этого выбирают случайную величину X с математическим ожиданием, равным a : $M(X) = a$.

Практически же поступают так: производят n испытаний, в результате которых получают n возможных значений X ; вычисляют их среднее арифметическое $\bar{x} = \sum x_i/n$ и принимают \bar{x} в качестве оценки (приближенного значения) a^* искомого числа a : $a \approx a^* = \bar{x}$.

Поскольку метод Монте-Карло требует проведения большого числа испытаний, его часто называют методом статистических испытаний. Теория этого метода указывает, каким образом следует выбирать случайную величину X и находить ее возможные значения. В частности, разрабатываются способы уменьшения дисперсии используемых для расчета случайных величин, в результате чего уменьшается ошибка, допускаемая при замене искомого математического ожидания a его оценкой a^* .

Этот метод использовался в большом числе работ [47, 48, 51, 60–63, 74, 75], однако при описании большого числа видов частиц он требует применения мощных компьютеров с большой памятью и больших затрат машинного времени. По этой причине для расчета потоков низкоэнергетичных нейтральных частиц применяются другие более экономичные методы.

Метод интегральных уравнений. Впервые метод интегральных уравнений для задач травления был предложен в работах [49, 50, 76, 77] и развит в [48, 51, 74, 75] для случая многокомпонентной плазмы. Суть метода состоит в следующем. Поток частиц $N(A)$ на поверхность рельефа в точке A складывается из потока газовой фазы, где частицы считаются равномерно распределенными по углам, и из потока отраженных от рельефа частиц. В результате для $N(A)$ справедливо [48]:

$$N_i(A) = N_{i0}(A) + \int_{\mathfrak{R}} L(A, A') N_i(A') dA', \quad (4.13)$$

где i — вид частицы; $N_{i0}(A)$ — поток из газовой фазы; $L(A, A')$ — ядро интегрального уравнения, зависящее от закона рассеяния частиц поверхностью; \mathfrak{R} — поверхность профиля. Приведенная система уравнений (4.12) для различных видов частиц предполагает известным поток ионов. Который обычно рассчитывается по методу Монте-Карло. Описанная схема позволяет отказаться от расчета потоков нейтральных частиц по методу Монте-Карло,

что существенно уменьшает время вычислений, особенно в случае рассмотрения нескольких видов частиц, например, как в работе [75] — активных и пассивирующих радикалов.

4.2.3. Структурные эффекты

Геометрическое затенение и отражение от поверхности. Поток частиц из плазмы на открытую поверхность попадает беспрепятственно. Поток частиц в точку A рассчитывается как интеграл от функции распределения по углам (ФРУ). В случае ионов интеграл берется в интервале $[-\phi, \phi]$, где ϕ — угол расходимости ионов, в случае радикалов — в интервале $[-90^\circ, 90^\circ]$.

Поток частиц на дно канавки затруднен из-за затенения. Интеграл от ФРУ рассчитывается для видимой области, которая намного меньше на дне, чем наверху канавки. Но отражение ионов от боковых стен способствует их достижению дна канавки в отсутствии прямой видимости дна. Таким образом, отражение ионов увеличивает поток ионов на дно. Однако, если поверхность боковой стенки шероховатая, эффект отражения ионов можно не учитывать, например в случае Bosch-процесса.

Для ионов преимущественно используется зеркальное отражение, чего нельзя сказать о радикалах. Радикал, попадая на боковую поверхность может как адсорбироваться на ней, так и отразится от нее в неизвестном направлении. Поэтому при описании радикалов применяют диффузионное отражение, подчиняющееся косинусному закону распределения по углам.

Учет вклада отраженных от поверхности частиц может быть проведен суммированием потоков частиц однократно, дважды, трижды и т. д. отраженных от внутренней поверхности структуры, в результате чего получается нелинейное интегральное уравнение для полного потока (4.13). Важен выбор правильного выражения его ядра $L(A, A')$, зависящего от энергии частиц, и механизма рассеяния частиц поверхностью.

Переосаждение продуктов реакции. Наличие продуктов реакции может уменьшать скорость травления. Существует по крайней мере два механизма такого уменьшения: (1) избыточное давление продуктов реакции, препятствующее доставке реагентов к поверхности, и (2) переосаждение на внутреннюю поверхность рельефа. Первый случай был проанализирован в работах [48, 78], где выявлено, что даже при больших скоростях травления (порядка 1 мкм/мин) давление увеличивается на величину на несколько порядков меньшую, чем та, которая смогла бы пре-

пятствовать доставке реагентов. Таким образом, данным механизмом для используемых в технологии разрядов можно пренебречь. Переосаждение продуктов реакции было рассмотрено в работах [48, 51], где показано, что этот эффект пренебрежимо мал для коэффициентов прилипания частиц $\alpha \leq 0,1$.

Для расчета потоков частиц применялся метод интегральных уравнений. В работе [79] было высказано замечание относительно правомерности использования в статье [51] косинусного закона рассеяния частиц от поверхности. Это замечание справедливо в большей мере для механизма рассеяния энергетических ионов. Что же касается транспорта нейтральных продуктов реакции, имеющих тепловые энергии, этот закон применим. Однако на пути правильного количественного моделирования переосаждения продуктов реакции остается много неясностей.

Эффекты зарядки маски. Из-за различия в температуре и подвижности электронов и ионов угловые распределения ионов и электронов отличаются. Поэтому, маска в большей степени подвергается воздействию электронов, в то время как основание канавки — воздействию ионов. Это приводит к тому, что маска заряжается отрицательно, в то время как глубоко расположенные поверхности профиля становятся положительными.

В работе [52] теоретически исследована частотная зависимость зарядки маски с учетом ее поверхностной и объемной проводимости. Было показано, что при отсутствии постоянной составляющей тока для высокочастотного разряда степень зарядки маски слабо влияет на движение ионов. Зарядка маски становится существенной, когда появляется постоянная составляющая тока на маску, например, приложении постоянного смещения или в низкочастотном разряде.

Для маски из проводящего материала зарядкой можно пренебречь, как и в случае высокочастотного разряда. Как отмечено в статье [79], полевые эффекты несущественны для отверстий размером меньше 100 мкм, тем более для канавок с микрометровыми размерами. Однако дифференциальная зарядка возможна в изолирующих структурах за счет различного углового распределения ионов и электронов: распределение ионов сильно анизотропно, в то время как электроны распределены более изотропно.

В работе [53] независимо исследована эта проблема при следующих упрощающих предположениях. Во-первых, исключена из рассмотрения поверхностная проводимость, которая может

уменьшать потенциал поверхности; во-вторых, распределение электронов считается изотропным; в-третьих, ионный поток выбирается не расходящимся. Микроструктура заряжается дифференциально так, что обеспечивается баланс электронного и ионного токов в стационарном состоянии; постоянная составляющая тока при этом равна нулю. Поскольку в начальный момент на боковую стенку попадает больше электронов, чем ионов, они заряжаются отрицательно по отношению к дну структуры. Результирующий потенциал пропорционален электронной температуре, так как он должен отталкивать электроны и втягивать их на дно канавки. Отклоняющий потенциал, приблизительно равный $3k_B T_e$ для структур с малым аспектным отношением, резко увеличивается с ростом этого отношения, причем величина этого потенциала в канавках с высоким аспектным отношением может составлять большую долю энергии ионов [53]. Этот механизм должен давать вклад в апертурный эффект, формирование закругления боковых стенок (bowing) и углублений вблизи краев дна канавки (trenching).

В статье [80] проведен модельный расчет полей в бесконечной канавке путем решения уравнения Пуассона. Для оценки движения иона в круглом отверстии использовано известное решение электростатической задачи для бесконечной проводящей плоскости с круглым отверстием радиусом a и находящейся в однородном поле, перпендикулярном этой плоскости:

$$\Phi(r, 0) = E \sqrt{(a^2 - r^2)} / \pi, \quad (4.14)$$

где Φ — распределение плотности ионов по радиусу r ; E — напряженность электрического поля.

Для обоснования оценок с помощью ячейки Фарадея были проведены эксперименты по измерению тока в макроскопическом круглом отверстии как функции от глубины. Обнаружено, что уже на глубине, равной диаметру отверстия, 75% ионов могут быть отклонены на боковые стенки и не достигать дна отверстия. Поскольку в опытах использовался диапазон низких давлений (0,1–1,0 Па), в котором рассеяние ионов в области ОПЗ практически отсутствует, то авторы сделали вывод о том, что при низких давлениях апертурный эффект обусловлен искаожением поля вблизи отверстия. Однако проведенный анализ можно рассматривать лишь как оценочный.

Попытка аналитического расчета зарядовых эффектов была предпринята в работе [54]. В ней рассмотрено влияние топологи-

ческого изображения на заряд, движущийся внутри канавки, и показано, что эффект может лимитировать процесс контролируемого формирования профиля. Область существенного проявления эффекта — канавки с шириной менее 0,25 мкм.

Температурный фактор. Температура образца — один из наиболее важных параметров в эволюции профиля травления. Например, увеличение температуры пластины приводит к тому, что профиль при реактивно-ионном травлении изменяется с анизотропного на изотропный. Поэтому очень важно сохранять температуру подложки постоянной. Это достигается благодаря подложкодержателю, температура которого может регулироваться в диапазоне от -160°C до $+180^{\circ}\text{C}$. Пластина удерживается при помощи механического или электростатического прижима. Отвод тепла или термический контакт осуществляется гелиевым охлаждением, когда гелий вводится между пластиной и подложкодержателем.

В работе [55] впервые было сообщено о низкотемпературном ($-130 \div -100^{\circ}\text{C}$) травлении канавок в кремнии в плазмах SF_6 , CF_4 , CBrF_3 . Основной идеей такого травления было подавление спонтанных реакций на боковых стенках, что естественно скрывалось на резком уменьшении боковой скорости травления. Вертикальная же составляющая скорости травления при этом остается практически неизменной, поскольку травление дна канавки происходит под действием ионной бомбардировки.

Для объяснения этих результатов в работах [56, 81] была предложена модель низкотемпературного травления в плазме SF_6 . Предполагается, что время жизни частиц, взаимодействующих с поверхностью, подчиняется зависимости Аррениуса:

$$\tau = \tau_0 \exp[E_d/(k_B T)], \quad (4.15)$$

где τ_0 — предэкспоненциальный фактор; E_d — энергия активации ассоциативной десорбции; k_B — константа Больцмана; T — температура. Падение температуры приводит к росту времени τ и, соответственно, к уменьшению скорости травления. Кроме того, в модели учитывалась и диффузия по поверхности $D = D_0 \exp[-E/(k_B T)]$. По оценкам этих работ $E_d = 0,43$ эВ, $E = 0,12$ эВ, так что диффузационная длина велика и при низких температурах.

Как было отмечено в ответе авторов работы [55] на заметку [56], предположение о диффузии является излишним в объяснении низкотемпературного травления, поскольку увеличение вре-

мени жизни (4.15) уменьшает вероятность ассоциативных реакций. В последней работе тех же авторов [82] более подробно исследованы особенности низкотемпературного травления кремния в плазмах SF_6 , NF_3 , CF_4 , где было показано, что основным механизмом вертикального травления при низких температурах является ионно-стимулированное возбуждение химических реакций.

Апертурный эффект. Термин «апертурный эффект» (АЭ) описывает общее наблюдение, что канавки и отверстия меньшего размера травятся медленнее, чем подобные структуры большего размера [83]. Раньше считалось, что этот эффект зависит от абсолютных размеров структуры пока эти размеры были порядка 1 мкм. Однако дальнейшие исследования выявили, что скорости травления не согласуются с масштабированием абсолютного размера, а зависят от аспектного отношения (глубина/ширина).

На момент начала наших исследований был известен только сам факт такой зависимости, но за последние 20 лет сложилось относительно полное понимание механизмов, ответственных за АЭ. К ним относятся:

- 1) кнудсеновский транспорт нейтральных частиц [11];
- 2) затенение ионов [72];
- 3) затенение нейтральных частиц [84];
- 4) дифференциальная зарядка структур с диэлектриком [53, 85];
- 5) локальные поля вблизи проводящей топографии [52, 80, 85];
- 6) поверхностная диффузия [86];
- 7) объемная диффузия;
- 8) топология [54].

Частично эти механизмы были рассмотрены в предыдущем разделе. Здесь лишь отметим, что даже из размерного анализа первые четыре механизма согласуются с масштабированием с аспектным отношением. Следующие три механизма предсказывают, что в структурах с одинаковым аспектным отношением АЭ должен усиливаться с ростом абсолютного размера, но это не согласуется с наблюдаемым масштабированием [87]. Кроме того, объемная диффузия не играет большой роли в травлении субмикронных структур из-за большой длины свободного пробега частиц по сравнению с размерами структур. Механизм отталкивания, обусловленный топологией, предсказывает усиление АЭ с уменьшением размера структуры, однако это возникает только в области размеров менее 0,25 мкм [54].

Обратный апертурный эффект. Скорость осаждения в структурах с большим аспектным отношением ниже, чем в структурах с меньшим аспектным отношением [88, 89]. Используя это, можно частично избавиться от АЭ и даже получить так называемый обратный апертурный эффект. Если в качестве осаждаемых частиц выступают нейтральные радикалы из плазмы, которые пассивируют поверхность, то соотношением потоков активных и пассивирующих частиц можно добиться того, что структуры с меньшим аспектным отношением будут травиться медленнее, чем с большим аспектным отношением.

Так, в обзоре [79] приведены данные по травлению окон в SiO_2 в плазме $\text{CHF}_3/\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{O}_2/\text{He}$. Большие концентрации CHF_3 приводили к большей селективности по отношению к поликристаллическому кремнию. В зависимости от селективности появлялся как АЭ, так и обратный АЭ, что объясняется конкуренцией между осаждением и травлением, так как селективность травления определяется отношением скоростей осаждения полимера и травления поликристаллического кремния и SiO_2 . Кроме того, авторы отметили, что профили травления коррелируют с селективностью травления и давлением. Это показывает тесную взаимосвязь между апертурным эффектом и формой профиля. Помимо регулирования осаждением полимера на скорость травления можно влиять варьированием температуры подложки, стремясь понизить вероятность протекания реакций с поверхностью и уменьшить апертурный эффект [84]. Однако, как отмечают авторы, трудно предполагать, что только изменение температуры поверхности может привести к полному устранению апертурного эффекта или появлению обратного апертурного эффекта, если не происходит осаждения нейтральных частиц из плазмы.

4.3. Математическая модель

4.3.1. Основные частицы и процессы

Принято считать, что в процессе травления участвуют три вида частиц: положительные ионы (I^+), нейтральные химически активные радикалы (R_e) и нейтральные пассивирующие радикалы (R_p). Основные процессы взаимодействия этих частиц с травящейся поверхностью представлены в табл. 4.1.

Адсорбция. Для описания этого типа взаимодействия был использован постоянный коэффициент прилипания частиц ($\gamma_{e,p}$) к поверхности, что означает рассмотрение только реакций первого порядка.

Десорбция и травление. Все коэффициенты Y являются безразмерными и для ионно-стимулированных процессов равны среднему числу удаляемых частиц соответствующего вида на один падающий ион, для спонтанных же процессов — на один радикал.

Диффузия по поверхности. Поверхностная диффузия может существенно влиять на форму профиля, если эффективная длина поверхностной диффузии сравнима с характерными размерами структуры. В большинстве моделей эта длина является параметром, поскольку для большинства реально используемых систем плазма/твердое тело она либо неизвестна, либо достаточно велика (десятки мкм) по сравнению с субмикронными размерами структур СБИС.

Отражение от поверхности. Отражение нейтральных частиц и ионов от поверхности зависит как от структуры поверхности, так и от степени ее покрытия маской. В описываемой модели использовано три типа диаграмм рассеяния: зеркальное, диффузное (косинусное), упругое диффузное, или изотропное (рис. 4.7). Зеркальное отражение впервые было предложено Максвеллом и удовлетворяет условию термодинамического равновесия. В этом случае угол падения частицы равен углу отражения. Этот вид отражения часто наблюдается при взаимодействии ионов с поверхностью [66]. Диффузное (или косинусное) отражение возникает при сильном взаимодействии частицы с поверхностью, когда частица полностью теряет информацию об угле падения. Вероятность вылета частицы пропорциональна косинусу этого угла. Этот вид рассеяния также введен Максвеллом и подчиняется условию термодинамического равновесия. Третий тип рассеяния — изотропное. В этом случае частица имеет равную вероятность вылета под любым углом к поверхности. Этот тип рассеяния не является термодинамически равновесным и может рассматриваться как разма-

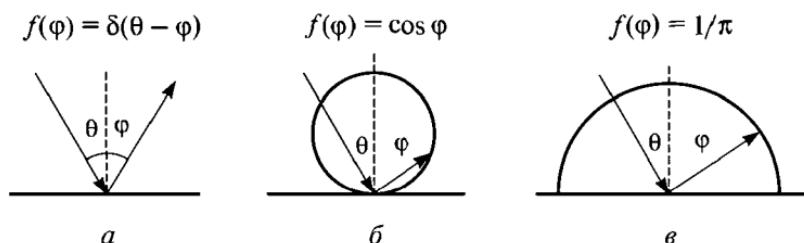


Рис. 4.7. Диаграммы плотности вероятности рассеяния частиц поверхностью, используемые в модели травления (θ — угол падения, φ — угол отражения): *а* — зеркальное, $\varphi = \theta$; *б* — диффузное, или косинусное; *в* — изотропное, или упругое диффузное рассеяние

занное косинусное отражение с усиленной компонентой при больших углах рассеяния.

В описываемой модели использован косинусный закон рассеяния для нейтральных частиц и зеркальный или смешанный диффузно-зеркальный механизм отражения для ионов.

Химически активные радикалы могут адсорбироваться на поверхности, десорбироваться и химически взаимодействовать с материалом подложки как спонтанно, так и под действием ионов. Ионы считаются химически нейтральными и за счет своей энергии либо инициируют реакцию травления, либо десорбируют частицы. Пассивирующие радикалы играют роль пассиватора поверхности, то есть не вступают в химические реакции с подложкой, но могут занимать адсорбционные состояния на поверхности и быть десорбированными.

Из-за наличия градиентов плотности прилипших частиц вдоль профиля возможна диффузия по поверхности прилипших радикалов. Кроме того, частицы, падающие на поверхность, могут отразиться от этой поверхности. Отражение нейтральных частиц, как показано в работах [66, 90, 91], при комнатных температурах может подчиняться как косинусному закону Кнудсена, так и быть изо-

Таблица 4.1

Основные процессы взаимодействия частиц с травящейся поверхностью, рассматриваемые в модели, и соответствующие им коэффициенты

Процессы	Активные радикалы	Пассивирующие радикалы	Ионы
Адсорбция	γ_e	γ_p	α
Десорбция			
образование молекулы под действием ионов	$K_R \sigma_{Si}$	$\beta \sigma_{Si}$	—
	Y_e	Y_p	—
Травление			
химическое	θ_e	θ_p	—
под действием ионов	Y_{Si}	—	Y_{Si}
Диффузия по поверхности	D_e	D_p	—
Отражение от поверхности			
зеркальное	—	—	+
диффузное (косинусное)	+	+	+
изотропное (упругое диффузное)	+	+	—
зеркально-диффузное	—	—	+

тропным (см. рис. 4.7). Рассеяние ионов описывается смешанным зеркально-диффузным законом отражения [66], причем в широком интервале энергий и материалов вероятность отражения описывается полуэмпирическим соотношением (4.1).

4.3.2. Описание модели

Множество способов расчета эволюции профиля травления основано на так называемой однослоиной модели прилипания частиц Ленгмюра. Изначально она предполагает рассмотрение решеточного газа, то есть поверхность считается состоящей из поверхностных состояний, каждое из которых может быть либо свободным, либо занятым. При этом прилипание частиц к занятым центрам не происходит. В таком случае полный (эффективный) коэффициент прилипания $s(\theta)$ линейно зависит от степени заполнения поверхности θ . Однако такая модель справедлива для простых частиц (например, для атомов F), если же частица более сложная по структуре (радикал или молекула), то необходимо учитывать физическую адсорбцию (или предхемосорбцию). Предхемосорбционное состояние обладает существенно меньшей энергией связи, чем хемосорбционное, но все же достаточной для того, чтобы при не слишком высоких температурах удерживать частицу на поверхности (рис. 4.8).

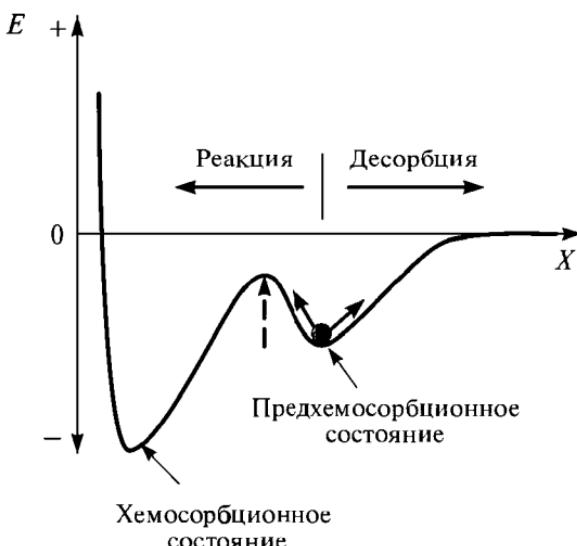


Рис. 4.8. Схематическая энергетическая диаграмма для частицы вблизи поверхности

Транспортировка частиц. Транспортировка частиц внутри канавки моделируется с использованием аналитического алгоритма построения лучей [92], в котором падающий поток частиц в заданную точку канавки есть сумма случайных потоков из плазмы и отраженных потоков от поверхностей канавки. Поток ионов с учетом отражения от поверхности определяется из уравнения:

$$I(B) = I'(B) + \int_{\mathfrak{R}} (1 - \alpha_1) P(B, B') I(B') dl, \quad (4.16)$$

где α_1 — коэффициент прилипания ионов к поверхности; $P(B, B')$ — плотность вероятности попадания частицы из точки B' профиля в точку B ; \mathfrak{R} — поверхность профиля; $I'(B)$ — поток ионов из газовой фазы в точке B :

$$I'(B) = \frac{1}{2} \int_0^w f(\psi) \frac{\cos l \cos p}{r_{x'B}} dx', \quad (4.17)$$

где

$$f(\psi) = C_1, \quad \psi \leq \psi_0$$

есть двумерное распределение ионов по углам; C_1 определяется условием нормировки: $C_1 = I_0 / (2 \sin \psi_0)$; ψ_0 — максимальный угол отклонения ионов от нормали; $r_{x'B}$ — расстояние от точки (x', θ) окна маски до точки B профиля щели; l и p — углы падения и отражения потока ионов в точке B ; w — ширина канавки.

Потоки радикалов с учетом отражения от поверхности канавки можно найти из решения интегрального уравнения [93]

$$R_{e,p}(B) = R_{e,p}^0(B) + \quad (4.19)$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{\mathfrak{R}} \left[\left\{ 1 - [1 - \theta(B')] S_{e,p} \right\} R_{e,p}(B') + Y_{e,p} \theta_{e,p} I(B') \right] P(B, B') dl,$$

где интегрирование проводится по двумерному поперечному сечению профиля канавки \mathfrak{R} , $\theta_{e,p}$ — степень заполнения поверхности активными и пассивирующими частицами, $\theta = \theta_e + \theta_p$ — полная степень заполнения, R_e , R_p — потоки частиц из газовой фазы, $Y_{e,p}$ — среднее число десорбированных с поверхности активных и пассивных частиц на один ион, I — ионный поток, $P(B, B')$ — плотность вероятности попадания частицы из точки B' профиля в точку B (рис. 4.9). Согласно адсорбционной кинетике Ленгмюра для активных и пассивных частиц скорость адсорбции R_{ads} определяется по формуле:

$$R_{ads(e,p)} = \gamma_{e,p} R_{e,p} (1 - \theta_{e,p}) = S_{e,p} R_{e,p}, \quad (4.20)$$

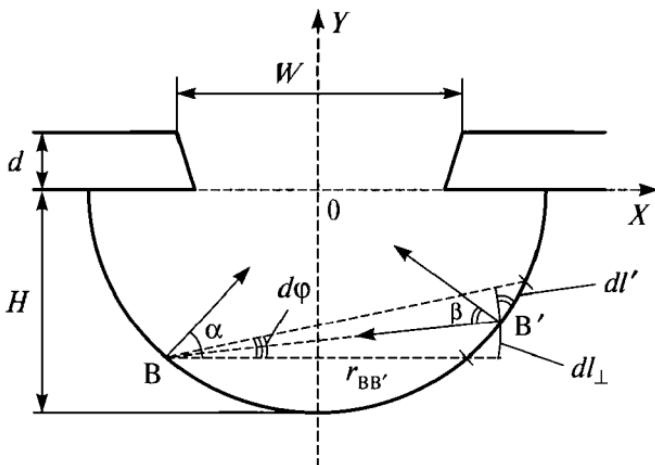


Рис. 4.9. Схематическое изображение поперечного сечения структуры: α , β — углы, образованные отрезком BB' с нормалями к поверхности канавки; $r_{BB'}$ — длина отрезка BB' ; dl' — дифференциал длины дуги профиля в точке B' ; $dl_\perp = dl' \cos \beta$ — проекция dl' на окружность с центром в точке B радиусом $r_{BB'}$; $d\varphi$ — угол, под которым dl' «виден» из точки B

где $\gamma_{e,p}$ — начальный коэффициент прилипания активных и пассивных радикалов на поверхность Si; $S_{e,p}$ — эффективный коэффициент прилипания, который уменьшается при увеличении степени заполнения поверхности θ

$$S_{e,p} = \gamma_{e,p} (1 - \theta_{e,p}). \quad (4.21)$$

Поверхностная кинетика. Хотя элементарные реакции, происходящие на поверхности, являются достаточно сложными, упрощенная модель демонстрирует свою пригодность и прогнозируемость при условии, что в нее вводятся экспериментальные данные, используемые для определения различных кинетических параметров. Ключевым упрощением в большинстве поверхностно-кинетических моделей является отделение химического травления от ионно-стимулированного, реакционного и десорбционного. Соответственно, суммарная скорость травления в точке B представляет собой объединение трех механизмов

$$\nu = \frac{1}{\rho_{\text{sub}}} \left(\frac{K_R \sigma_{\text{Si}} \theta_e(B)}{x} + Y_{\text{Si}} I(B) + Y_e I(B) \theta_e(B) \right), \quad (4.22)$$

где ρ_{sub} — атомная плотность материала подложки; x — число активных частиц в продукте реакции травления; K_R — константа скорости химической реакции; σ_{Si} — плотность поверхностных адсорбционных состояний; Y_{Si} и Y_e — среднее число выбитых с поверхности атомов кремния и среднее число десорбированных с поверхности активных частиц на один ион; $\theta_e(B)$ — степень заполнения поверхности активными частицами; $I(B)$ — ионный поток.

Первый член в уравнении (4.22) отвечает за химическое травление активными радикалами, второй — за физическое распыление, а последний — за ионно-стимулированное травление поверхности Si, покрытой активными радикалами.

Согласно уравнению Аррениуса, константа скорости химической реакции можно определить как

$$K_R = A e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (4.23)$$

где A — предэкспоненциальный фактор (порядка 10^{13} с^{-1}); E — энергия активации; R — газовая константа; T — температура частиц в газовой фазе.

Распределение падающих и отраженных ионов по энергиям и углам. Сложные ионно-стимулированные физические и химические реакции, имеющие место на поверхности при травлении, проявляются в выходе продуктов реакции, то есть в количестве атомов подложки, распыленных одним ионом, удалившимся о поверхность. Количество распыленных атомов Y пропорционально разнице корня квадратного от энергии иона E_i и корня квадратного от пороговой энергии E_{th} , не достигнув которой ионы не распыляют частицы с поверхности. Наиболее широко используемая формула для расчета Y выглядит так [94]:

$$Y(E_i, \phi) = G(\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{\text{th}}})f(\phi), \quad (4.24)$$

где G — константа пропорциональности; E_i — энергия иона; E_{th} — пороговая энергия выбивания атома с поверхности; $f(\phi)$ — функция распределения ионов по углам к нормали к поверхности. Функция $f(\phi)$ описывается распределением Гаусса

$$f(\phi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\phi^2}{2\sigma^2}} \quad (4.25)$$

со среднеквадратичным угловым отклонением σ_i , определяемым выражением:

$$\sigma_i = \arctg \left(\sqrt{\frac{k_B T_i}{E}} \right), \quad (4.26)$$

где ϕ — угол падения иона на поверхность; k_B — константа Больцмана; T_i — температура ионов; E_i — энергия ионов (эВ). Тепловую энергию ионов обычно принимают равной 0,2–0,5 эВ. При $kT_i = 0,2$ эВ и $E_i = 90$ эВ среднеквадратичное угловое отклонение $\sigma_i = 2,7^\circ$. В случае, когда на подложкодержатель приложено смещение [73], σ_i приближается к нулю.

Для изучения влияния угловой зависимости числа распыленных атомов на скорость травления и профиль, рассматриваются три возможных случая (рис. 4.10). Зависимость количества распыленных атомов при ионно-стимулированном травлении от угла падения может иметь максимум и далее резко падать, как при физическом распылении (кривая 1). Количество распыленных атомов при увеличении угла падения может не зависеть от до определенного значения, после превышения которого резко снижаться (кривая 2). И в третьем случае этой взаимосвязи может вообще не наблюдаться. Это количество может полностью не зависеть от угла падения (кривая 3).

Уравнение материального баланса на поверхности. Степень заполнения поверхности активными и пассивными радикалами определяется механизмом Ленгмюра—Хиншелвуда запол-

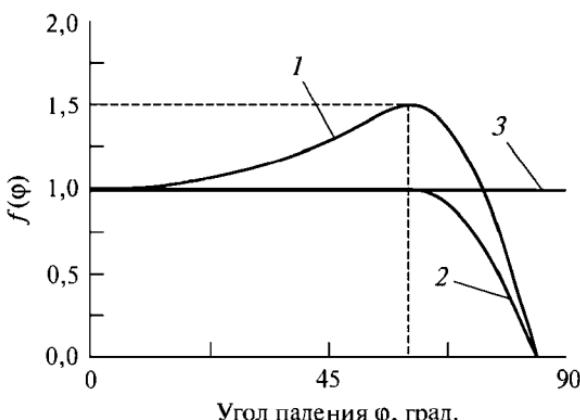


Рис. 4.10. Эффект угловой зависимости количества выбитых атомов [95]

нения активных центров. В предположении того, что активные и пассивные частицы адсорбируются в доступные активные центры с вероятностью γ и десорбируются посредством химического или ионно-стимулированного травления, уравнения материального баланса частиц на поверхности можно записать так:

$$\sigma_{\text{Si}} \frac{d\theta_e}{dt} = \gamma_e R_e (1 - \theta_e - \theta_p) - K_r \sigma_{\text{Si}} \theta_e - 2 Y_e \theta_e I; \quad (4.27a)$$

$$\sigma_{\text{Si}} \frac{d\theta_p}{dt} = \gamma_p R_p (1 - \theta_e - \theta_p) - \beta \sigma_{\text{Si}} \theta_p - 2 Y_p \theta_p I, \quad (4.27b)$$

где θ_e, θ_p — степени заполнения поверхности активными и пассивирующими частицами; σ_{Si} — плотность поверхностных адсорбционных состояний; R_e, R_p — потоки частиц из газовой фазы; I — ионный поток; γ_e, γ_p — коэффициенты прилипания активных и пассивных частиц; β — константа скорости рекомбинации пассивирующих частиц; K_r — константа скорости химической реакции травления; Y_e, Y_p — среднее число атомов Si в продукте реакции, десорбированных с поверхности, на один падающий ион. В этой модели активные и пассивные радикалы конкурируют за активное место на поверхности Si. Адсорбция активного радикала приводит к травлению, в то время как адсорбция пассивирующего радикала — к пассивации поверхности. Пассивные радикалы могут десорбироваться при рекомбинации, например в случае кислорода с образованием молекулы O_2 , или при ионно-стимулированном распылении. Для квазистационарного состояния выражения для степени заполнения частиц имеют следующий вид:

$$\theta_e = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_r \sigma_{\text{Si}} + 2 Y_e I}{\gamma_e R_e} \right) \left(1 + \frac{\gamma_p R_p}{\beta \sigma_{\text{Si}} + Y_p I} \right)}; \quad (4.28a)$$

$$\theta_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta \sigma_{\text{Si}} + 2 Y_p I}{\gamma_p R_p} \right) \left(1 + \frac{\gamma_e R_e}{K_r \sigma_{\text{Si}} + 2 Y_e I} \right)} \quad (4.28b)$$

и используются в (4.22) для определения скорости травления Si.

4.3.3. Методика расчета

В данном разделе излагаются и анализируются результаты расчетных и экспериментальных исследований, проведенных авторами ранее в ходе подготовки данного учебного пособия и частично изложенных в работах [51, 58].

Стратегия получения оценок кинетических параметров.

Целью расчетных исследований являлись:

- нахождение скорости травления в любой точке профиля (на боковой стенке или на дне канавки);
- построение профиля с применением выше описанных методик эволюции профиля с привлечением полученных в экспериментах либо взятых из литературы параметров.

Для того чтобы конечная программа адекватно обсчитывала профили, необходимо точно определить входные параметры: потоки радикалов и ионов (R_e , R_p , I), коэффициенты прилипания частиц (γ_e , γ_p), количество выбитых частиц одним ионом (Y_{Si} , Y_e , Y_p). Определение кинетических параметров проводится решением обратной задачи: путем нахождения входных параметров, зная выходные параметры эксперимента в конкретных типе реактора и газовом составе плазмы: скорость и время травления, глубину канавки, ВЧ-мощность, давление и соотношение между потоками газов. Одним из важнейших этапов моделирования является сравнение и анализ полученных данных. На этом этапе происходит проверка адекватности модели, в результате чего модель может быть исправлена (новый цикл расчетов) или отброшена как неверная. Расчетные исследования завершаются определением конечной оценки достоверности результатов, получаемых с помощью модели.

Рассмотрим методику расчета вышеописанной модели для процесса плазменного травления в реакторе LAM TCP 9400 с применением смеси SF_6 — O_2 . В табл. 4.2 приведены кинетические параметры, необходимые для расчета профилей. Эти параметры могут быть разделены на три группы: для химического, ионно-стимулированного травления и пассивации боковых стенок. Для уменьшения степени свободы в модели использовалась информация из диагностики плазмы и ранее опубликованных данных. Для примера, зависимость потока атомов фтора от давления была получена методом оптической спектроскопии в сочетании с актинометрией. Общий ионный ток измерялся с помощью планарного зонда. Параметры, которые экспериментально получить сложно или невозможно такие, как поток

атомов фтора (R_F), коэффициент прилипания (γ_F), скорость химической реакции ($K_R\sigma_{Si}$), среднее количество атомов кремния, выбиваемое одним ионом (Y_{Si}), определялись методом сетевых формирований профилей с оценкой при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ). Основная стратегия получения необходимых оценок заключается в создании граничных условий, при которых можно выделить лишь один механизм травления, обмерить профиль и вычислить неизвестные кинетические параметры.

Кремниевые пластины обрабатывались в течение 150 с в потоке SF_6 (80 см³/мин) и ВЧ-мощности 800 Вт. Для того, чтобы за-

Таблица 4.2

Параметры модели

Параметр	Значение	Метод определения
Химическое травление		
Поток атомов F, R_F	$10^{18}\text{--}10^{19}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	эксп./моделир.
Коэффициент прилипания атомов F, γ_F	0–1	моделирование
Скорость химического травления, $K_R\sigma_{Si}$	$\sim 10^{17}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	эксп./моделир.
Ионно-стимулированное травление		
Поток ионов, I	$10^{15}\text{--}10^{16}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	эксперименты
Напряжение смещения	–120 В	эксперименты
Температура электронов, T_e	2–4 эВ	из литературы [35, 36]
Температура ионов, T_i	0,1–1 эВ	из литературы [35, 36]
Константа пропорциональности, G_{Si}	$\sim 1\text{--}10$	моделирование
Пороговая энергия распыления Si, E_{th}	~0 эВ	из литературы [39]
Функция распределения частиц по углам, $f(\phi)$	0–1	моделирование
Пассивация боковых стен		
Поток атомов O, R_O	$10^{13}\text{--}10^{15}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	эксп./моделир.
Коэффициент прилипания атомов O, γ_O	0–1	моделирование
Скорость рекомбинации атомов O, $\beta\sigma_{Si}$	$\sim 10^{13}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	моделирование
Константа пропорциональности, G_{SiO_2}	$\sim 1\text{--}10$	эксперименты
Пороговая энергия распыления атомов O, E_{th}	~0–30 эВ	эксперименты

фиксировать граничные условия при ионном распылении и химическом травлении Si изменяли давление и напряжение смещения на подложкодержателе. На рис. 4.11 представлены РЭМ-снимки профилей отверстий диаметром 0,35 мкм, протравленных при давлении 5, 25 и 75 мТорр без смещения на подложку и со смещением (-120 В). Профили отверстий, полученные при 75 мТорр без смещения, имеют большое сходство с изотропным травлением. В случае полностью изотропного травления поперечное сечение потравленной структуры представляет собой четверть окружности с центром на краю маски. Профиль на рис. 4.11, в (верхняя часть) около маски немного отклоняется от формы четверти окружности. Травление в этой области запаздывает, поэтому профиль скругляется в верхней части. Далее будет показано, что это отклонение от формы четверти окружности содержит информацию о коэффициенте прилипания атомов F.

На рис. 4.11, г—е можно видеть влияние увеличения энергии ионов на вертикальную скорость травления. Профиль, полученный при 5 мТорр со смещением -120 В (рис. 4.11, г), имеет сходство с профилем на рис. 4.11, а, однако его дно расположено глубже, что является следствием ионной бомбардировки. При высоких давлениях и смещении на подложкодержатель профиль выглядит анизотропным. Когда давление увеличивается, поток

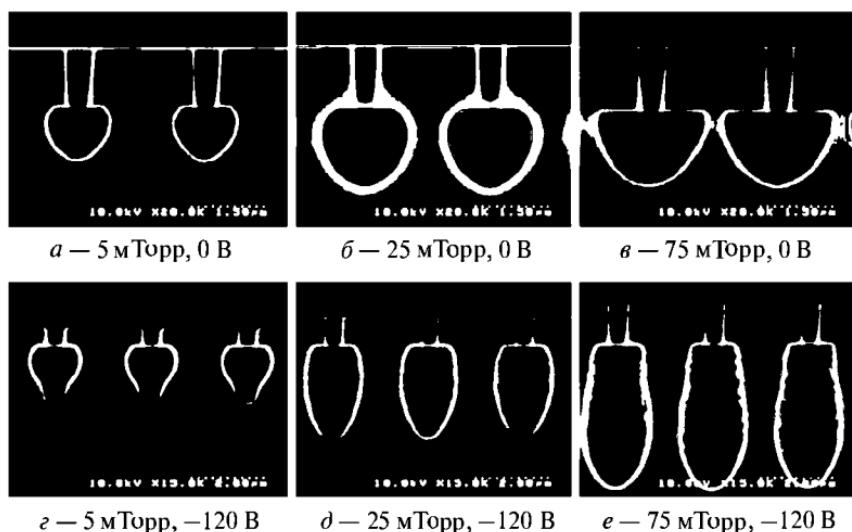


Рис. 4.11. РЭМ-снимки поперечного сечения отверстий диаметром 0,35 мкм, протравленных при следующих условиях: время обработки – 150 с, расход SF₆ – 80 см³/мин, ВЧ-мощность – 800 Вт

радикалов F, ударяющихся о поверхность, увеличивается, а поток ионов ослабевает. Если учитывать еще и то, что при высоких давлениях у ионов возрастает вероятность столкновений с нейтральными частицами, в результате которых они теряют свою энергию, то логично ожидать большую изотропность профилей при высоких давлениях. Вопреки этому в реальности наблюдается меньший подтрав под маску при высоких давлениях и явное преобладание вертикальной скорости травления (рис. 4.11, *d* и *e*). Причины, обуславливающие такое расхождение становятся очевидными только при систематическом изучении, объединяющем эксперименты и моделирование профилей, и будут обсуждены далее.

Параметры химического травления R_F , γ_F и $K_R\sigma_{Si}$ были определены подгонкой к профилю, полученному при граничных условиях для ионно-лимитированного травления: высокое давление (75 мТорр) без приложенного смещения (рис. 4.11, *в*). В этих условиях ионно-стимулированное травление незначительно по сравнению с химическим травлением. Для выбранного профиля было смоделировано боковое травление под маску и закругление сверху путем изменения параметров химического травления. Затем, для предсказания профилей при 5 и 25 мТорр (рис. 4.11, *а* и 4.11, *б*) был промасштабирован поток радикалов фтора с давлением в соответствии с данными актинометрии. Остальные параметры моделирования оставались постоянными.

Количество ионов, выбиваемое одним атомом Y_{Si} , было определено путем согласования моделируемого профиля с профилем, полученным при условиях, когда в ход процесса основную роль вносит ионно-стимулированное травление (низкое давление со смещением –120 В на подложкодержателе (рис. 4.11, *г*)). В этих условиях ионно-стимулированное травление играет такую же важную роль, как и химическое при давлении 75 мТорр. Путем изменения параметра Y_{Si} был смоделирован профиль, формируемый при давлении 5 мТорр и смещении –120 В, при этом основные параметры химического травления оставались неизменными. Далее были предсказаны профили при повышенных давлениях (рис. 4.11, *д* и *е*), при этом получаемые отклонения от моделируемых профилей использовались для изучения механизмов формирования различных анизотропных профилей.

Определение параметров химического травления. На основании полученного в работе [96] для плазмы F₂ выражения скорости химического травления кремния фтором в плазме F₂:

$$V = 2,91 \pm 0,20 \cdot 10^{-12} T^{1/2} n_F \exp\left(\frac{-0,108e^\nu}{k_B T}\right), \quad (4.29)$$

где V — скорость травления, Å/мин; T — температура пластины, К; n_F — концентрация атомов F, см⁻³; e — заряд электрона; ν — напряжение смещения, В; k_B — постоянная Больцмана, были рассчитаны потоки радикалов SF_x и фтора.

В модели предполагается полная диссоциация SF₆ на 6 атомов F и описание кинетики химического травления как реакции первого порядка. Скорость травления увеличивается линейно при увеличении потока F, когда степень заполнения поверхности атомами F мала, и становится независимой от потока атомов F, когда степень заполнения приближается к единице. Источниками фтора, поступающего на поверхность, являются сами атомы F и радикалы SF_x. Таким образом, поток атомов фтора должен выглядеть как эффективный поток, то есть сумма потоков частиц, приносящих фтор на поверхность:

$$R_F^{\text{eff}} = \sum_{x=1}^5 x R_{SF_x} + R_F. \quad (4.30)$$

Для изучения влияния каждого параметра на изменение профиля изменялся один кинетический параметр при постоянстве других. Тенденции изменения профилей от вариации параметров R_F , γ_F и $K_R \sigma_{Si}$ показаны на рис. 4.12.

Таблица 4.3

**Базовые значения параметров, используемые
для моделирования профилей
при давлении 75 мТорр без смещения**

Параметр	Значение
Поток атомов F, R_F	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов F, γ_F	1
Скорость химического травления, $K_R \sigma_{Si}$	$3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$
Поток ионов, I	$2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$
Температура ионов, T_i	0,1 эВ
Константа пропорциональности, G_{Si}	1
Функция распределения частиц по углам, $f(\phi)$	1

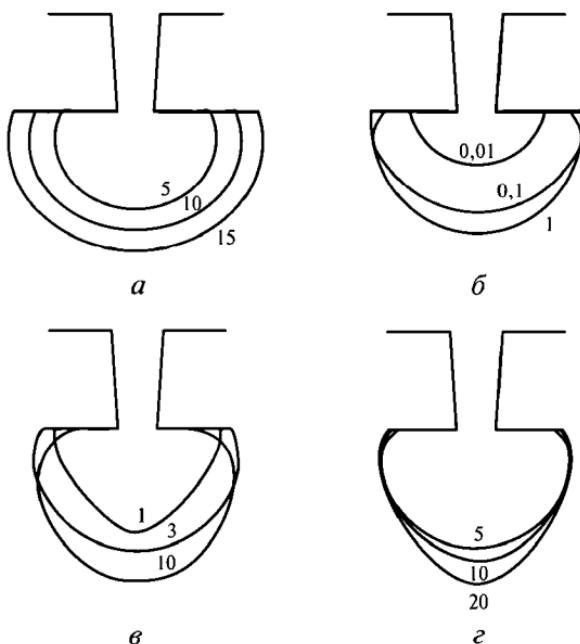


Рис. 4.12. Влияние параметров химического травления на смоделированный профиль отверстия диаметром 0,35 мкм: *а* – потока атомов фтора R_F ($\times 10^{19} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$); *б* – коэффициента прилипания γ_F ; *в* – постоянной скорости химической реакции травления $K_R \sigma_{Si}$ ($\times 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$); *г* – потенциала в области пространственного заряда V_s , В. Время травления – 150 с

Увеличение потока R_F (рис. 4.12, *а*) приводит к увеличению степени заполнения поверхности атомами F и, соответственно, росту скорости травления. Увеличение γ_F (рис. 4.12, *б*) аналогичным образом сказывается на скорости травления, но профиль получается более скругленным, а при приближении γ_F к единице уменьшается подтрав под маску. Дело в том, что область под маской травится атомами F и молекулами SF_6 , отраженными от поверхности профиля, расположенной в области вскрытия маски. Если коэффициент прилипания γ_F высокий, то атомы F будут преимущественно адсорбироваться на поверхности в области вскрытия маски.

Влияние $K_R \sigma_{Si}$ на профиль травления демонстрирует рис. 4.12, *в*, где также проявлено скругление профиля в верхней части под маской при более высоких величинах скорости химического травления. Это свидетельствует о том, что увеличение $K_R \sigma_{Si}$ приводит к уменьшению степени заполнения поверхности

атомами F (4.28, *a*) и увеличению эффективного коэффициента прилипания (4.21). При низкой степени заполнения поверхности фтором и высокой плотности свободных активных центров на дне отверстия на затененную часть профиля попадает совсем незначительное количество атомов фтора — подтрав уменьшается и профиль становится более скругленным.

В отличие от химических параметров травления, увеличение параметров ионно-стимулированного травления, средней энергии ионов, потока ионов и количества атомов Si, выбиваемого одним ионом, приводит к увеличению вертикальной скорости травления и не влияет на подтрав и скругление верхней части профиля. Например, на рис. 4.12, *г* виден эффект увеличения потенциала плазмы, который определяет среднюю энергию ионов. Влияние ионной бомбардировки на подтрав незначительно.

Совпадение экспериментально полученных и смоделированных профилей при одинаковых условиях неидеально, так как абсолютный поток F неизвестен (рис. 4.13). Например, на рис. 4.13, *в* и 4.13, *е* можно видеть хорошее совпадение профилей, полученных при двух различных наборах параметров и одинаковом давлении

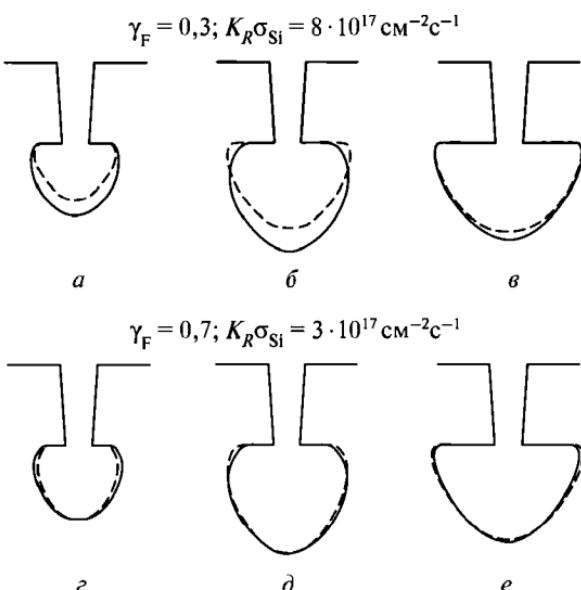


Рис. 4.13. Сравнение экспериментально полученных (сплошные линии) и смоделированных (штриховые линии) профилей для отверстий диаметром 0,35 мкм, протравленных без смещения при давлении 5 мТорр (*а* и *г*), 25 мТорр (*б* и *д*) и 75 мТорр (*в* и *е*)

75 мТорр. В первом наборе параметров (рис. 4.13, *a—e*) низкое значение коэффициента прилипания атомов фтора $\gamma_F = 0,3$ компенсируется высоким значением скорости реакции $K_R\sigma_{Si} = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, чтобы согласовать подтрав под маску. Во втором наборе параметров (рис. 4.13, *e—e*), наоборот, низкое значение скорости реакции $K_R\sigma_{Si} = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ компенсируется высоким значением коэффициента прилипания атомов фтора $\gamma_F = 0,7$. Однако только при одном наборе параметров достигается удовлетворительное согласие расчета и эксперимента.

Для получения достоверности скорость химической реакции $K_R\sigma_{Si}$ была рассчитана вторым методом: из начальной латеральной скорости травления путем измерения подтрава под массу в зависимости от времени в начале процесса. Так как ионы под маску практически не попадают, то подтрав обусловлен практически химическим травлением; в этом случае скорость травления (4.22) определяется по выражению:

$$V = \frac{1}{\rho_{sub}} \left(\frac{K_R\sigma_{Si}\theta_F}{4} \right), \quad (4.31)$$

где ρ_{sub} — атомная плотность материала подложки, а θ_F — степень заполнения поверхности атомами F;

$$\theta_F = \frac{1}{1 + \frac{K_R\sigma_{Si}}{\gamma_F R_F}}. \quad (4.32)$$

Оценку $K_R\sigma_{Si}$ можно получить из начальной латеральной скорости травления $V_0 R_0$, если травление проходит при условиях, когда влияние ионной бомбардировки и эффект затенения нейтральных частиц минимальны. Для этих условий равенство (4.31) может быть упрощено и выражение для скорости химической реакции принимает вид:

$$K_R\sigma_{Si} = 4\rho_{Si} V_0. \quad (4.33)$$

Параметры ионно-стимулированного травления. Влияние средней энергии ионов на скорость травления и форму профиля отверстия диаметром 0,35 мкм, потравленного за 150 с, демонстрирует рис. 4.14. Значения параметров процесса, при которых проводился этот эксперимент, приведены в табл. 4.4.

Повышение приложенного смещения увеличивает среднюю энергию ионов, что стимулирует вертикальную скорость травле-

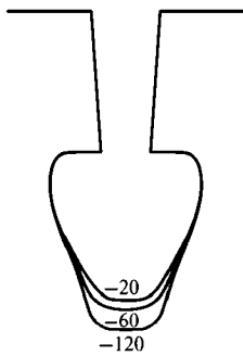


Рис. 4.14. Влияние напряжения смещения (средней энергии ионов) на смоделированные профили отверстий диаметром 0,35 мкм. Параметры моделирования соответствуют травлению при 5 мТорр

ния относительно латеральной. Таким образом, увеличение либо потока ионов, либо количества атомов Si, выбиваемых одним ионом, путем изменения константы пропорциональности G [см. (4.24)] приводит к увеличению вертикальной скорости травления. Пороговая энергия E_{th} незначительно влияет на скорость травления и форму профиля, когда энергия ионов много больше E_{th} . При давлении 5 мТорр и смещении -120 В ионы практически не сталкиваются в ОПЗ и имеют максимальное отклонение 3° . Следовательно, скорость травления и форма профиля не зависят от угла распределения ионов.

Смоделированный профиль (давление — 5 мТорр, смещение -120 В) был согласован с экспериментальным путем минимизации рассогласования Y_{Si}^{exp} и $Y_{Si}^{расч}$ за счет подбора

Таблица 4.4

**Базовые значения параметров, используемые
для моделирования профилей
при давлении 5 мТорр и смещении -120 В**

Параметр	Значение
Поток атомов, R_F	$1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов, γ_F	0,7
Скорость химического травления, $K_R \sigma_{Si}$	$3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Поток ионов, I	$2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Напряжение смещения	-120 В
Температура ионов, T_i	0,3 эВ
Константа пропорциональности, G_{Si}	7
Функция распределения частиц по углам, $f(\phi)$	1

константы пропорциональности G . Далее поток атомов F был промасштабирован в соответствии с давлением на основании данных оптической эмиссионной спектроскопии и данных с зонда, и были смоделированы профили при высоких давлениях. Сравнение расчета и эксперимента выявляет большую изотропность профиля со значительным подтравом под маску по сравнению с экспериментально полученным. Попытки согласования смоделированных и экспериментальных профилей при 25 и 75 мТорр путем использования различных наборов параметров не дали результатов.

Дальнейшие исследования, нацеленные на изучение этого несоответствия, выявили (эмиссионная спектроскопия), что даже в чистой плазме SF_6 присутствуют атомы O . Возможны два источника появления кислорода. Первый — кварцевое окно, которое постепенно травится. По оценкам, скорость травления кварца составляет около 200 \AA/min , что соответствует примерно $1 \text{ cm}^3 \text{ O}_2/\text{мин}$. Второй, более значительный источник атомов O — это травление оксидной маски, особенно в случае приложенных напряжений смещения. Количество кислорода, поступающее в плазму SF_6 в процессе травления оксидной маски, и наличие напряжение смещения, равного -120 В , эквивалентно потоку O_2 , равному примерно $10 \text{ cm}^3/\text{мин}$. Было предположено, что присутствие атомов O приводит к пассивации боковых стенок путем окисления, что дает анизотропный профиль. Для оценки этой гипотезы использован механизм пассивации поверхности, описываемый уравнением (4.27б). Соответственно, степени заполнения поверхности атомами F и O будут определяться из уравнений (4.28а) и (4.28б).



Рис. 4.15. Сравнение экспериментально полученного (сплошная линия) и смоделированного (штриховая линия) профилей отверстия $0,35 \text{ мкм}$ при давлении 75 мТорр и смещении -120 В

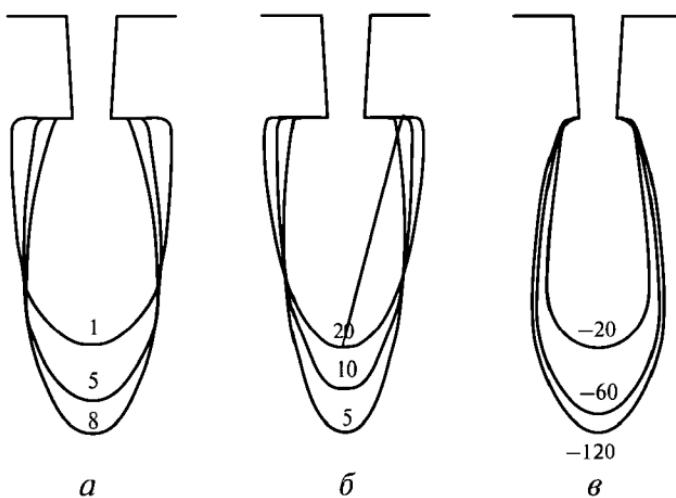


Рис. 4.16. Влияние потока кислорода R_O ($\times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а), скорости рекомбинации атомов кислорода $\beta\sigma_{Si}$ ($\times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, б) и напряжения смещения (средней энергии ионов), в) на смоделированный профиль отверстия диаметром 0,35 мкм.

Параметры моделирования (для а и б) соответствуют травлению при 75 мТорр и смещении –120 В

На рис. 4.16 изображено влияние отдельных параметров модели на форму профиля отверстия диаметром 0,35 мкм, потравленного за 150 с. Как и в других экспериментах, изменялся только один параметр, остальные были постоянными (табл. 4.5). Оказалось, что увеличение потока кислорода R_O подавляет латеральную скорость травления и профиль становится более анизотропным с меньшим подтравом под маску (рис. 4.16, а). Поток О, требуемый для сходства с экспериментальным профилем, должен иметь величину $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а поток F — $\sim 10^{19} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Коэффициент прилипания атомов кислорода γ_O тоже влияет на скорость травления и форму профиля, как и поток R_O .

Увеличение скорости рекомбинации атомов кислорода $\beta\sigma_{Si}$, наоборот, увеличивает латеральную скорость травления (рис. 4.16, б), то есть при высокой скорости рекомбинации пассивация боковых стенок менее эффективна и подтрав под маску более значительный.

Если опустить детальное рассмотрение кинетики рекомбинации атомов кислорода, можно предположить, что реакция рекомбинации О — в уравнении (4.28 б) не первого порядка и скорость этого процесса не зависит от потока О. Результирую-

Таблица 4.5

**Базовые значения параметров модели травления
при давлении 75 мТорр и смещении –120 В**

Параметр	Значение
Поток атомов F, R_F	$1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов F, γ_F	0,7
Скорость химической реакции, $K_R \sigma_{Si}$	$3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Поток ионов, I	$2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Напряжение смещения	–120 В
Температура ионов, T_i	0,3 эВ
Константа пропорциональности, G_{Si}	7
Функция распределения частиц по углам, $f(\phi)$	1
Поток атомов O, R_O	$8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов O, γ_O	1
Скорость рекомбинации атомов O, $\beta \sigma_{Si}$	$1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

щее кинетическое выражение учитывает подтрав под маску при увеличении давления. При отсутствии ионной бомбардировки под маской выражение (4.28б) для степени заполнения пассивирующих частиц упрощается:

$$\theta_O = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta \sigma_{Si}}{\gamma_O R_O} \right) \left(1 + \frac{\gamma_F R_F}{K_R \sigma_{Si}} \right)}. \quad (4.34)$$

Увеличение R_O приводит к увеличению θ_O под маской, что приводит к более сильной пассивации боковых стен и меньшему подтраву под маску, как это и было подтверждено экспериментом в ходе увеличения давления. Однако, если допустить, что скорость рекомбинации зависит от R_O ,

$$\sigma_{Si} \frac{d\theta_O}{dt} = \gamma_O R_O (1 - \theta_F - \theta_O) - \beta R_O \theta_O - Y_O \theta_O I, \quad (4.35)$$

то выражение (4.34) принимает следующий вид:

$$\theta_O = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta}{\gamma_O} \right) \left(1 + \frac{\gamma_F R_F}{K_R \sigma_{Si}} \right)}. \quad (4.36)$$

При этом зависимость θ_O от R_O пропадает, и модель неадекватно рассчитывает профили в зависимости от давления.

Увеличение средней энергии ионов путем увеличения напряжения смещения увеличивает вертикальную скорость травления (рис. 4.16, *e*). Параметры I и Y_F в модели имеют такое же влияние на вертикальную скорость травления, как и средняя энергия ионов в процессе травления.

Среднее число десорбированных с поверхности атомов кислорода на один падающий ион Y_O имеет то же выражение, что и для Y_F [см. (4.24)], а соответственно и то же влияние на скорость травления, что и скорость рекомбинации О. Увеличение Y_O приводит к снижению пассивации боковых стен и увеличению латеральной скорости травления. Полагая, что значение пороговой энергии E_{th} распыления атомов О то же самое, как и при ионно-стимулированном травлении SiO_2 , было рассчитано количество выбиваемых молекул SiO_2 на один падающий ион Y на пластинах со слоем оксида без топологии в плазме SF_6 . (Скорости химического травления и физического распыления SiO_2 во фторсодержащих плазмах намного меньше, чем скорость ионно-стимулированного травления.)

Травление пластин со слоем оксида проводим при таких же условиях, что и при травлении Si. Для получения картины изменения параметра Y_{SiO_2} от энергии ионов и определения параметров G и E_{th} напряжение смещения изменяли в пределах от 0 до -300 В. Скорость травления вычисляли на основании данных о начальной и остаточной толщины оксида, измеренных на эллипсометре, а параметр Y_{SiO_2} находили по формуле:

$$Y_{\text{SiO}_2} = \frac{V \rho_{\text{SiO}_2}}{I}, \quad (4.37)$$

где V — скорость травления; I — ионный поток; ρ_{SiO_2} — плотность диоксида кремния. Полученные в ходе эксперимента значения G и E_{th} приведены в табл. 4.6.

На рис. 4.11, *г* и *е* заметно существенное распыление оксидной маски, в частности при низком давлении, когда поток ионов более высокий. При распылении маски доступный угол попадания частиц в отверстие увеличивается, соответственно, растет и поток F на поверхность. Более того, константа пропорциональности и пороговая энергия изменяются с давлением, так как оно оказывается на составе и структуре травимой поверхности, а соответственно, меняются и G и E_{th} (см. табл. 4.6).

Таблица 4.6

**Параметры G и E_{th} для поверхностей Si и SiO_2 ,
значения которых были получены
на основании экспериментальных данных**

Параметр	SiO_2			Si
	5 мТорр	25 мТорр	75 мТорр	
Константа пропорциональности, G_{Si}	0,1	0,2	0,4	7
Пороговая энергия, E_{th}	2 эВ	8 эВ	30 эВ	4 эВ

Профили, полученные при напряжении смещения -120 В, были смоделированы путем изменения количества атомов Si, выбиваемых одним ионом Y_{Si} , потока атомов кислорода R_{O} , скорость рекомбинации кислорода β_{Si} и количества выбиваемых атомов O одним ионом Y_{O} . Коэффициент прилипания атомов кислорода γ_{O} был выбран равным единице. В табл. 4.7 приведены параметры, при которых было получено наилучшее сходство смоделированных профилей с экспериментальными (рис. 4.17).

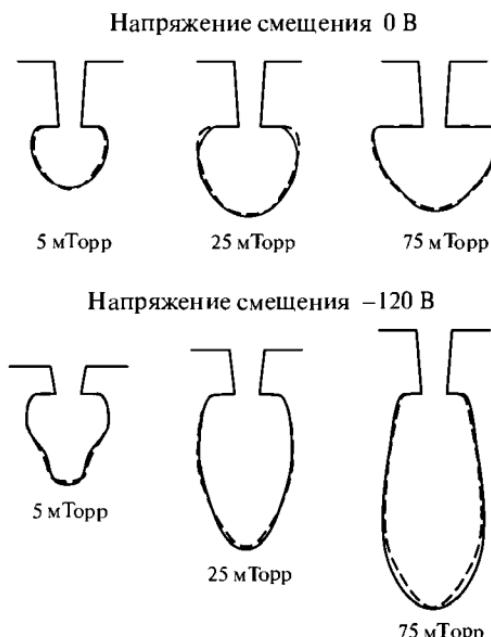


Рис. 4.17. Сравнение экспериментально полученных (сплошные линии) и смоделированных (штриховые линии) профилей для отверстий диаметром $0,35$ мкм, потравленных без смещения (верхние профили) и с приложенным смещением (нижние профили)

Таблица 4.7

**Параметры модели,
идеально удовлетворяющие эксперименту**

Параметр	5 мТорр	25 мТорр	75 мТорр
Поток атомов F, R_F	$1,5 \cdot 10^{18}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^{18}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{19}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов F, γ_F	0,7	0,7	0,7
Константа скорости химической реакции, $K_{\text{R}\sigma\text{Si}}$	$3 \cdot 10^{17}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$3 \cdot 10^{17}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$3 \cdot 10^{17}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Поток ионов, I	$2 \cdot 10^{16}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Температура ионов, T_i	0,3 эВ	0,1 эВ	0,1 эВ
Константа пропорциональности, G_{Si}	7	7	7
Пороговая энергия распыления Si, E_{th}	0 эВ	0 эВ	0 эВ
Поток атомов O, R_O	$1 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$2 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$8 \cdot 10^{15}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Коэффициент прилипания атомов O, γ_O	1	1	1
Скорость рекомбинации атомов O, $\beta_{\text{O}\text{Si}}$	$4 \cdot 10^{13}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$4 \cdot 10^{13}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$4 \cdot 10^{13}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Константа пропорциональности, G_{SiO_2}	5	4	3
Пороговая энергия распыления атомов O, E_{th}	2 эВ	8 эВ	30 эВ

Таким образом, мы продемонстрировали возможности моделирования процессов травления оксидной маски для предсказания профилей в плазме SF₆ с небольшой добавкой O. Моделирование позволяет адекватно рассчитать даже совсем оригинальные варианты травления с новыми ранее неизвестны-

ми эффектами. Разработанные принципы моделирования с использованием метода сетевых экспериментов для оптимизации модели и получения необходимых значений некоторых входных параметров позволяют рассчитывать профили травления для различных газовых смесей и условий проведения процессов. В частности, были рассчитаны и оптимизированы параметры прецизионного травления канавок в кремнии в газовых смесях SF_6-O_2 , $HBr-SF_6-O_2$, которые обеспечили возможность реализации процессов с высокими технологическими параметрами и низкой аспектной зависимостью [57–59]. Возможности дальнейшего развития рассмотренного метода моделирования нам видятся в переходе к трехмерным моделям рассматриваемых структур и учете некоторых сложных факторов, таких как, например, зарядка маски, топология, близость стенок. В настоящее время этими вопросами плотно занимаются специалисты ведущих мировых лабораторий в области разработки новейших технологий и моделирования.

Глава 5

Современное применение плазменных технологий в микроэлектромеханических и ультрабольших интегральных системах

Понятие «микросистемная техника» давно и прочно укоренилось в научно-технической литературе и инженерном лексиконе. Появление этого термина связано с очередной стадией развития техники и технологий, благодаря которым стало возможным создание малогабаритных интегрированных многофункциональных систем, решающих задачи получения и хранения информации, вычисления и управления и т. д. [58].

Существует множество толкований термина «микросистемная техника». Определение «микросистемной техники» как интегрированной на микроуровне информационно-управляющей исполнительной системы наиболее сжато характеризует ее суть. Таким образом, разнообразные приборы, схемы, устройства, подсистемы, интегрированные на микроуровне, могут быть частью или законченным изделием микросистемной техники.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — это совокупность электронных и механических элементов (компонентов), выполненных в микроисполнении на основе групповых методов. Соответственно, в микрооптоэлектромеханических системах (МОЭМС) дополнительно содержатся оптические элементы. Более общая совокупность подобных изделий может быть отнесена к микросистемной технике, или к технологии микросистем, как традиционно называют ее в некоторых европейских странах.

Основой микросистемной техники является технология микроэлектроники. Сложные функциональные механические системы могут строиться на основе микротехнологий, нанотехнологий и наноматериалов.

Микромеханика и наномеханика — это не только элементы механики (или механические устройства), выполненные величиной в единицы микрометров или, соответственно, нанометров. К ним также относятся элементы, компоненты или устройства значительно больших размеров (например, единицы

миллиметров), но у которых, например, точность изготовления элементов конструкции составляет микрометры и нанометры; этот размерный фактор прецизионности обработки позволяет достигать новые недостижимые ранее характеристики. Подобные устройства следует относить к наномеханике или наносистемной технике (НСТ). Например, прецизионные измерения наноперемещений подвижных механических частей лежат в основе работы датчиков с высокой чувствительностью.

Механические элементы могут преобразовывать сигнал какого-либо воздействия на систему или отдельную ее часть в механическое перемещение или, наоборот, механическое воздействие — в информационный (управляющий) сигнал, а также каким-либо образом способствовать или препятствовать подобным процессам. Все чаще встречающееся понятие «микромашины» подразумевает не только устройства, у которых имеются механические детали, выполненные в микроисполнении, но и системы, преобразующие энергию потока газа, жидкости и т. п. в электроэнергию, в оптический сигнал, в микроперемещение, или, наоборот, системы, которые при определенных воздействиях с использованием механики изменяют информационные потоки, механические свойства, газодинамику, гидродинамику, оптические свойства, свойства поверхности и т. д.

5.1. Тенденции развития микро- и наносистемной техники

Назначение приборов микросистемной техники настолько широко, что, пожалуй, невозможно определить, в какой области подобные приборы не могут быть использованы. Однако наряду с общизвестными и популярными направлениями развития микросистемной техники в виде МЭМС для определения параметров движения различных объектов (микроакселерометров, микрогироскопов), систем сбора и анализа информации на базе различных сенсоров (датчиков давления, расхода, состава газов и жидкостей, ударов, вибрации и т. д.) и получения различного рода актоаторов (микродвигателей, поворотных зеркал, насосов и других исполнительных устройств) особое место занимает направление разработки и изготовления микроаналитических систем (микроаналитических лабораторий, микрофлюидных чипов и т. п.). Это направление очень важно и востребовано в настоящее время и может быть перспективно и в будущем.

Хорошо известны традиционные микромеханические системы, изготовленные на базе чувствительных элементов различных датчиков и микроактиоаторов. Это датчики давления (относительного и абсолютного), датчики линейных ускорений (акселерометры), датчики потока газов и жидкостей, датчики угловых скоростей (микромеханические гироскопы), микрофлюидные чипы, микрозеркала, микротурбины и т. д. Основной задачей при разработке первых конструкций микродатчиков было уменьшение размеров и стоимости изготавливаемых приборов. Однако дальнейшие работы показали, что несмотря на малые размеры, МЭМС-приборы могут обладать достаточно высокими эксплуатационными характеристиками, не только сравнимыми с параметрами традиционно изготавливаемых отдельных датчиков, но и значительно лучшими. Микроминиатюризация электромеханических систем дает возможность не только оптимизировать массогабаритные и ценовые показатели изделия, но и очень часто улучшить параметры прибора за счет уменьшения паразитных шумов, влияния внешних факторов и т. д.

Эффективность работы микротурбин и миниатюрных камер сгорания может быть значительно выше, чем у традиционно изготавливаемых аналогов. Ожидается, что миниатюрный турбоэлектрогенератор («турбина на чипе») сможет быть в десять раз эффективнее литий-ионных аккумуляторов при аналогичных габаритных размерах, а миниатюрные камеры сгорания иметь значительно больший КПД по сравнению с камерами традиционных размеров.

Понятие «информационные системы» включает все устройства, обеспечивающие получение, обработку и передачу информации. Микро- и наносистемы (особенно в части сенсорных устройств, преобразующих различные воздействия в информационный сигнал) являются их составной частью. Сенсор (или датчик) — прибор, позволяющий определить или «почувствовать» какой-либо вид воздействия (например, температуру, давление, излучение, ускорение, влажность, изменение какого-либо параметра, наличие какого-либо вещества и т. д.). Ключевым элементом сенсоров является чувствительный элемент (ЧЭ), на который непосредственно воздействует измеряемый параметр и который в микромеханической системе может состоять из механических или механоэлектронных частей. В большинстве случаев конструкция и функциональные возможности чувствительных элементов определяют возможности сенсоров, включая их точность.

Микро- и наноэлектромеханические приборы и устройства. Преимущества микро- и наномеханических элементов и приборов (по сравнению с традиционными) хорошо известны — это малые габариты, малое энергопотребление, практически неограниченный ресурс работы, малая стоимость при массовом исполнении, устойчивость к большим перегрузкам и возможность интеграции с электронной частью прибора в одном кристалле полупроводника.

Недостатками микро- и наносистем остаются относительно невысокая точность чувствительных элементов сенсоров, значительные собственные шумы систем съема сигнала, высокие затраты на разработку элементов, технологий и оборудования для их изготовления.

Очевидные преимущества микро- и наносистем и приборов потенциально обеспечивают им все более широкое применение в самых различных областях техники и для решения многих задач. Наибольшее распространение к настоящему времени получили системы на основе чувствительных элементов датчиков давления. Очень значительной областью применения микро- и наносистемной техники является телекоммуникационная техника, использующая различные оптические и электронные переключатели, изготовленные на основе элементов микромеханики. Одним из самых выдающихся достижений в области микросистемной техники является цифровой микрорежимный прибор (Digital Micromirror Device — DMD, Texas Instrument), содержащий свыше 500 000 подвижных механических частей, который предназначен для формирования проекционного изображения, системы точного наведения на цель, создания информационных полей в пространстве и для ориентации.

Стратегически важным направлением развития МЭС и наноэлектромеханических систем (НЭМС) является создание устройств, позволяющих собирать и обрабатывать информацию о параметрах движения или положения объектов, осуществлять мониторинг их состояния. Подобные системы могут собираться на основе подсистем, включающих микроакселерометры, микрогироскопы, датчики магнитного поля, датчики вращения, устройства оптической, радиоэлектронной, спутниковой навигации и т. п. Микромеханические датчики угловой скорости очень часто называют микромеханическими гироскопами (ММГ или ММВГ — микромеханический вибрационный гироскоп). Ниже перечислены наиболее известные об-

ласти применения этих устройств на основе чувствительных элементов микромеханических акселерометров и микрогироскопов:

- автомобильестроение (активная подвеска, автоматическое управление, навигация, системы безопасности, контроль движения);
- авиация и флот (навигация и ориентация малых, а также сверхмалых беспилотных летательных, плавающих, подводных аппаратов);
- космонавтика (системы навигации и ориентации для космонавта в открытом космосе, малых спутников, строительство больших пространственных конструкций);
- оборонная промышленность (специальные боеприпасы);
- робототехника (датчики и системы контроля кинематических параметров движения манипуляторов, специальные микророботы);
- спорт (контроль параметров движения спортсмена, спортивные тренажеры);
- медицина (контроль состояния пациента по параметрам его движения, реабилитационные тренажеры, активные протезы, система навигации и ориентации для слепых, управляемые медицинские зонды);
- технологии виртуальной реальности (трехмерные «мыши», шлемы, перчатки, игровые системы, профессиональные и спортивные тренажеры и др.);
- бытовая техника (системы контроля бытовых приборов);
- строительная техника (определение наклона, напряжений и деформаций конструкций и т. д.);
- геологоразведка и добыча полезных ископаемых (система определения положения и движения бура при бурении скважин, инклинометрия, мониторинг нефте- и газопроводов и т. д.);
- сейсмические исследования;
- дорожное строительство (определение состояния поверхности дорог и магистралей, контроль изменения их профиля).

Конструирование чувствительных элементов должно учитывать особенности использования МСТ или НСТ. Например, для автономных систем навигации малых подвижных объектов гироскопы должны соответствовать классу точности порядка

$0,1\text{--}1^{\circ}/\text{ч}$. Класс же точности большинства современных микромеханических гироскопов порядка $0,01\text{--}0,1^{\circ}/\text{с}$ ($36\text{--}360^{\circ}/\text{ч}$), то есть значительно ниже.

В настоящее время разработаны и изготовлены различные конструктивные варианты микрогироскопов и микроакселерометров. **Гироскопы**, включающие в себя ЧЭ с сосредоточенными параметрами, можно классифицировать как приборы LL- и RR-типа. В приборах LL-типа (рис. 5.1) возбуждаются первичные *линейные* колебания по какой-либо оси, перпендикулярной оси чувствительности. При действии угловой скорости возникает переменное ускорение Кориолиса той же частоты, что и первичные колебания, направленное по оси, перпендикулярной и оси чувствительности, и оси первичных колебаний. Вследствие этого система начинает совершать линейные колебания (вторичные) в направлении ускорения Кориолиса, причем в установленном режиме частоты первичных и вторичных колебаний совпадают.

Следует отметить, что ЧЭ приборов с сосредоточенными параметрами желательно делать с двумя или четырьмя инерциальными массами (первичные колебания которых возбуждаются в противофазе), что обеспечивает сравнительно небольшую чувствительность к линейным ускорениям. Гребенчатые структуры, приведенные на рис. 5.1, позволяют увеличить площадь электростатических датчиков возбуждения и съема сигнала.

В приборах RR-типа возбуждаются первичные *угловые* колебания, а при действии угловой скорости вследствие гироскопи-

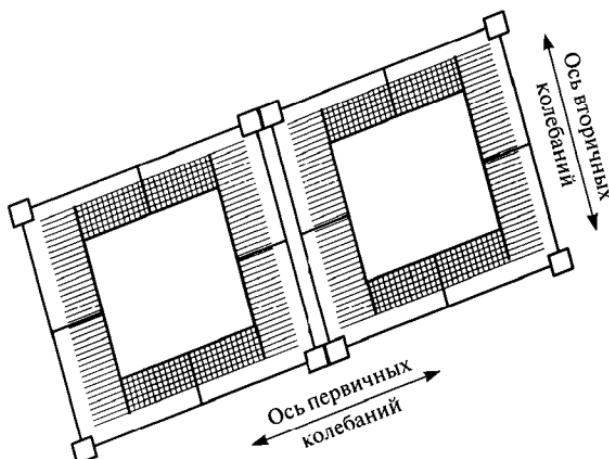


Рис. 5.1. ЧЭ гироскопа LL-типа

ческого момента возникают угловые колебания в направлении оси, перпендикулярной оси чувствительности и оси первичных колебаний. В установившемся режиме целесообразно добиваться того, чтобы частоты первичных и вторичных колебаний совпадали. На рис. 5.2 и 5.3 приведены эскизы ЧЭ гироскопов RR-типа.

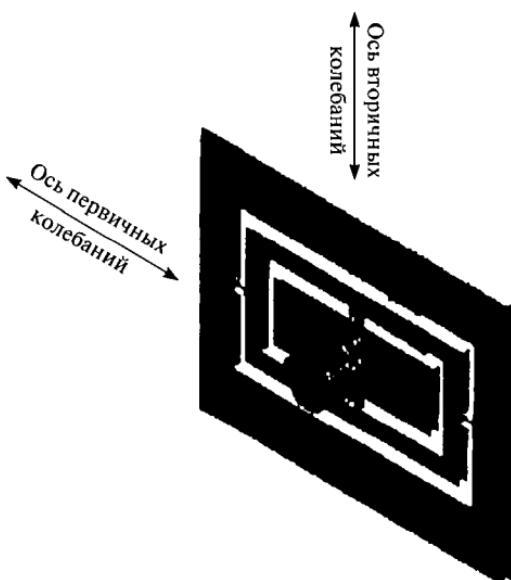


Рис. 5.2. Чувствительный элемент «карданного» гироскопа RR-типа

Компания Draper Laboratory (США) разработала схему гироскопа в виде диска (рис. 5.3), совершающего угловые колебания по оси возбуждения и измерительной оси. В такой схеме угловые движения диска возбуждаются гребенчатым двигателем на частоте, равной частоте собственных угловых колебаний. Под воздействием угловой скорости основания возникают силы Кориолиса, вызывающие колебания диска по оси, перпендикулярной его относительной скорости и переносной угловой скорости основания. Достоинство подобной схемы состоит во взаимосвязанности движения инерционных масс.

Проектирование ЧЭ для приборов RR- и LL-типов определяется динамикой чувствительного элемента на врачающемся основании с учетом внешних возмущений, обусловленных вибрацией и ударными перегрузками.

В приборах с распределенными параметрами в ЧЭ гироскопа возбуждаются изгибные колебания (стоячие волны), которые при

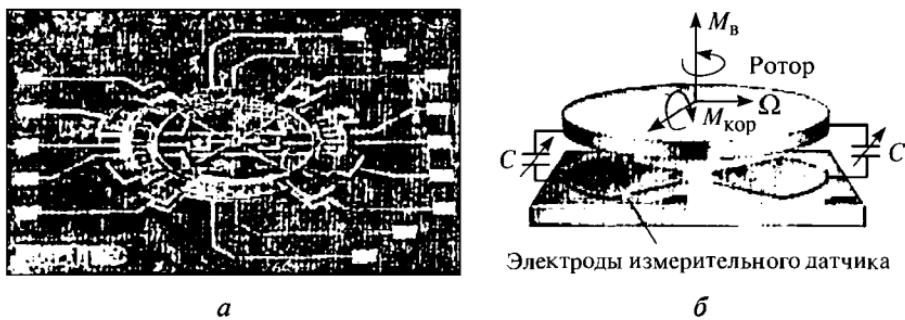


Рис. 5.3. Гироскоп RR-типа в виде диска компании Draper Laboratory (США):

а — фотография общего вида ЧЭ гироскопа; *б* — принципиальная схема

действии угловой скорости поворачиваются на угол, пропорциональный этой угловой скорости либо меняют плоскость колебаний. Пример ЧЭ гироскопа с распределенными параметрами приведен на рис. 5.4.

Фирма BAE Systems (Великобритания), имея большой опыт в проектировании волновых твердотельных гироскопов (ВТГ), успешно применила его при создании микромеханической версии ВТГ на основе кольцевого резонатора из монокристаллического кремния.

Значительных успехов в разработке микромеханического гироскопа с кольцевым резонатором добилась и компания Delphi

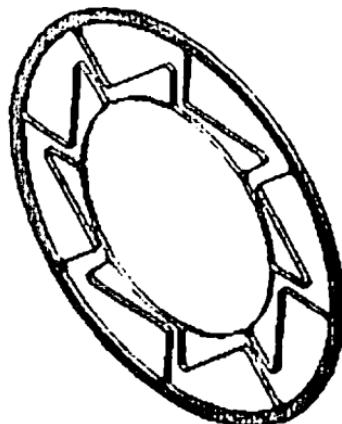


Рис. 5.4. Чувствительный элемент гироскопа с распределенными параметрами на основе кольцевого резонатора

Technology Solutions. На рис. 5.5 представлены два варианта ЧЭ микрогироскопа этого производителя. ЧЭ микрогироскопа выполнен из поликристаллического кремния. Кольцевой резонатор диаметром 1 мм удерживается в подвесе с помощью восьми упругих элементов. По периферии кольцевого резонатора располагаются электроды системы возбуждения, системы съема сигнала и регулирования параметров кольцевого резонатора. Для повышения эффективности работы этих систем во втором варианте ЧЭ часть электродов выполнена в виде гребенчатых структур. Собственная частота кольцевого резонатора составляет 30–35 кГц, а изменение собственной частоты в диапазоне температур от –40 до 100 °C — 700 Гц.

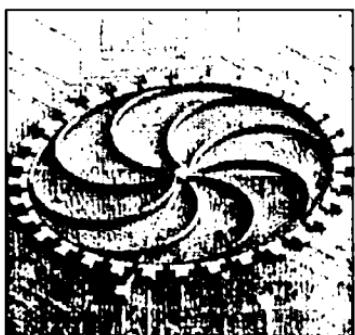
*а**б*

Рис. 5.5. Чувствительный элемент микрогироскопа, разработанного в компании Delphi Technology Solutions:
а — первоначальный вариант конструкции; *б* — вариант конструкции, используемый в серийных гироскопах

В любой конструкции прибора, изготавливаемого методом жидкостного анизотропного травления, внешние углы могут иметь формы, отличающиеся от фотолитографического рисунка из-за повышенной скорости травления на углах. Уменьшение размера угла обычно называют угловым растрывом. В кремниевых подложках с ориентацией поверхности (100) и расположением фотолитографического рисунка объекта параллельно или перпендикулярно направлению базового среза (110) внешние углы конструкции травятся быстрее, в результате наблюдается образование дополнительных плоскостей и граней [например, (211)]. Уменьшить величину растрыва можно расчетом и выбором состава травителя, комбинацией методов травления, а также

разработкой компенсаторов углового раstra, то есть формы защитной маски, которая позволяет получить угол необходимого (прямоугольного) вида.

Моделирование и расчет травителя на основе пакета прикладных программ ChemOffice позволило выявить реагент, с помощью которого получаются наилучшие результаты — щелочной травитель с добавками органических и неорганических компонентов (изопропилового спирта, пероксида водорода, лакгозы и т. п.), а комбинация различных методов травления (реактивно-ионного и жидкостного химического травления) позволила получить сложные объемные фигуры травления с более высоким качеством.

При конструировании компенсаторов углового раstra разработано новое техническое решение, которое обеспечило образование прямых углов при анизотропном химическом травлении кремниевых пластин с ориентацией поверхности (100) на глубину более 150 мкм. Хорошо известны такие конструкции компенсаторов углового раstra, как «квадрат», «елочка», «ласточкин хвост» и т. д. (рис. 5.6). Квадратная конструкция (рис. 5.6, *а*) позволяет компенсировать угловой растр при малых глубинах травления и достаточно больших расстояниях между травящимися поверхностями, другие оригинальные конструкции компенсаторов позволяют получать объемные фигуры травления с углами необходимой формы (рис. 5.7, *б*). Полученные таким образом элементы датчика имеют большую жесткость конструкции, лучшую воспроизводимость заданного размера, меньшую наведенную парезитную емкость.

На рис. 5.8 представлены фотографии элементов одной из микромеханических конструкций. Расчетная толщина балок

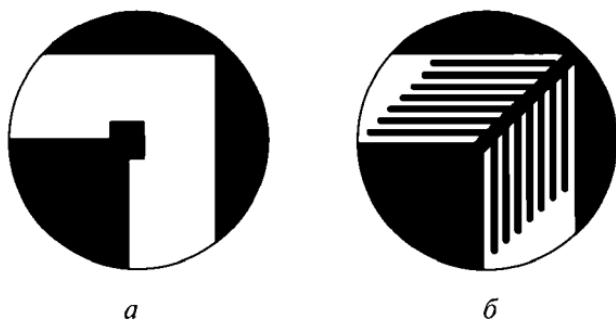


Рис. 5.6. Компенсаторы раstra внешних углов для анизотропного химического травления кремниевых пластин:

а — типа «квадрат»; *б* — типа «елочка»

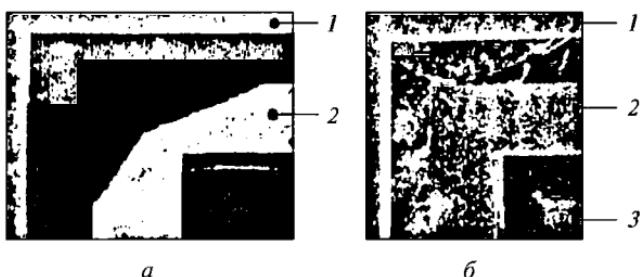


Рис. 5.7. Фотографии фрагмента рамочной микроконструкции с раствором (a) и (б):

1 — основание; 2 — внешняя рамка; 3 — внутренняя рамка. Внешний угол рамки без раствора получен с использованием разработанного компенсатора; расстояние между элементами 1, 2, 3 составляет 400 мкм

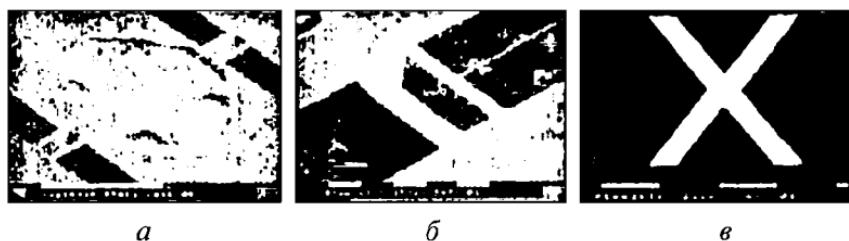


Рис. 5.8. Фрагменты вибрационной системы микромеханического датчика угловой скорости:

а — вид внутреннего элемента; б — вид на торсион;
в — поперечное сечение торсиона

торсиона, согласно конструкции, составляла 40 мкм. Контроль чипов, размещенных на пластине, выявил, что разброс толщины балок торсиона не превышает 1 мкм, что с учетом эквивалентной глубины травления кремния, равной ~ 360 мкм, составляет менее 1%. На рис. 5.9 приведены фотографии фрагментов волнового микрогироскопа, изготовленного из кремния (а), и резонатора чувствительного элемента из Al_2O_3 (б).

Разрабатываемые конструкции и изготовленные образцы **микроакселерометров** (рис. 5.10) опираются на возможности разработанных технологических процессов. На рис. 5.11 приведена упрощенная схема фрагмента механической части чувствительного элемента микроакселерометра, разработанной по заказу РПКБ (г. Раменское). В представленной конструкции размер кремниевого элемента составляет 5×3 мм, зазор между кремнием и алюминиевой обкладкой конденсатора — 3 мкм.

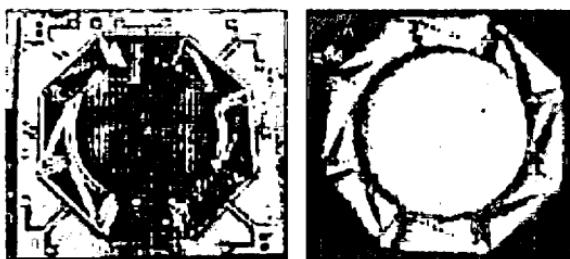
*a**b*

Рис. 5.9. Фотографии элементов волнового микрогироскопа:
а — фрагмент заготовки кремниевой колебательной системы; *б* — резонатор волнового микрогироскопа из Al_2O_3

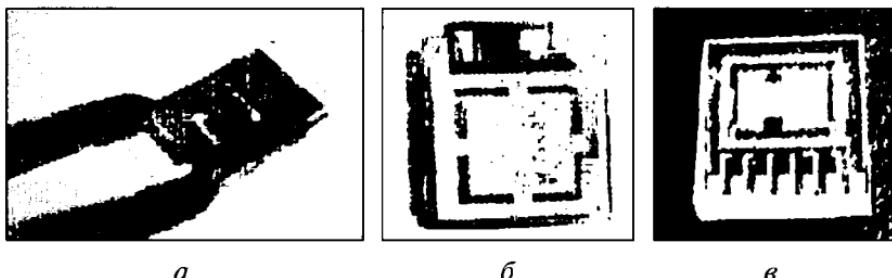
*a**b**c*

Рис. 5.10. Фотографии микроакселерометров, изготовленных на основе различных структур:

- а* — стекло—кремний—фольга—кремний—стекло;
- б* — стекло—кремний—стекло;
- в* — кремний—стекло

Расчетная жесткость упругих перемычек маятника обеспечивает касание упоров при действии линейного ускорения величиной $2g$. Датчик выдерживает удар величиной более $125g$. Цифрами на рис. 5.11 указаны габаритные размеры разработанного чувствительного элемента, а буквами — корректируемые размеры, которые рассчитываются в зависимости от толщины используемой пластины, необходимого размера торсиона и желаемых параметров приборов.

Наиболее известными среди микромеханических датчиков являются датчики **абсолютного и относительного давления**. Конструкции ЧЭ интегральных преобразователей давления (ИПД) с тензорезистивным способом получения полезного сигнала, серийно выпускаемых в НПК «Технологический центр», показаны на рис. 5.12.

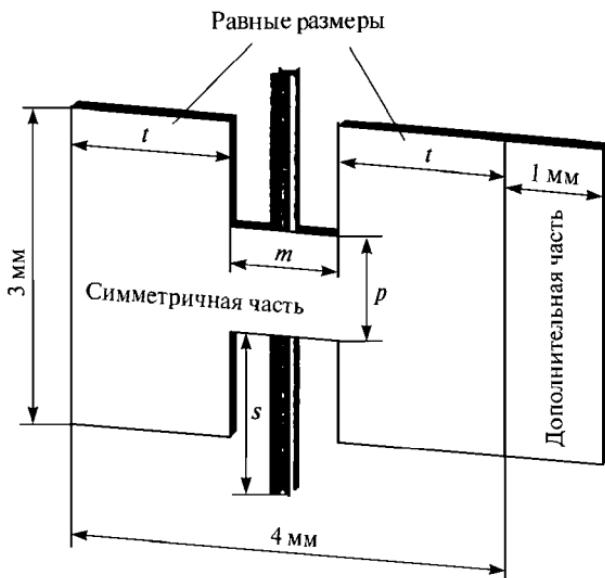


Рис. 5.11. Схема чувствительного элемента акселерометра

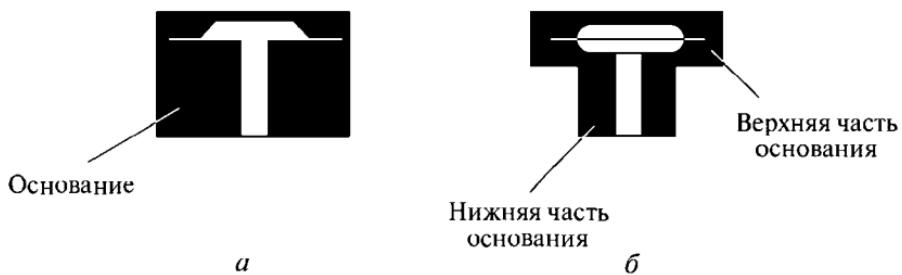


Рис. 5.12. Схема ЧЭ интегральных преобразователей давления:
а — традиционная конструкция основания;
б — составная конструкция основания

Одной из ключевых операций изготовления ЧЭ датчиков давления является операция срашивания. Разработка процесса срашивания элементов с использованием слоя многокомпонентного легкоплавкого стекла на основе системы $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ проводилась в МИЭТ (г. Москва, Зеленоград). Там же разрабатываются конструкции и технологии резонаторных датчиков давления, основанные на измерении частоты колебаний (или добротности) системы при деформациях, вызываемых изменением давления или связанных с изменением демпфирования. При этом для всех упомянутых конструкций используются раз-

работанные технологические процессы срашивания через слои стеклообразных материалов. Достоинством подобных конструкций является высокая точность измерений.

Перспективным направлением применения многослойных структур, получаемых методом срашивания подложек стекло—стекло и кремний—стекло, являются **микрофлюидные чипы** для микроаналитических систем, используемых в химии, биологии и для многих других прикладных областей науки. Конструкция микрочипов состоит из рабочей подложки с микроканалами, которые формируются методами химического или плазмохимического травления, и второй подложки, срашиваемой с рабочей подложкой анодной сваркой или с использованием легкоплавких расплавов многокомпонентных стекол.

Одними из наиболее сложных микромеханических устройств, интенсивно развивающихся и разрабатываемых в настоящее время в МИЭТ, являются **подвижные элементы микрозеркал** — составляющих оптоэлекторных устройств (рис. 5.13).

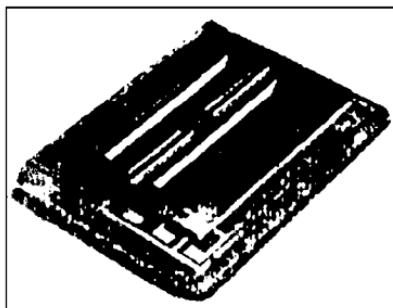


Рис. 5.13. Фотография микромеханического зеркала

Характеристики микромеханических гироскопов и акселерометров. Технология изготовления элементов датчиков на принципах объемной и поверхностной микромеханики во многом базируется на комплексе операций, традиционно используемых в микроэлектронике, а также специфических операциях, позволяющих формировать механические элементы и многослойные структуры. От возможностей технологии, качества изготовления ЧЭ и используемых материалов во многом зависят точностные параметры проектируемых и изготавливаемых приборов.

Исследования воспроизводимости ЧЭ микромеханических датчиков и их точностных параметров показали, что результаты

существенным образом зависят от технологических разбросов при изготовлении приборов. В микромеханических гироскопах с добротностью несколько десятков тысяч единиц для обеспечения приемлемой точности (порядка $1-10^{\circ}/\text{ч}$) должна быть обеспечена регистрация линейных перемещений порядка единиц и десятков нанометров. При перемещениях механической части чувствительного элемента порядка нескольких ангстрем входная часть электроники емкостной системы съема сигнала должна обеспечивать разрешение порядка $10^{-21} \Phi$. В этом случае размещение электронной системы съема сигнала в одном кристалле с чувствительным элементом является необходимым условием, позволяющим реализовать подобное разрешение, так как в противном случае будет невозможно избавиться от паразитных емкостей, на порядки превышающих изменения рабочей емкости при механическом перемещении ЧЭ.

Исходя из вышесказанного очевидна необходимость развития нанотехнологий для МЭМС и НЭМС, обеспечивающих получение заданных размеров чувствительных элементов с более высокой точностью, чем достигаемых при химическом травлении кремния.

Характеристики микромеханических вибрационных гироскопов (ММВГ) и микромеханических акселерометров (ММА) во многом определяются конструктивными решениями и состоянием разрабатываемой и используемой технологии. В процессе изготовления ЧЭ ММВГ необходимо получать информацию о добротности колебательной системы, собственных частотах колебаний рамок подвеса, АЧХ ЧЭ микрогоископа, величине масштабного коэффициента преобразования угловой скорости в выходное напряжение системы съема сигнала, случайной угловой скорости дрейфа в режиме прямого преобразования и т. д.

Добротность подвесов внутренней и внешней рамок может определяться двумя методами: методом свободных затухающих колебаний после воздействия одиночного возбуждающего импульса и методом амплитудно-частотных характеристик, при этом вынужденные колебания обеспечиваются с помощью электростатического двигателя. Исследуется также зависимость добротности от напряжения смещения, подаваемого на электроды датчиков силы.

По экспериментальным данным добротность колебательного контура вычисляется по формуле:

$$Q = \pi/D.$$

Здесь D — декремент затухания колебаний, определяемый как $D = \ln(A_i/A_{i+1})$, где A_i и A_{i+1} — амплитуды соседних колебаний; i — целые числа.

Собственные частоты колебаний рамок также определяются методами свободных и вынужденных колебаний. Исследуется зависимость собственных частот от напряжений смещения, подаваемых на силовые электроды датчиков силы.

Масштабный коэффициент ММВГ и его скорость дрейфа измеряется в режиме прямого преобразования АЧХ определяется в рабочем режиме гироскопа методом подачи на электроды датчика гармонического момента с изменяемой расстройкой по частоте относительно ее собственной (рабочей) частоты. На рис. 5.14 представлена типичная запись выходного сигнала с усилителя датчика угла одной из колеблющихся рамок ММВГ для процесса возбуждения и затухания ее собственных колебаний, а на рис. 5.15 представлена АЧХ рамки изготовленного ММВГ. Для измерения масштабного коэффициента использовался поворотный стол ИПП-902АП с диапазоном изменения угловых скоростей от $0,01^\circ/\text{с}$ до $1000^\circ/\text{с}$. Случайная скорость дрейфа масштабного коэффициента ММВГ оценивалась в диапазоне частот от 0 до 100 Гц. В этих исследованиях применялись платы сбора и обработки данных LCard — L-780, L-783, а также программное обес-

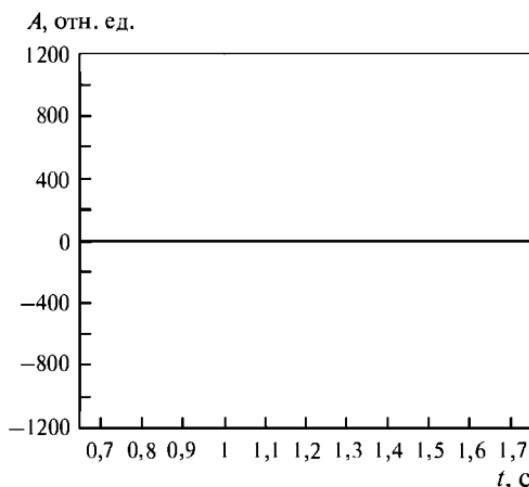


Рис. 5.14. Запись экспериментальной зависимости амплитуды колебаний от времени ($t = n / (4 \cdot 10^5)$, n — количество отсчетов при частоте дискретизации $4 \cdot 10^5$ отсчетов в секунду)

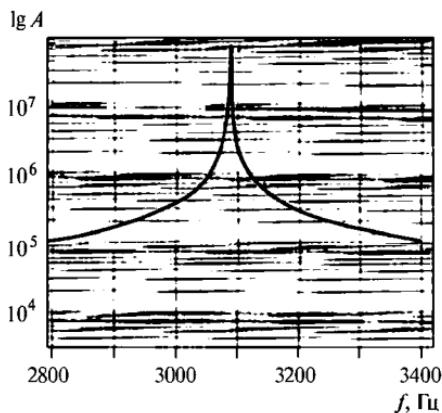


Рис. 5.15. Запись экспериментальной зависимости логарифма амплитуды от частоты колебаний

печенье для обработки и представления результатов измерений на основе пакетов программ MatLab, LabView, Visual DSP++.

Разработанный технологический процесс изготовления механической платы обеспечивает получение колебательного контура ЧЭ с частотой собственных колебаний от 1900 до 3500 Гц и выдерживание необходимых частот подвесов рамок с заданной между ними расстройкой порядка 40 Гц. Погрешность выдерживания частот между образцами, измеренная по нескольким сериям образцов ММВГ составляет не более 3%, погрешность выдерживания заданной расстройки по частоте в образце — не более 10%. При изменении напряжения смещения на электродах ММВГ в пределах 0–50 В собственные частоты уменьшаются от номинальных значений на величину порядка 100 Гц. Погрешность реализованного метода измерения частот подвеса не превышала 0,3 Гц. Добротность подвеса составляла не менее 5000 при давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и уменьшается до 500 при давлении $1,3 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Максимальная добротность колебательного контура достигла величины 70000, при этом погрешность измерения добротности в эксперименте не превышала 2,5%. На рис. 5.16 изображена экспериментальная зависимость амплитуды выходного сигнала от угловой скорости вращающегося основания.

Величина экспериментально измеренного масштабного коэффициента для различных образцов ММВГ составляла от 7 до 50 мВ/(°/с) при коэффициенте усиителя емкостной системы съема сигнала порядка 100. Максимальная угловая скорость, из-



Рис. 5.16. Зависимость амплитуды выходного сигнала чувствительного элемента микрогироскопа от скорости вращения основания

меряемая гироскопом в экспериментах, достигала $500^{\circ}/\text{с}$ и ограничивалась не возможностями ММВГ, а ограничениями применяемого оборудования. Среднее квадратичное отклонение сигнала, рассчитанное для полосы частот $0\text{--}10 \text{ Гц}$ [при масштабном коэффициенте, равном $40 \text{ мВ}/(^{\circ}/\text{с})$] составило $0,35 \text{ мВ}$, что соответствует случайному дрейфу ММВГ $0,009^{\circ}/\text{с}$.

Таким образом, экспериментально полученные метрологические характеристики ММВГ, изготовленных в МИЭТ (табл. 5.1), дают уверенность в возможности разработки на его основе блока бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) с уровнем погрешностей по координатам 50 м за 150 с автономной работы.

Таблица 5.1

Основные характеристики колебательной системы и некоторые параметры ЧЭ микромеханического гироскопа (разработка МИЭТ)

Параметр	Экспериментальные данные
Частота собственных колебаний системы, Гц	1990–3500
Добротность колебательного контура	500–70000
Масштабный коэффициент ММВГ, мВ/($^{\circ}/\text{с}$)	7–50
Диапазон измеряемых угловых скоростей ММВГ, $^{\circ}/\text{с}$	150; 250; 500
Случайный дрейф нуля ММВГ, $^{\circ}/\text{ч}$	36–360

Микромеханические навигационные системы можно проектировать и на базе микромеханических акселерометров (ММА), результаты экспериментальных исследований которых приведены в табл. 5.2.

На рис. 5.17 приведены фотографии изготовленных ЧЭ микрогироскопов различных конструкций в сборке.

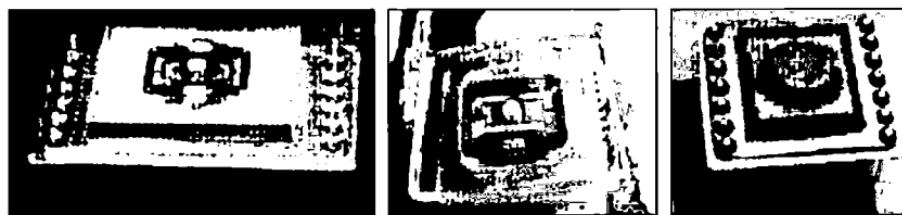
Таблица 5.2

**Основные характеристики разрабатываемых
микроакселерометров (разработка—МИЭТ)**

Параметр	Диапазон измеряемых ускорений	
	3 g	45–50 g
Спектральная плотность шума	$(1\text{--}3) \cdot 10^{-5} \text{ г/Гц}^{1/2}$	$(3\text{--}5) \cdot 10^{-4} \text{ г/Гц}^{1/2}$
Дрейф нулевого сигнала, не более	$2,4 \cdot 10^{-3} \text{ г/ч}$	$4 \cdot 10^{-2} \text{ г/ч}$
Нелинейность статической характеристики при 20 °C	0,2%	1%
Масштабный коэффициент	1,2 В/г	2 В/диапазон
Напряжение питания	$5^{\pm 2,0} \text{ В}$	$5^{\pm 2,0} \text{ В}$
Энергопотребление	< 10 мВт	< 10 мВт
Оси чувствительности	одна	одна

Перспективы улучшения характеристик ММВГ и MMA определяются в основном возможностями конструкции используемой электроники и в значительной степени технологией изготовления, которая должна совершенствоваться в направлении развития наноэлектроники и наномеханики, позволяющей перейти от МЭМС к НЭМС (НОЭМС).

Однако даже сегодняшние возможности технологии позволяют уменьшить величину случайного дрейфа ММВГ до величины



a

b

c

Рис. 5.17. Фотографии ЧЭ микрогироскопов:

а — в МГГ в металлокстеклянном корпусе; *б* — в стеклянном корпусе;
в — в металлокстеклянном корпусе

порядка $1^{\circ}/\text{ч}$ и даже меньше. Это возможно пугем увеличения добротности подвеса до величин порядка 10^5 , что вполне реализуемо при вакуумировании полости подвеса до 10^4 мм рт. ст., оптимизации связи подвеса с датчиком угла, использования малошумящего предварительного усилителя. Введение режима компенсационного измерения позволит расширить частотный диапазон до величин порядка 100 Гц, при этом диапазон измеряемых угловых скоростей потенциально может достигать порядка $1000^{\circ}/\text{с}$. Режим контроля линейного ускорения позволит одновременно значительно уменьшить погрешность ММВГ от этого параметра и обеспечит возможность его измерения с точностью, удовлетворяющей ряду задач автономной навигации и управления подвижными объектами.

Результаты экспериментальных исследований разработанных и изготовленных ЧЭ приборов убеждают в правильности реализации физико-химических основ разработанных технологических процессов и теоретических моделей и демонстрируют успешность практического воплощения этих, одних из наиболее сложных в настоящее время, элементов микроэлектромеханических систем. Полученные результаты можно использовать для конструирования новых и оптимизации параметров существующих ММВГ и ММА с целью улучшения их метрологических характеристик и применения в различных объектах.

Технология изготовления элементов МЭМС и НЭМС с применением современных методов сухого травления. В настоящее время успешно разрабатываются новые технологии микромеханики и наноэлектроники для изготовления высоконадежных микросенсоров, полевых эмиттеров и оптических приборов, прецизионных мембран, фильтров и биологических устройств. Для этих технологий наиболее значимыми требованиями являются: управление скоростью травления и достижение максимально высоких ее значений, управление профилем травления, высокая селективность, качественная поверхностная морфология, изготовление микроструктур с минимальной шириной линий, высоким аспектным отношением и большой глубиной, отсутствие нарушений, вызываемых травлением. Также важны такие характеристики, как плотность, чувствительность и быстродействие формируемых приборов. Все это обуславливает поиск новых решений в технологии сухого травления. Некоторые удачные результаты, достигнутые в этом направлении, приведены на рис. 5.18.

Как было отмечено ранее, обычные системы РИТ неприемлемы для изготовления современных устройств с высокоаспек-

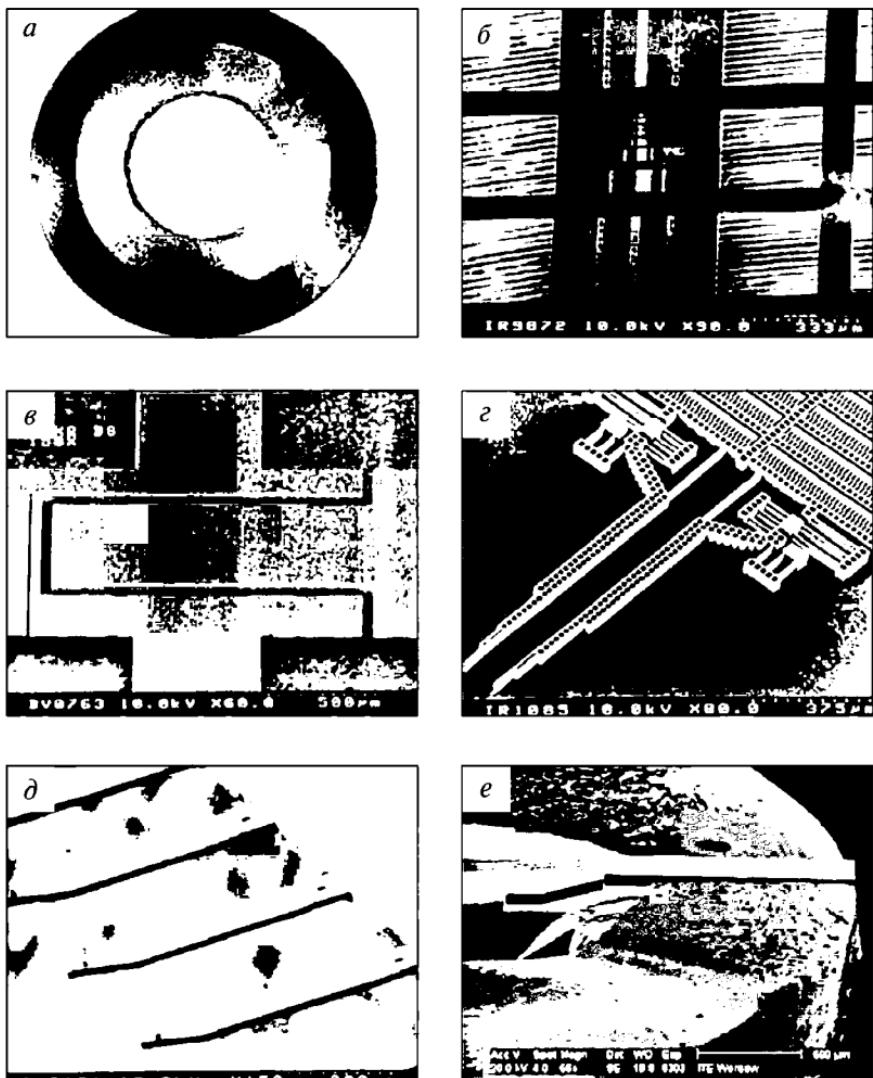


Рис. 5.18. Примеры микроэлектромеханических систем и микромеханических устройств, изготовленных методом переменной модуляции газа (Bosch-процесс):

ионно-проекционная литография маски (а) диаметром 100 мм и толщиной 4,5 мкм, изготовленной из 100 мм кремниевой пластины, и ее увеличенные детали (б); тяжелая ионно-проекционная имплантация кремниевой фотомаски (в) толщиной приблизительно 100 мкм с наименьшей шириной структуры 20 мкм; электростатический привод микрозажима (г); консольный массив для атомно-силовой микроскопии для космической миссии ESA-Midas/Rosetta (д); отдельный консольный силовой датчик (е), изготовленный травлением через кремниевую мембранны, которая определяет толщину консоли

тными структурами, для изготовления которых требуется независимое управление энергией ионов и плотностью потока ионов и нейтральных частиц. Эта проблема решается только использованием источников плазмы высокой плотности (HDP) и независимым ВЧ-питанием нижнего электрода-подложкодержателя.

Одним из примеров современных перспективных систем сухого травления является система с источником плотной плазмы на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) и ВЧ-смещением нижнего электрода-подложкодержателя. СВЧ-мощность через резонатор подается на внутренний ввод (рис. 5.19). В присутствии магнитного поля с индукцией до 875 Гс возникают условия для циклотронного резонанса, способствующего максимально эффективному поглощению СВЧ-мощности осциллирующими электронами, которые при ускорении ионизируют либо диссоциируют молекулы газов, подаваемых в реактор. Плотность ионного потока на подложкодержатель в такой системе достигает величины до 10 mA/cm^2 , а диапазон энергии ионов регулируется от 0 до нескольких сот электронвольт независимо от плотности потока. Близкими характеристиками обладают описанные ранее

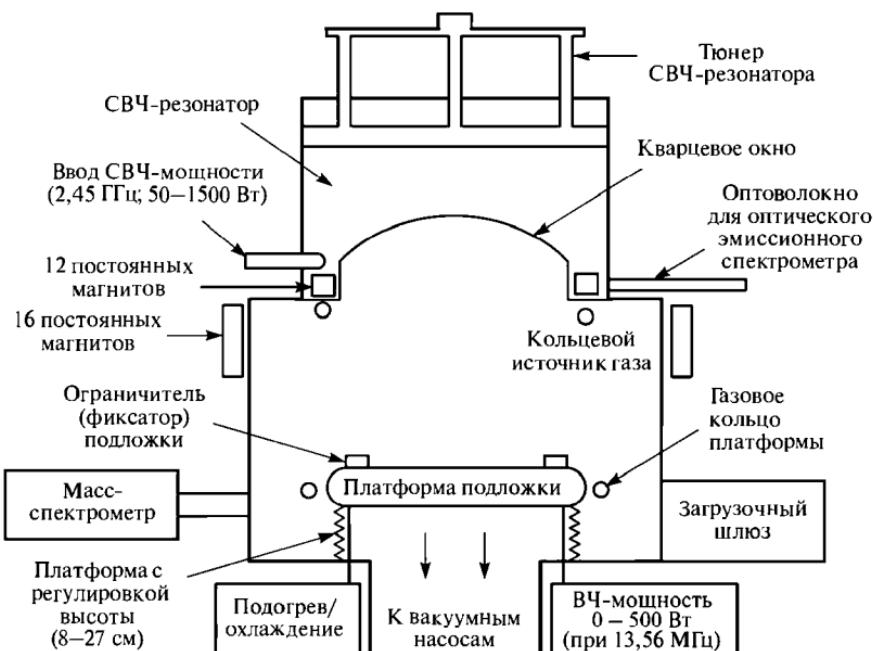


Рис. 5.19. Конструкция реактора с ЭЦР-источником плазмы

(см. раздел 2.3.5.6) системы с TCP- либо ICP-источниками плазмы. Системы с ЭЦР-, TCP- и ICP-источниками плазмы работают при разных рабочих давлениях — от 10^{-2} до десятков и сотен паскалей, что позволяет решать широкий спектр технологических задач.

5.2. Сухое травление полимеров

Полимерные материалы широко используются для изготовления полупроводниковых приборов и микросенсоров: пленки полимеров применяются в микролитографии при формировании изображения или рисунка топологии, а в процессах электрохимического осаждения металлов или формирования рисунка керамических сенсоров они играют роль микрошаблонов. Сухое травление позволяет формировать любой желаемый рисунок в пленке полимера [1]. Основными требованиями к сухому травлению полимеров являются высокая скорость травления, высокая селективность, вертикальный профиль и широкий диапазон регулирования параметров травления.

5.2. 1. Характеристики травления для толстых слоев полимеров

Толстые слои полимерных пленок осаждаются методом центрифугирования, а рисунок формируется с помощью сухого травления. В качестве маски для травления толстого слоя полииамида марки Pyralin PI-2611 используются маска титана и фоторезиста, например, AZ5214. Полииамидная пленка наносится на подложку методом многостадийного центрифугирования с последующим мягким многостадийным отжигом на ИК-плите для удаления растворителей и окончательным отжигом в печи при 380°C в течение часа. Для исключения растрескивания толстых полимерных пленок температура в печи растет медленно, со скоростью $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Слой Ti-пленки толщиной 300 нм осаждается на поверхность полииамида испарением либо магнетронным распылением для использования в качестве маски для травления полииамида. Топологический рисунок первоначально формируют в фоторезистивной маске, а затем переносят в слой Ti методом РИТ в плазме газовой смеси $\text{Ar}-\text{BCl}_3$. В плазме O_2 титан окисляется с образованием тонкого и стойкого слоя TiO_x .

Оптимизация сухого травления полииамида направлена на обеспечение высокой скорости травления, анизотропии и селективности к маске. Данные технологические параметры зависят от подводимой СВЧ-мощности, мощности ВЧ-смещения и завися-

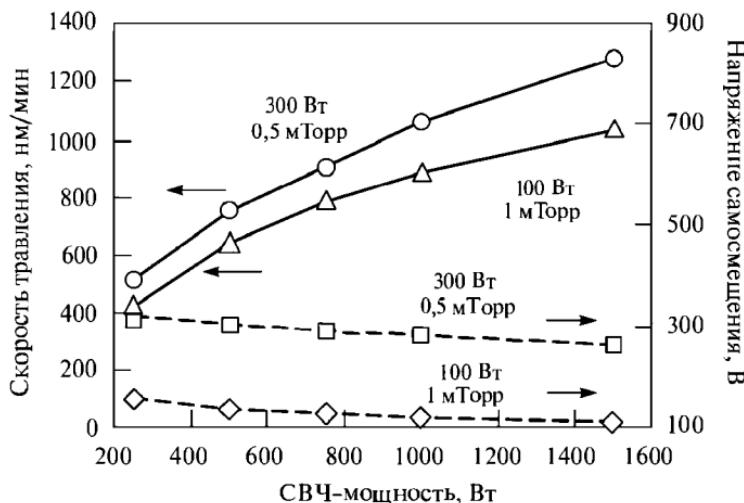


Рис. 5.20. Зависимость скорости травления полииамида и напряжения самосмещения от СВЧ-мощности при различных значениях мощности ВЧ-смещения и рабочих давлений (указаны над кривыми)

щего от нее напряжения самосмещения, рабочего давления и расхода газов (рис. 5.20). Для систем ЭЦР характерно достижение более высоких скоростей и больших значениях автосмещения при более низких давлениях (при этих условиях обеспечивается высокая анизотропия). В то же время высокие значения автосмещения снижают селективность травления, поэтому задача тех-

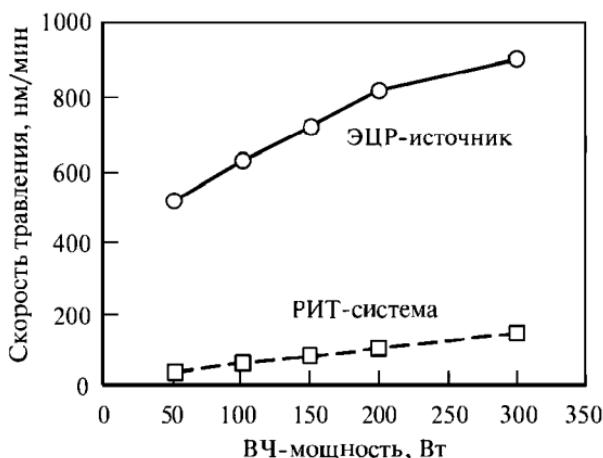


Рис. 5.21. Сравнение скорости травления полииамида в системах РИТ и ЭЦР

нологов заключается в подборе оптимальных условий для удовлетворения всего комплекса требований. Оптимальными значениями параметров для травления полиимида являются следующие: СВЧ-мощность 750 Вт, мощность смещения — 300 Вт, расстояние между подложкой и источником — 10 см, рабочее давление — 0,5 мТорр и расход кислорода — 20 см³/мин. Сравнение скорости и селективности травления для систем ЭЦР и РИТ приведено на рис. 5.21 и 5.22. Как следует из графиков, технологические характеристики ЭЦР-системы значительно выше, что является осо-

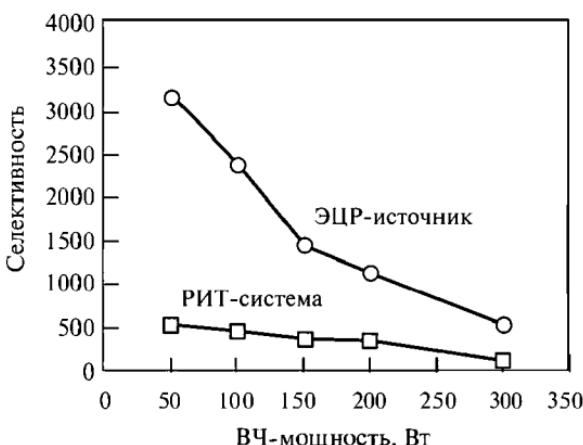


Рис. 5.22. Сравнение селективности травления полиимида в системах РИТ и ЭЦР

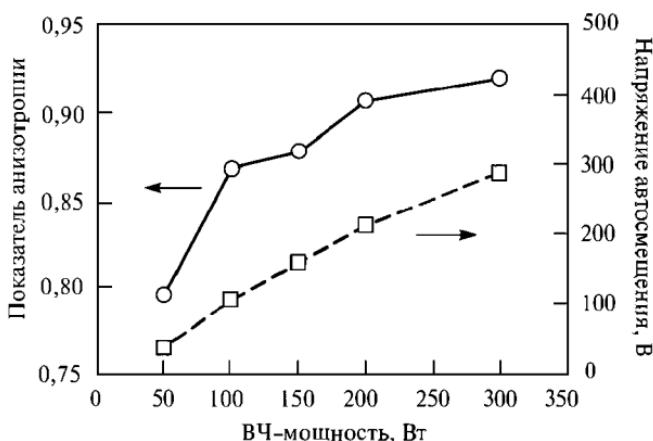


Рис. 5.23. Зависимость анизотропии и напряжения автосмещения от ВЧ-мощности. Рабочее давление — 0,5 мТорр; расход O₂ — 20 см³/мин; ВЧ-мощность в источнике — 750 Вт

бенно важным для формирования микросенсоров с высоким аспектным отношением.

Мощность ВЧ-смещения не только влияет на скорость травления, она сильно сказывается и на профиль травления. Профиль травления характеризуется показателем анизотропии (A):

$$A = 1 - V_{\text{гор}} / V_{\text{верт}},$$

где $V_{\text{гор}}$ — скорость горизонтального травления, $V_{\text{верт}}$ — скорость вертикального травления. При $A = 1$ профиль травления строго

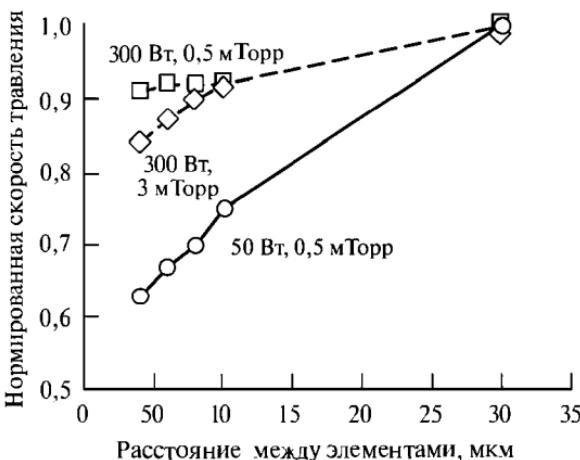


Рис. 5.24. Влияние размерных эффектов (расстояние между вскрытыми элементами) на скорость травления при различных значениях мощности ВЧ-смещения и рабочего давления (указаны над кривыми)

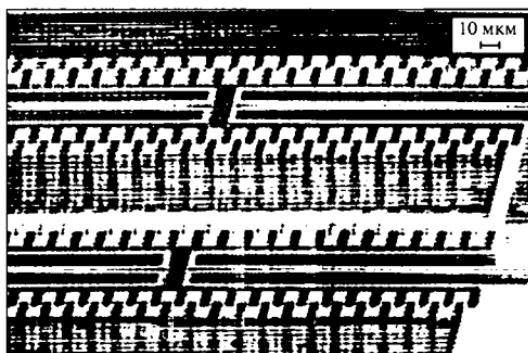


Рис. 5.25. Высокоаспектная микроструктура в полиимиде. Глубина травления — 32 мкм с минимальными зазорами в 1 мкм. Травление проводилось при 750 Вт в ЭЦР-источнике; напряжение смещения — 300 В, расход кислорода — 12,5 см³/мин

вертикальный; подтрав же снижает анизотропию. Зависимость анизотропии от ВЧ-мощности смещения приведена на рис. 5.23.

ВЧ-мощность и рабочее давление влияют также на зависимость скорости травления от аспектного отношения (рис. 5.24) и на морфологию поверхности. В системах ЭЦР более полирующее травление с меньшей зависимостью от аспектного отношения наблюдаются при более низких рабочих давлениях и при более высоком значении ВЧ-мощности смещения. На рис. 5.25 показана микроструктура с высоким аспектным отношением в пленке полимера, полученная с учетом выявленных особенностей процесса.

5.2.2. Электрохимическое осаждение никеля в полимерные микроструктуры

Для использования полимерных микрошаблонов в технологии электрохимического осаждения никеля в первую очередь оценивается зависимость скорости травления полимера от вскрываемых размеров. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5.23 и 5.24, позволил оптимизировать параметры травления и сформировать нужную микроструктуру: полиимидная пленка толщиной 32 мкм с минимальными размерами между элементами микроструктуры в 1 мкм с совершенно чистой (без загрязнений и сыпи) поверхностью, с вертикальным профилем как в области низкой плотности заполнения рисунка, так и в области высокой плотности.

На полученную структуру методом электронно лучевого испарения осаждалась двухслойная пленка Ti/Ni толщиной 25/5 нм. Для электрохимического осаждения Ni подложка помещается в специальный раствор на отрицательно заряженный электрод, а бруск Ni подключается к положительному потенциалу. Никель осаждается в электрохимической ванне с типичной скоростью 400 нм/мин при плотности тока, пропускаемого через раствор, равной 10 мА/см².

После электрохимического осаждения никеля через шаблон из полиимида и последующего удаления полиимидной пленки сформировалась резонансная структура акселерометра (рис. 5.26) с минимальным расстоянием между элементами металла в 1,3 мкм при толщине Ni-пленки, равной 14 мкм. Отметим, что чувствительность акселерометра повышается с уменьшением расстояния между элементами Ni.

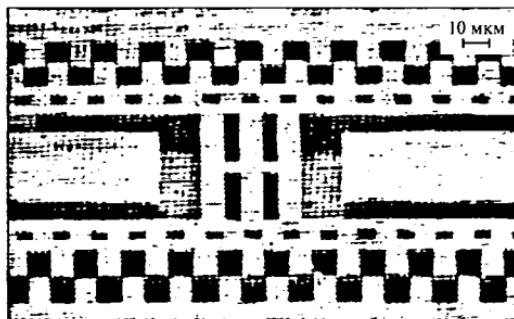


Рис. 5.26. Резонаторная структура из Ni, осажденного электрохимическим способом, с аспектным отношением 11 : 1. Металл осаждался при плотности тока величиной $5 \text{ mA}/\text{см}^2$ и температуре, равной 50°C

Итак, низкое рабочее давление и высокая плотность плазмы ЭЦР наилучшим образом подходят для получения вертикального профиля в толстой пленке полиимида (до 30–40 мкм).

5.2.3. Изготовление керамических микроструктур

Для получения ультразвукового изображения с хорошим разрешением можно использовать микроструктуры из пьезокерамики с высоким аспектным отношением. Для этого с использованием технологии сухого травления с целью формирования полимерных микрошаблонов репликацией переносят рисунок на специальную ленту с мелкодисперсным керамическим порошком с субмикронным размером зерна.

На рис. 5.27 приведено изображение полиимидного микрошаблона глубиной 30 мкм. Ширина линий варьируется от 4 до 25 мкм, при этом профиль травления является строго вертикальным и имеет гладкие стенки и дно. Микрошаблон прижимается на керамическую ленту, изготовленную из порошка церий-циркониевой смеси. В состав порошка входит 12% (мол.) CeO_2 и 88% (мол.) ZrO_2 со средним размером частиц 0,3 мкм. Прижатие происходит с помощью гидравлического пресса под давлением 20–30 МПа в течение 30 с. После сушки полиимидный микрошаблон отрывается от ленты, формируя обратное изображение в слое керамики. Далее лента с рисунком в керамическом слое медленно нагревается до 600°C для удаления клеющего наполнителя и затем отжигается при 1500°C в течение 60 мин. Отожженная керамика имеет зерно от 2 до 4 мкм и линейную усадку 20%. Ширина линий в негативном рисунке в керамике варьирует-

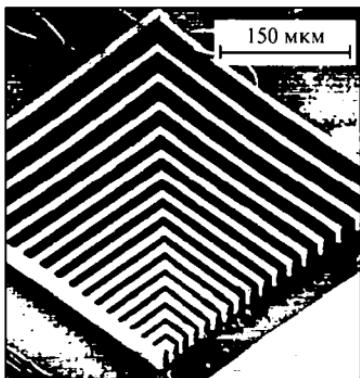


Рис. 5.27. Полиимидный микрошаблон глубиной 30 мкм, потравленный в плазме O_2 в установке с ЭЦР-источником плазмы. В качестве маски использовалась пленка Ti толщиной 200 нм. Селективность травления полиимида к маске лучше 1000 : 1

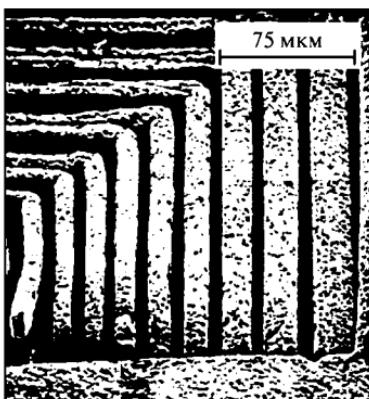


Рис. 5.28. Церий–циркониевая керамическая репликация с полиимидного микрошаблона, полученная после отжига при 1500 °С в течение 1 часа. Высота керамики — 25 мкм

ется от 7,5 до 22 мкм, а высота составляет 25 мкм с аспектным отношением от 1 до 3 (рис. 5.28). Пространство вне керамических линий — поверхность полимерной структуры.

5.3. Травление кремниевых микроструктур с высоким аспектным отношением

Технология сухого травления особенно необходима в производстве 3-мерных микромеханических приборов. Чувствительные элементы с большой высотой и минимальными расстояниями

между частями имеют преимущества, так как они повышают работоспособность приборов за счет увеличения электростатических сил между этими элементами. В силу этого разработка технологии травления Si с высоким аспектным отношением становится приоритетной.

Известно, что при использовании источников высокоплотной плазмы возможен процесс травления с высокими скоростями и высоким аспектным отношением. Хорошие результаты в этом плане были получены с использованием плазмы Cl₂ и ЭЦР-источника [36, 37]. Анизотропное травление кремниевых чувствительных элементов с получением вертикального профиля травления на основе этой технологии позволили избежать стадии полимерной пассивации стенок и проведение процесса при низких температурах.* В качестве маски для глубокого травления кремния используется электрохимически осажденный Ni, так как он наиболее удобен по селективности и минимальным механическим напряжениям, вносимым в структуру.

Для оптимизации процесса и его мониторинга во время травления разработчики пользуются такими диагностическими инструментами, как оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС), масс-спектрометрия (МС) и лазерная интерферометрия (ЛИ). На рис. 5.29 приведены зависимости скорости травления кремния, нормированной интенсивности оптического излучения Si и величины масс-спектрометрического сигнала $^{63}\text{SiCl}^+$ от вкладываемой СВЧ-мощности. При давлении 3 мТорр, расстоянии между ЭЦР-источником плазмы и подложкой, равном 8 см, и ВЧ-мощности смещения, составляющей 100 Вт, скорость травления возрастает от 84 до 406 нм/мин при увеличении СВЧ-мощности от 50 до 1500 Вт. Причем нормированная интенсивность эмиссионного сигнала Si увеличивается в 7 раз, тогда как величина сигнала $^{63}\text{SiCl}^+$ — всего в 3 раза. Относительно более низкий рост интенсивности сигнала $^{63}\text{SiCl}^+$ обусловлен более высокой степенью разложения продуктов травления. В данной системе в случае травления с использованием Cl₂ было установлено, что при более высокой СВЧ-мощности образуется более высокое содержание химически активных частиц, приводящих к уходу (искажению) размеров.

■ Подробно изучая далее тонкости данной технологии, сразу оговоримся, что для получения кремниевых микроструктур с высоким аспектным отношением проводятся исследования и с другими реагентами, источниками плазмы и способами травления.

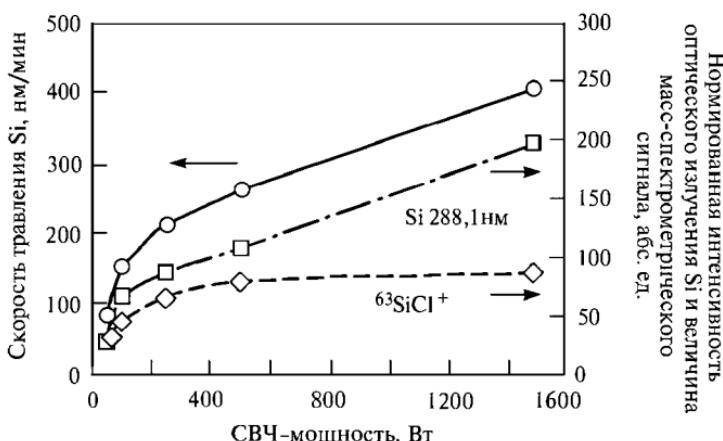


Рис. 5.29. Зависимости скорости травления кремния, оптического сигнала кремния (288 нм), нормированного по аргону (294 нм), и интенсивности масс-спектрометрического сигнала $^{63}\text{SiCl}^+$ от СВЧ-мощности. Рабочее давление процесса — 3 мТорр, мощность смещения — 100 Вт, расход Cl_2 — 20 см³/мин

СВЧ-мощность используется для управления плотностью ионного потока, а ВЧ-мощность — для управления энергией ионов, за счет напряжения самосмещения. Скорость травления и селективность управляются ВЧ-мощностью. Для высокоаспектного глубокого травления кремниевых микроструктур важно, чтобы скорость травления Si и селективность травления к маске были высокими. В ситуации возрастания ВЧ-мощности от 50 до 300 Вт скорость травления возрастает от 101 до 216 нм/мин. Хотя высокое значение ВЧ-мощности желательно для высокой скорости травления, необходимо учитывать, что селективность травления при этом падает.

Возможность применения нескольких видов масок для плазмы Cl_2 проиллюстрирована на рис. 5.30. Было установлено, что напыленный никель дает более высокую селективность, чем электроосажденный, а диоксид кремния проявляет наименьшую селективность среди трех видов масок. Но напыленный Ni не используется как маска, потому что он дает высокие механические напряжения, которые ограничивают толщину осаждаемой пленки величиной менее 200 нм. Селективность напыленного и электроосажденного Ni уменьшается от 53 и 35 до 13 и 10 соответственно при росте ВЧ-мощности от 50 до 300 Вт. Селективность маски SiO_2 при том же росте ВЧ-мощности уменьшается с 9 до 7,

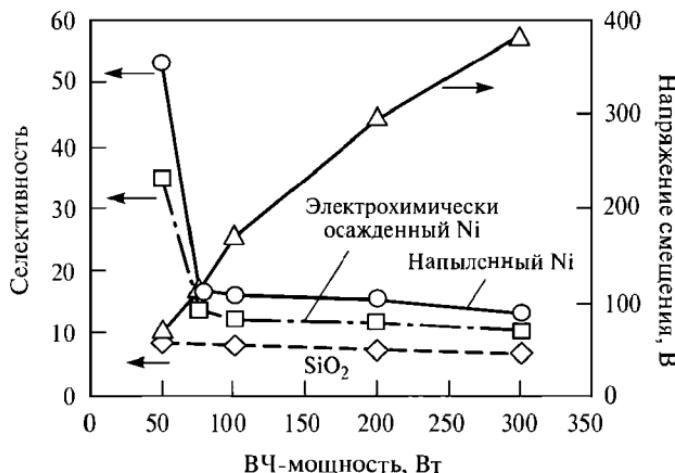


Рис. 5.30. Зависимость селективности травления кремния к напыленному Ni, электрохимически осажденному Ni и термической SiO_2 от ВЧ-мощности смещения. Давление — 3 мТорр; расход Cl_2 — 20 $\text{см}^3/\text{мин}$; СВЧ-мощность — 1000 Вт

оставаясь во всем диапазоне ниже, чем у Ni. Следовательно, в плазме Cl_2 никель является более подходящей маской, чем SiO_2 . Существенное уменьшение селективности Ni наблюдается при увеличении ВЧ-мощности от 50 до 75 Вт. Это может означать, что в этом диапазоне мощности наблюдается пороговая энергия распыления Ni. Хотя селективность максимальна при ВЧ-мощности в 50 Вт, этот режим не используется из-за низкой скорости травления. Для определенных значений ВЧ-мощности профиль травления Si вертикальный и не зависит от значения ВЧ-мощности.

Элементы МЭМС-приборов находятся друг от друга на расстояниях от 1 мкм до нескольких сотен мкм, поэтому важно знать, как на скорость травления влияют размеры вскрываемых структур. В исследовании, посвященном этой задаче, образцы располагались в реакторе на расстоянии 3 см ниже источника ЭЦР и травились на глубину 10 мкм при следующих условиях: СВЧ-мощность — 100 Вт, ВЧ-мощность — 100 Вт и расход Cl_2 — 20 $\text{см}^3/\text{мин}$. Скорость травления Si была нормирована по скорости травления Si в открытом пространстве шириной 30 мкм. Нормированная скорость травления уменьшалась от 1 до 0,95 и от 1 до 0,86 при изменении ширины канавки от 10 до 1,5 мкм и давлении 3 и 50 мТорр соответственно (рис. 5.31).

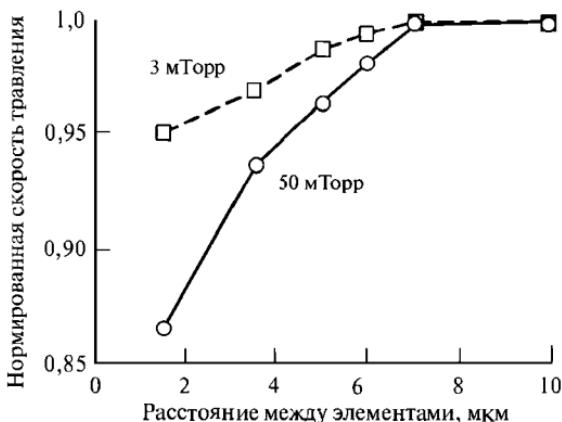


Рис. 5.31. Влияние расстояния между элементами на скорость травления кремния для двух значений рабочих давлений

Падение скорости травления материалов с узкими зазорами в топологии может быть вызвано уменьшением концентрации реактивных частиц, попадающих на дно канавки, или ростом сложности удаления продуктов травления. В условиях более низких давлений, которые соответствуют коротким временем задержек реагентов при фиксированной скорости протока газа, уменьшение скорости травления для структур с высоким аспектным отношением менее важно. В случае более высокого давления реактивные частицы имеют больше столкновений до того как достигают поверхности образца. Поэтому угловое рассеяние реактивных частиц больше и большее их количество попадает на стенки канавки, приводя в результате к уменьшению скорости травления для топологии с узкими зазорами. Это нежелательно, так как для изготовления сенсоров требуется большое время перетрава, что в свою очередь может привести к разрушению маски. С другой стороны, трудность удаления продуктов травления при высоком аспектном отношении вызывает необходимость увеличения скорости протока газа для подавления времени задержки реагентов и снижения эффекта микрозагрузки. Более того, при более высокой скорости расхода газа было установлено небольшое снижение эффекта микрозагрузки при прочих равных условиях.

Так как скорость травления Si зависит от аспектного отношения канавки, то текущая скорость травления уменьшается по ходу травления (по мере увеличения аспектного отношения канавки). При травлении с аспектным отношением более двух,

средняя скорость травления Si уменьшается в соответствии с простой линейной зависимостью: $R = 156 - A$, где R — средняя скорость травления; A — аспектное отношение. Для канавок с аспектным отношением менее двух средняя скорость травления приблизительно постоянна (рис. 5.32).

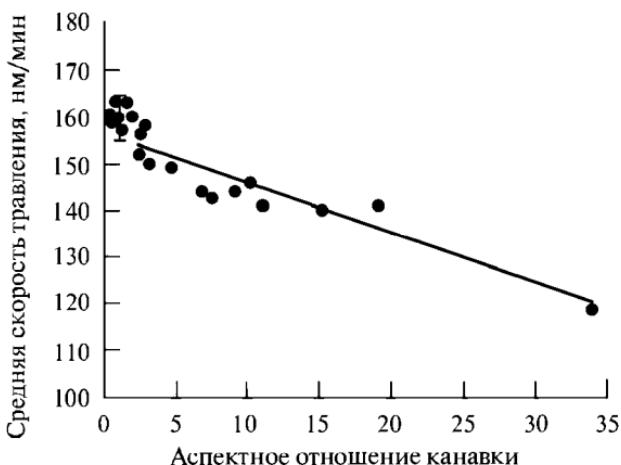


Рис. 5.32. Влияние аспектного отношения на среднюю скорость травления канавок в кремнии. Вскрываемая ширина — 2, 3, 5, 20 и 50 мкм, СВЧ-мощность — 100 Вт, расход Cl_2 — 20 см³/мин, давление — 3 мТорр

Давление может существенно сказываться на направленности реактивных частиц и на балансе между реакциями травления и осаждения в процессе сухого травления. По мере увеличения давления с 3 до 30 мТорр скорость травления для канавок шириной 2 мкм падает с 151 до 124 нм/мин, а для канавок шириной 10 мкм скорость уменьшалась лишь с 163 до 141 нм/мин. При более низких давлениях эта разность нивелируется.

На рис. 5.33. представлены экспериментально полученные зависимости ширины подтрава от рабочего давления. При увеличении давления от 3 до 30 мТорр величина подтрава увеличивалась с 0,12 до 0,86 мкм при ширине канавки в 2 мкм и от 0,05 до 0,75 мкм при ширине 10 мкм. Аналогичные кривые были получены расчетным путем — с помощью модели SPEEDIE оценивалось влияние давления на направленность движения ионов (ширина подтрава). Для диапазона давлений от 3 до 30 мТорр количество ионов с углом расходимости не более 3° приблизительно одинаковое, а количество ионов с большим углом расходимости

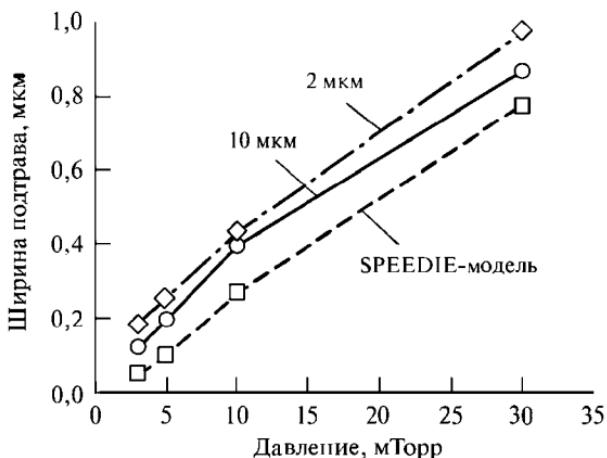


Рис. 5.33. Зависимость ширины подтрава от давления при глубине травления 15 мкм

димости при давлении 30 мТорр более чем на порядок выше, чем при 3 мТорр. Уширение углового распределения ионов при большем давлении может вызывать увеличение скорости травления в горизонтальном направлении.

Еще один снимок кремниевой микроструктуры с высоким аспектным отношением как результат реализации оптимальных условий травления показан на рис. 5.34. Для этой структуры аспектное отношение равно 19, глубина травления составляет 28 мкм, минимальное расстояние между элементами достигает до 1,5 мкм, а протравленная структура имеет вертикальный профиль и чистую морфологию поверхности. Длительность процесса в этом случае

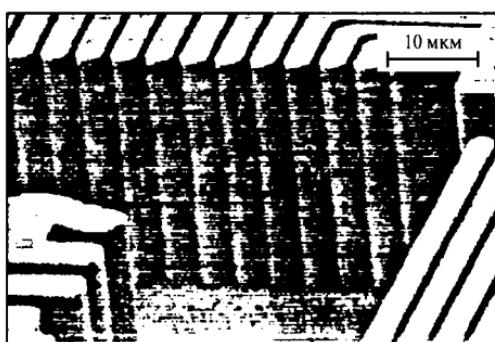


Рис. 5.34. Микроструктура Si, протравленная на глубину 28 мкм с шириной зазоров в 1,5 мкм

составляла 185 мин. Скорость травления можно повысить, увеличив СВЧ- и/или ВЧ-мощность, но это приводит либо к подтраву, либо к снижению селективности, что нежелательно для травления микроструктур с высоким аспектным отношением. Нет никаких сомнений в том, что в ходе дальнейших исследований, направленных на поиск путей для увеличения скорости травления при сохранении вертикального профиля и высокой селективности, приведут к получению микроструктур с меньшими вскрываемыми размерами и большей глубиной.

Несмотря на низкие скорости травления при использовании хлорной плазмы с ЭЦР-источником плазмы, на основе данной технологии можно изготавливать приборы МЭМС высокого качества.

5.3. 1. Технология глубокого травления с мелким диффузионным переходом

Необычное решение травления кремниевой подложки для изготовления микроструктур в монокристалле Si изложено в работе [38]. Согласно этой технологии сначала формируется p^{++} -стоп-слой для жидкостного травления, который получают диффузией бора на небольшую глубину. Далее формирование микроструктуры осуществляют сухим травлением с последующим жидкостным травлением, которое прекращается на p^{++} -слое. В случае использования для сухого травления процесса РИТ толщина микроструктуры ограничена величиной 10 мкм (для уменьшения вероятности возникновения подтрав стоп-слой не должен быть слишком тонким).

В новом процессе глубокого травления с диффузией на небольшую глубину, но приводящего при этом к формированию значительно более толстой кремниевой микроструктуры, на первом этапе используется ЭЦР-процесс сухого глубокого травления канавок в Si с малыми линейными размерами, далее выполняется диффузия бора. На втором этапе выполняется сухое травление для удаления диффузионных слоев с горизонтальных участков микроструктуры. После этого образец приклеивается на стекло и травится в растворе этилендиамин—пирокатехола (ЭДП) до полного удаления нелегированного кремния.

Наглядно ознакомиться с этим перспективным процессом позволяет рис. 5.35. Образцы изготавливались на кремниевых подложках диаметром 100 мм, легированных бором ($1\text{--}3 \Omega \cdot \text{см}$), толщиной 550 мкм. Сначала подложки травились в растворе KOH

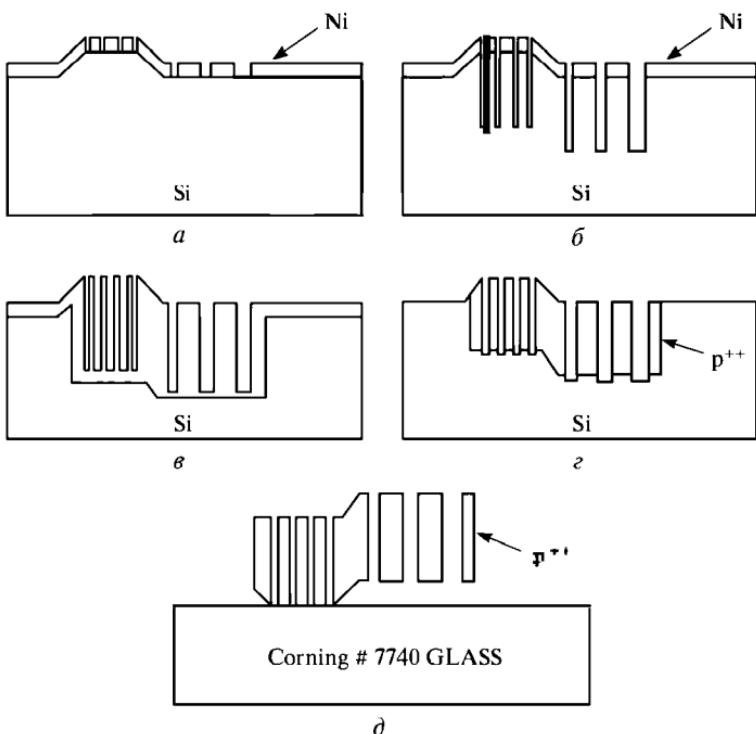


Рис. 5.35. Последовательность изготовления структуры методом глубокого анизотропного травления и легирования в канавки

с маской SiO_2 толщиной 400 нм для формирования связанных анкоров глубиной 4 мкм. Далее на поверхность методом напыления наносятся слои Ti (25 нм) и Ni (5 нм). После формирования рисунка никель осаждается электрохимическим способом через фоторезистивную маску для проведения сухого травления Si (*а*). (Для травления Si на глубину 40 мкм (*б*) требуется маска электрохимического Ni толщиной 2 мкм.) После глубокого травления Si и удаления маски в HCl проводится диффузия В (*в*) для формирования в структуре p^{++} -слоев. На следующем этапе с горизонтальными участков методом сухого травления удаляется легированный слой (*г*). Для надежного удаления легированного слоя на дне канавки в этом процессе необходим 5%-перетрав. Далее пластина переворачивается, устанавливается на носитель и утоняется до 300 мкм в растворе $\text{HF} - \text{HNO}_3$. После этого пластина анодным способом приклеивается к специальному стеклу (*д*) и помещается

в раствор ЭДП для полного удаления нелегированного кремния. Описанный процесс позволяет изготавливать резонансные элементы с высоким аспектным отношением, узкими щелями и большой толщиной. При этом он легко моделируется и позволяет сформировать специальную высокоаспектную структуру из высоколегированного кремния при значительном сокращении времени диффузии.

5.3.2. Особенности изготовления кремниевых горизонтально управляемых резонаторов

В предлагаемой конструкции резонаторов наиболее широкая шина имеет линейный размер 12 мкм. Для легирования шины такой ширины до уровня p^{++} необходима диффузия бора в течение 3,5 ч. Так как p^{++} -слой образуется и на дне структуры резонаторов, то на втором этапе процесса необходимо удаление этого слоя. Режим травления кремния соответствует режиму травления на первом этапе процесса изготовления резонаторов, только теперь травление проводится без маски. На рис. 5.36 показана микроструктура p^{++} -Si высотой 40 мкм и зазором 2 мкм между элементами резонатора. Длительность травления для удаления слоя p^{++} на дне канавок с 50%-м перетравом составила 1,5 ч. На последней стадии в течение 30 мин проводится жидкостное травление нелегированного кремния до предварительно протравленной легированной микроструктуры. Такой способ легирования требует всего 5,5 ч вместо обычных 50 ч.

На рис. 5.37 приведен общий вид микросенсора, резонаторная структура которого была изготовлена по данной технологии с последующей электростатической приклейкой на стекле.



Рис. 5.36. Вид отдельной сформированной кремниевой микроструктуры высотой 40 мкм. Образец претерпел операции сухого травления на 40 мкм, диффузии бора в течение 5,5 ч, второго травления кремния для удаления легированного кремния на дне и травления в течение 30 мин в растворе ЭДП

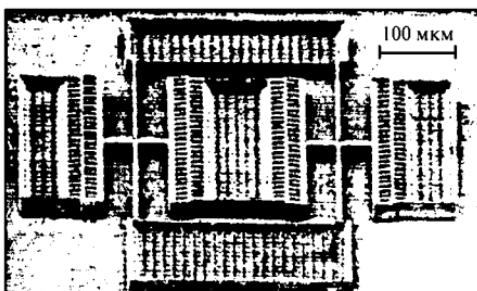


Рис. 5.37. Кремниевая резонаторная структура микросенсора толщиной 30 мкм, изготовленная по новой технологии и приклеенная на стеклянный носитель

Такой радиатор обладает хорошими электрическими характеристиками: резонансная частота составила 2,49 кГц с коэффициентом добротности Q , равным 23, а переменное напряжение 5 В, наложенное на 5 В постоянного напряжения, является управляющим напряжением для возбуждения колебаний с амплитудой 2,5 мкм. Кроме повышенной работоспособности таких высоких резонаторных приборов с малыми зазорами элементов за счет появления больших электростатических сил, эти приборы имеют преимущество с точки зрения механических напряжений и более высокого сопротивления силе левитации.

5.4. Полевые кремниевые эмиттеры с заостренным верхним концом

Приборы с полевыми эмиттерами, в которых электроны эмитируются с острого наконечника под воздействием сильного электрического поля, находят все большее применение в различных отраслях, включая мониторы с плоскими экранами, микроволновые катодные трубы, миниатюрные СВЧ-приборы, источники ионизации, мощные ВЧ-приборы. Мониторы с плоскими экранами, работающие на эффекте полевой эмиссии, представляют большой интерес, так как позволяют достичь высокого разрешения, малой толщины и веса, низкого потребления мощности и хорошего качества цветовой гаммы. Кроме того, приборы с полевыми эмиттерами обеспечивают более резкую частотную отсечку, меньшую температурную чувствительность и лучшую радиационную стойкость, чем другие твердотельные микроэлектронные приборы. Благодаря своей температурной

независимости, полевые эмиттеры являются превосходными структурами для микросенсорного применения и также могут использоваться как источники электронов для сканирующего электронного либо туннельного микроскопа, систем электронно-лучевой литографии. Ввиду сильной зависимости полевых эмиттеров от величины электрического поля, они должны быть по возможности максимально острыми, ведь острые полевые эмиттеры позволяют работать при низких напряжениях. Эмиттеры большой высоты позволяют иметь более низкие внутренние емкости и частотные характеристики с более высокими отсечками. Этим и обоснованы требования к их конструкциям: острые концы, большая высота и высокая плотность упаковки.

Есть несколько методик изготовления полевых эмиттерных наконечников, из которых наиболее часто используемыми являются испарение через малые отверстия и травление кремниевых эмиттеров. Первый метод обычно требует наклона и вращения образца во время напыления. Во втором случае как правило применяют жидкостное химическое травление — кремний с ориентацией поверхности (111) травят анизотропно по кристаллографическим осям. Но только при использовании сухого травления возможно получить высокую плотность упаковки и наиболее острые иглы полевых эмиттеров.

5.4. 1. Регулирование профилей эмиттеров с применением сухого травления кремния

Прецизионный метод формирования кремниевых эмиттеров в ЭЦР-плазме Cl₂ рассмотрен в работе [39]. Для формирования заостренных верхних концов применялась технология эрозии края маски SiO₂. Используя маску диоксида кремния с различными профилями стенок и настраивая условия травления, добивались изменения латеральной скорости травления маски и получали кремниевые эмиттеры с различными профилями стенок по высоте. Оказалось, что горизонтальная скорость травления маски SiO₂ и профиль травления Si сильно зависит от ее первоначального профиля (рис. 5.38).

Для изготовления Si-эмиттеров по технологии эрозии маски маска должна использоваться до конца процесса и быть полностью эродирована в самом его конце. Поэтому ширина и высота маски должны выбираться в соответствии с вертикальной и горизонтальной скоростями травления маски и окончательной шириной кремниевого эмиттера. Управление этими характе-

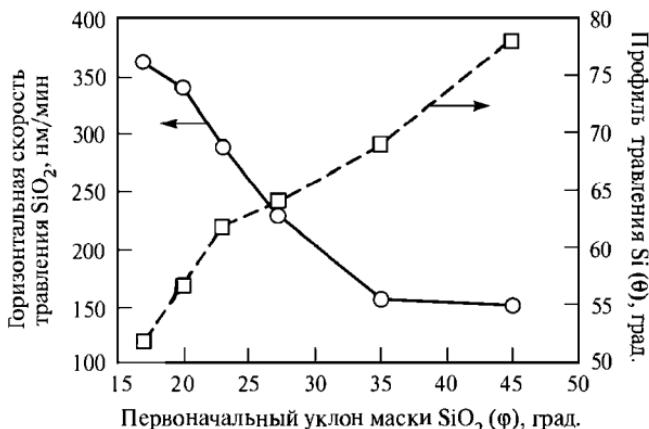


Рис. 5.38. Зависимость латеральной скорости травления SiO_2 и профиля травления Si от предварительного профиля маски: СВЧ-мощность — 250 Вт; ВЧ-смещение — 200 Вт; рабочее давление — 2 мТорр; расход Cl_2 — 20 см³/мин

ристиками было реализовано варьированием ВЧ-мощности и рабочего давления процесса травления. Соответствующие зависимости, позволившие оптимизировать технологию эрозии маски, отражены на рис. 5.39–5.41. Из приведенных зависимостей видно, что для формирования наклонного профиля травления Si необходимы более низкие давления (порядка 0,7 мТорр), а для перехода к более вертикальному и селективному травлению процесс проводится уже при давлении 10 мТорр.

На рис. 5.42 приведены два варианта реализации Si эмиттеров. Радиус кривизны в верхней части эмиттера после окончательной

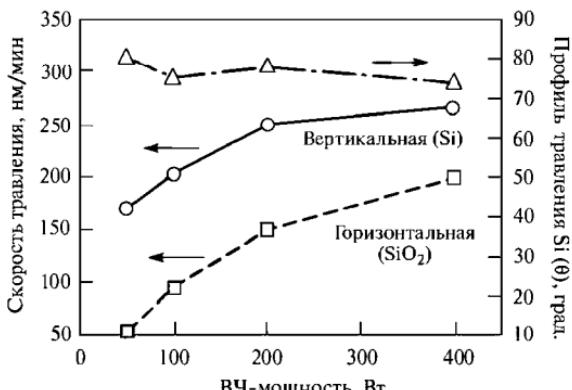


Рис. 5.39. Зависимости скорости травления Si , SiO_2 и профиля травления Si от ВЧ-мощности



Рис. 5.40. Зависимости вертикальной и горизонтальной скорости травления Si , SiO_2 от давления для различных исходных углов маски

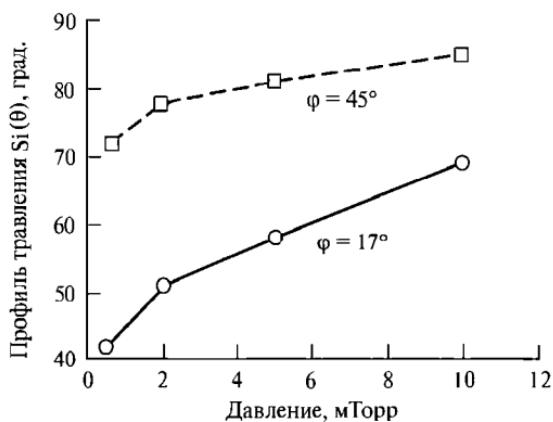


Рис. 5.41. Зависимость профиля травления Si от давления

эрозии и удаления маски составил около 67 нм. Однако далее эмиттер можно дополнительно заузить. После дополнительного травления в плазме Cl_2 в течение 2 мин при давлении 0,7 мТорр угол кривизны эмиттера уменьшился до 30 нм.

Альтернативным способом получения острых эмиттеров с радиусом кривизны менее 50 нм является окисление поверхности иглы либо термически, либо в плазме с последующим удалением оксида в буферном травителе $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$ или в плазме CF_4 . Результаты исследования этих процессов и изображения концов эмиттеров до и после заострения отражены на рис. 5.43 и 5.44.

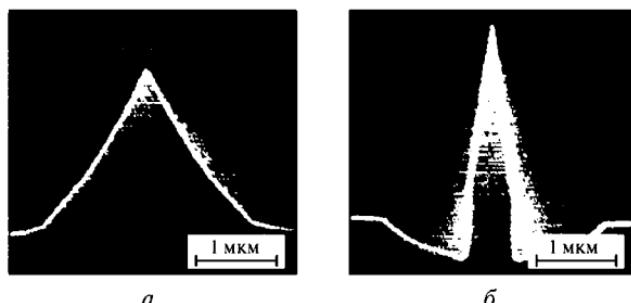


Рис. 5.42. Изображение кремниевых эмиттеров, полученные на сканирующем электронном микроскопе, при рабочем давлении 0,9 мТорр, профиле маски SiO_2 23° (а) и 10 мТорр и 38° соответственно (б). Режим травления: СВЧ-мощность — 250 Вт; ВЧ-смещение — 400 Вт; расход Cl_2 — 20 см³/мин

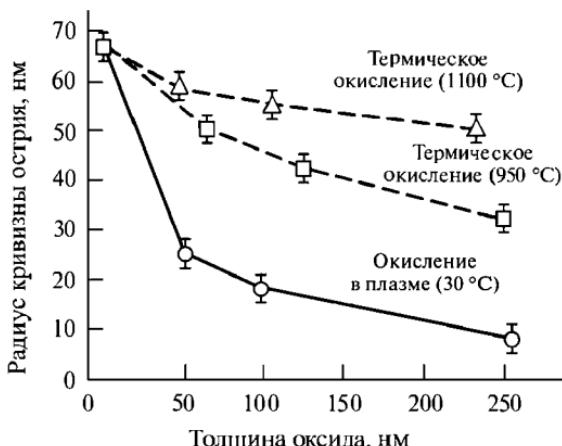


Рис. 5.43. Зависимость радиуса кривизны иглы эмиттера Si от толщины оксида для различных способов окисления

На рис. 5.45 приведены снимки игл-эмиттеров кремниевой матрицы, сформированных двух-этапным травлением (с плазменным окислением и стравливанием) и одноэтапным травлением в плазме Cl_2 . Высота игл составила 11 мкм, их диаметр у основания — 2,2 мкм, плотность упаковки — $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Таким образом, управляя режимами травления и способами реализации технологии, можно получить практически любой желаемый результат.

Тем не менее, важно отметить, что реализация данной задачи возможна и совершенно другим способом — изотропным трав-

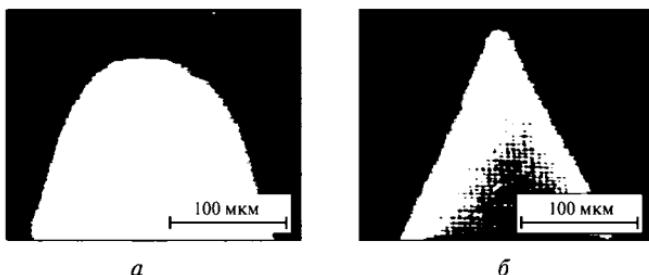


Рис. 5.44. РЭМ-изображения концов эмиттеров до окисления (а, радиус кривизны иглы 67 нм) и после окисления в плазме и удаления оксида в буферном травителе (б, 8 нм)

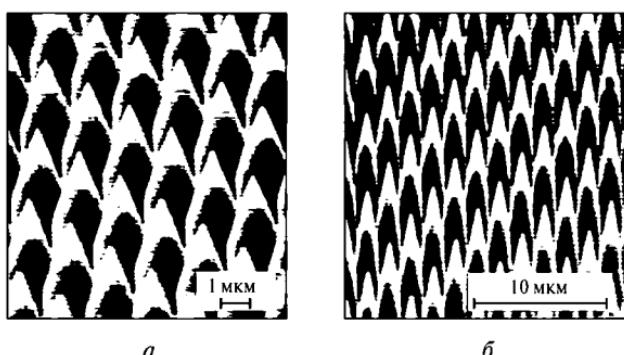


Рис. 5.45. Матрицы эмиттеров, полученные двух-этапным методом с плазменным окислением (а) и одноэтапным методом в плазме Cl₂ (б)

лением кремния под маской Si₃N₄ (130 нм) — SiO₂ (35 нм) с высокой равномерностью и переходом на режим анизотропного травления с высокой селективностью к Si₃N₄ в реакторе TCP. Данный процесс с высокими технологическими характеристиками разработан Галпериным В.А. на установке TCP 9400 фирмы LAM RESEARCH. На 1-й стадии в газовой смеси HBr—SF₆ при давлении 60 мТорр реализуется изотропное травление кремния с высокой равномерностью по пластине, на 2-м этапе в газовой смеси HBr—Cl₂—O₂ — высокоселективное анизотропное травление кремния на глубину до 7–9 мкм. После этого в плазме O₂—HBr—He осуществляется плазменное окисление поверхности кремния и, наконец, в плазме CHF₃ стравливаются все диэлектрические слои. В результате формируется матрица полевых эмиттеров с радиусом кривизны на конце до 10–15 нм. Весь

процесс реализован в едином вакуумном цикле, что является неоспоримым достоинством: обеспечиваются минимальный уровень привносимой дефектности и высокие технологические параметры. Кроме того, эмиттеры, изготовленные по данной технологии, более долговечны благодаря высокой вертикальной части.

5.4.2. Изготовление микрозеркал и лазеров с применением сухого травления

Достижения в области технологии микромеханики позволяют проводить интеграцию и микрооптических компонентов. Потенциальные области применения трехмерных микрооптических компонентов — это зажигание, питание, коммутация для быстрой передачи данных, а также пропускание/прерывание сигнала для систем передачи изображения с высоким разрешением. В сравнении с обычными оптическими дискретными компонентами, микромеханические оптические компоненты легко интегрируются и компонуются, что позволяет снижать стоимость их изготовления и настройки. Среди микрооптических компонентов микрозеркала и микролинзы являются двумя важнейшими устройствами для управления и раздвоения оптических лучей.

Для достижения минимального рассеяния лучей при изготовлении микрозеркал необходимо получать максимально гладкую боковую поверхность вертикальных стенок, используемых как поверхность зеркала. Необходимо учитывать, что при химическом травлении гладкость стенок зависит от кристаллографической ориентации поверхности, в то время как при сухом травлении достигаются более широкие технологические возможности.

Основным требованием к процессу сухого травления помимо высокой равномерности по пластине является высокая гладкость боковых стенок, формируемых при анизотропном травлении кремния. Процесс реализуется в ЭЦР-системе с использованием Cl₂-плазмы при давлении 3 мТорр и ВЧ-мощности 100 Вт за 2 ч. Глубина травления — 20 мкм. Немаловажно, что при специальном задубливании фоторезиста неровность края стенок уменьшается до 19 нм, в то время как при обычном дублении неровность края стенок составляет 30 нм. После сухого травления в плазме Cl₂ в ЭЦР-источнике неровность боковых стенок может быть дополнительно уменьшена путем термического окисления с последующим химическим удалением оксида. При этом неровность края боко-

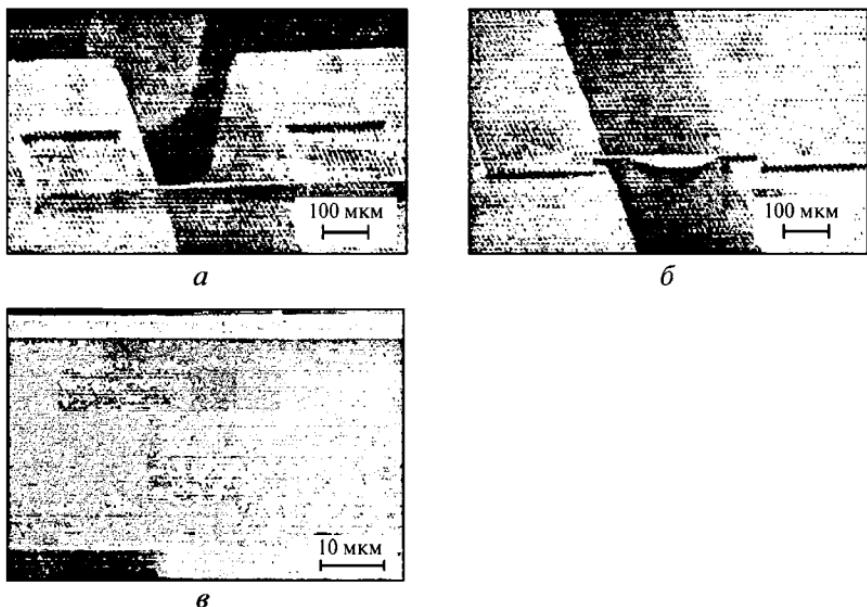


Рис. 5.46. РЭМ-изображения протравленной структуры: *а* — кремниевое микрозеркальце толщиной 40 мкм и шириной 2 мкм, углубленное в стекле на глубину 300 мкм; *б* — 40 мкм микролинзы с радиусом выпуклости 50 мкм; *в* — внешний вид зеркала; видны чистые и гладкие поверхности стенок и вертикальных профилей

вых стенок снижается до 10 нм. По данной технологии были изготовлены структуры микрозеркал из кремния, приклеенного на стеклянный носитель. На рис. 5.46 показаны два варианта изготовления микрозеркал — с предварительным углублением в стекле (*а*) и без него (*б*), а также вид сверху при оптимальных условиях проведения процесса.

Метод сухого травления применяется также при изготовлении микровпадин глубиной 3 мкм и диаметром до 0,3 мкм в структуре материалов соединений $\text{Al}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ для формирования линий оптической задержки, горизонтально распределенных Брэгговских зеркал с уровнем неровностей менее 6 нм при сочетании метода плазменного окисления и последующего стравливания. Разработчики МЭМС ожидают огромного прорыва в области оптической микроэлектроники при внедрении последних разработок в этой отрасли.

* * *

Основой для разработки микромеханических чувствительных элементов микросистемной техники является создание конструктивно-технологического базиса, основанного на технологиях микроэлектроники и разработанных специализированных технологических процессах. Важнейшими элементами разработки являются математическое моделирование элементов конструкции и процессов, исследование и разработка методик и средств измерения и контроля параметров изделий, анализ полученных результатов. Известным фактом развития микросистемной техники является тенденция перехода на уровень нанометровых размеров, что открывает новые существенные возможности. Способы прецизионной обработки элементов с наноразмерной точностью обеспечивают качественно новый уровень характеристик разрабатываемых микро- и наноприборов.

Проведенные исследования выявили, что создание теоретической базы как по конструкционным особенностям элементов, так и по технологическим процессам — это важная необходимая часть разработки современных технологий высокоточных микромеханических систем.

Представленные выше результаты разработки конструкций микрогироскопов, микроакселерометров, датчиков давления, микрозеркал, матриц полевых эмиттеров и технологических процессов их изготовления, а также предварительные экспериментальные исследования полученных образцов доказывают возможность получения хорошей воспроизводимости параметров приборов. Проведенные работы позволяют надеяться на достижение у ММВГ новых рекордных характеристик, в частности обеспечение случайной составляющей дрейфа не хуже $0,01^{\circ}/\text{с}$ в серийных образцах и достижение величины $1-0,1^{\circ}/\text{ч}$ для приборов, изготовленных на основе использования нанотехнологий и наноматериалов.

Литература

- 1.** *Choundrury P.*, ed. Handbook of microlithography & micromathining, v. 2 : Micromashining and microfabrication — USA : The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1997. 692 p.
- 2.** *Райзэр Ю.П.* Физика газового разряда — М. : Наука, 1986. 592 с.
- 3.** Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов — М. : Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
- 4.** *Behrisch R.* etc all. ed. Sputtering by particle bombardment // Topics in Applied Physics, V. 52. 391 p. — Berlin : Springer, 1983.
- 5.** *Абачев М.К., Барышев Ю.П., Валиев К.А., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А.* Формирование профиля при плазмохимическом травлении глубоких щелей в кремнии // Труды ФТИАН — М. : Наука, — 1991. Т. 2. — с. 49–65.
- 6.** *Айнспрук Н., Браун Д.* Плазменная технология в производстве СБИС — М. : Мир, 1987. 469 с.
- 7.** *Зи С.* Технология СБИС. Т. 1. — М. : Мир, 1986.
- 8.** *Невзоров П.И., Словецкий Д.И., Шелыхманов Е.Ф.* Методы исследования процессов плазмохимического травления // Электронная промышленность, сер. Технология — 1990. Вып. 2. С. 23–27.
- 9.** *Melliar-Smith C.M., Mogab C.J.* Thin Film Processes — NY : Academic Press, 1978. 497 p.
- 10.** *Mogab C.J.* // J. Electrochemical Society — 1977. — V. 124. — P. 437.
- 11.** *Coburn J.W., Winters H.F.* Conductance consideration in the reactive ion etching of high aspect ratio features // Appl. Phys. Lett. — 1989. Vol. 55. — №26. P. 2730–2732.
- 12.** *Kota G.P., Coburn J.W., Graves D.B.* // JVST. — 1999. — A17, 282.
- 13.** *Bolinger D.* et al. Reactive Ion Etching : its Basis and Future, p. 2 // SST. — June, 1984. P. 167–173.
- 14.** *Галперин В.А.* Исследование и разработка процессов прецизионного травления материалов в технологии производства БИС и СБИС : дис. ... канд. техн. наук — М.: МИЭТ. — 1990. 152 с.
- 15.** *Данилин Б.С., Сырчин В.К.* Устройства со скрещенными полями и перспективы их использования в технологии микроэлектроники // ЦНИИ «Электроника» — Москва, 1991. Вып. 2 (1619).

16. *Pelletier J.* et al. Distributed ECR Plasma sources : Reactor scale up and performance. In. : «Microwave plasma and its applications», ed. by Lebedev Y.A. — Moscow : The Moscow Phys. Soc., 1995. P. 352—365.
17. *Boswell R.W.* Very efficient plasma generation by Whistler waves near lower hybrid frequency // *Plasma Phys. And Contr. Fusion* — 1989. V. 26, №10. P. 1147—1162.
18. *Okumura T., Nakayama I.* New inductively plasma source using a multispiral coil // *Rev. Sci. Instrum.* — 1995. November, 66(11). P. 5262—5265.
19. *Орликовский А.А.* Плазменные процессы в микро- и наноэлектронике. Ч. 2 // Плазмохимические реакторы нового поколения и их применение в технологии микроэлектроники. — Микроэлектроника. 1999. Т. 28. №6. С. 415—426.
20. *Shich A.H., Demos A., Beer R.D.* Transformer coupled plasma etching for FPD manufacturing // *SST*. — 1996. P. 71—80.
21. *Mc Taggart F.K.* Plasma chemistry in electrical discharges — Elsevier : Amsterdam, — 1967. Chap. 1, p. 1—12.
22. Технология тонких пленок. Т. 2 / под ред. Майссела. — М. : Советское радио, 1977. 784 с.
23. *Зи С.* Технология СБИС. Т.2, — М. : Мир, 1986. С. 270—323.
24. *Зандерна А.* Методы анализа поверхностей — М. : Мир, 1979. 560 с.
25. *Vasile M.J., Stevie F. A.* Reaction of atomic fluorine with silicon: The gas phase products // *J. Appl. Phys.* — 1982. V. 53, P. 3799.
26. *Mogab C.J., Levinstein H.J.* Anisotropic plasma etching of polysilicon // *JVST* — 1980. V. 17, P. 721—730.
27. *Abachev M.K., Galperin V.A.* et al. Express Time-resolved Emission Actinometric Measurement of the Kinetic Parameters of Plasmochem. Reactions in an RF Discharge // *Russian Microelectronics* — 1997. V. 26, №3. P. 192—196.
28. *Flamm D.L.* et al. Basic chemistry and mechanisms of plasma etching // *JVST(B)* — 1983. V. 1 P. 23—30.
29. *Киреев В.Ю., Пашков В.Ю.* и др. Проблемы выбора конструкционных материалов реакторов плазмохимического травления // Электронная техника. — Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 65(145), 1991. С. 32—35.
30. *Chen F.F.* Plasma diagnostic Techniques — NY : Academic Press, 1965. 113 p.
31. *Cherlington B.E.* // *Plasma Chem. Plasma Process.* — 1982. V. 2, 113.
32. *Райз器 Ю.П.* и др. Высокочастотный емкостной разряд: физика и техника эксперимента — М. : МФТИ, 1995. 320 с.
33. *Sobolevsky M.A.* Measuring the ion current in electrical discharging using RF current and voltage measurements // *Appl. Phys. Let.* — 1998. V. 72. P. 1146—1148.
34. *Миронов В.* Основы сканирующей зондовой микроскопии — М. : Техносфера, 2004. 143 с.

35. Горшков М.М. Эллипсометрия — М. : Советское радио, 1974. 200 с.
36. Juan W.H. and Pang S.W. High Aspect Ratio Si Etching for Microsensor Fabrication // JVST — 1995. A13. P. 834–838.
37. Juan W.H. and Pang S.W. Control of Si Etch Profile for Microsensor Fabrication // JVST — 1996. A14. P. 1189–1193.
38. Gianchandani Y.B. and Najafi K. A bulk Si dissolved wafer process for microelectromechanical devices // IEEE J. of Microelectromech. Syst. — 1992. V. 1. P. 77–85.
39. Spindt C.A., Holland C.E., et al. Field emitter arrays applied to vacuum fluorescent displays // IEEE Trans. Electron. Devices. — 1989. V. ED-36. P. 225.
40. Валиев К.А., Орликовский А.А., Барышев Ю.П. и др. Новые субмикронные технологические процессы для сверхбыстро действующей КМОП- и БИКМОП-элементной базы высокопроизводительных ЭВМ // Труды ФТИАН. — 1994. Т. 8.
41. Лукичев В.Ф. Теоретическое исследование глубокого анизотропного травления кремниевых структур в низкотемпературной плазме: дисс. док. ф.-м. наук. — М. : 1997. 163 с.
42. Manenschijn A., Goedheer W.J. Angular ion and neutral distribution in a collisional rfsheath // J. Appl. Phys. — 1991. V. 69, №5. P. 2923–2930.
43. Singh V.K., Shaqfeh E.S.G. Simulation of profile evolution in silicon reactive ion etching with re-emission and surface diffusion // J. Vac. Sci. Technol. — 1992. V. B10, N3. P. 1091–1104.
44. Volland B.E., Ivanov Tzv., and Rangelow I.W. Profile simulation of gas chopping based etching processes // J. Vac. Sci. Technol. — 2002. V. B 20 (6). P. 3111–3117.
45. Pelka J. Three-dimensional simulation of ion-enhanced dry-etch processes // Microelectr. Eng. — 1991. V. 14. P. 269–281.
46. Абачев М.К. и др. Формирование профиля при плазмохимическом травлении глубоких щелей в кремнии // Труды ФТИАН — М. : Наука, 1991. Т. 2, с. 49–65.
47. Cotler T.J., Elta M.E. Reactive-ion-etch profile evolution determined by a Monte-Carlo microtopography model // J. Vac. Sci. Technol. — 1990. V. B8, N3. P. 523–528.
48. Абачев М.К., Лукичев В.Ф. и др. Формирование профиля при плазмохимическом травлении глубоких щелей в кремнии // Труды ФТИАН — М. : Наука, 1991. Т. 2, с. 49–65.
49. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Влияние коэффициента прилипания химически активных частиц к поверхности функционального слоя на качество изображения, формируемого в процессе сухого травления // Электронная техника — Сер. Электроника СВЧ. Вып. 8(356), 1983. С. 65–66.
50. Кустов В.Л., Пекарчук С.Б. Численное моделирование модификации поверхности функционального слоя при радиационно-сти-

- мулированном травлении // Электронная промышленность — Вып. 9(137), 1984. С. 32–38.
51. *Abachev M.K., Baryshev Yu.P., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A.* Aperture effect in plasma etching of deep silicon trenches // Vacuum — 1991. — V. 42, N1—2. P. 129–131.
 52. *Economou D.J., Alkire R.C.* Effect of potential field on ion deflection and shape evolution of trenches during plasma-assisted etching // J. Electrochem. Soc. — 1988. V. 135, N4. P. 941–949.
 53. *Arnold J.C., Sawin H.H.* Charging of pattern features during plasma etching // J. Appl. Phys. — 1991. V. 70, N10. P. 5314–5317.
 54. *Davis R.J.* Image potentials and the dry etching of submicron trenches with low energy ions // Appl. Phys. Lett. — 1991. V. 59, N14. P. 1717–1719.
 55. *Tachi S., Tsujimoto K., Okudaira S.* Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon // Appl. Phys. Lett. — 1988. V. 52, N8. P. 616–618.
 56. *Pelletier J.* Comment on «Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon» // Appl. Phys. Lett. — 1988. V. 53, N17. P. 1665–1667.
 57. *Belen R.J. et al.* Feature-scale model of Si etching in SF₆ plasma and comparison with experiments // J. Vac. Sci. Technol. (A) — 2005. V.23, P. 99–113.
 58. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаллыгина. — М. : Техносфера, 2005. 448 с.
 59. *Gomez S., Belen R.J., Kiehlbauch M., Aydil E.S.* Etching of high aspect ratio structures in Si using SF₆/O₂ plasma // J. Vac. Sci. Technol. — 2004. A 22, 606.
 60. *Cotler T.J., Barnes M.S., Elta M.E.* A Monte-Carlo microtopography model for investigating plasma reactive ion etch profile evolution // J. Vac. Sci. Technol. — 1988. V. B6, N2. P. 542–550.
 61. *Ulacia J.I., McVittie J.P.* A two-dimensional computer simulation for dry etching using Monte-Carlo techniques // J. Appl. Phys. — 1989. V. 65, N4. P. 1484–1491.
 62. *Pelka J., Weiss M., Hoppe W., Mewes D.* The influence of ion sputtering on dryetch profiles // J. Vac. Sci. Technol. — 1989. V. B7, N6. P. 1483–1487.
 63. *Fichelscher A., Rangelov I.W., Kassing R.* Simulation of reactive of ion-etching processes considering sheath dynamics // Mater. Sci. and Eng. — 1991. V. A139. P. 412–417.
 64. *Itoh F., Shimase A., Haraichi S.* Two-dimensional profile simulation of focused ion-beam milling of LSI // J. Electrochem. Soc. — 1990. V. 137, N3. P. 983–988.
 65. *Lii T.-J., Jorne J.* Redeposition during deep trench etching // J. Electrochem. Soc. — 1990. V. 137, N9. P. 2837–2845.

66. *Мартыненко Ю.В.* Взаимодействие плазмы с поверхностями // Итоги науки и техники. Физика плазмы. — М. : ВИНИТИ, 1982. Т. 3. С. 113.
67. *Bien V.T.* Surface mobilities on solid materials. — N.Y. : Plenum press, 1981. 493 p.
68. *Gerodolle A.F., Pelletier J.* Two-dimensional implication of purely reactive model for plasma etching // IEEE Trans. Electron Dev. — 1991. V. ED-38, N9. P. 2025–2032.
69. *Thoren Peter.* Simulation von A.tz- und Depositionsprozessen // Ph. D. thesis, Gesamthochschule Kassel — 1991.
70. *Reynolds J.L., Neureuther A.R., Oldham W.G.* Simulation of dry etched line edge profiles // J. Vac. Sci. Technol. — 1979. V. 16, N6. P. 1772–1775.
71. *Jewett R.E., Hagonel P.I., Neureuther A.R., van Duzer T.* Line-profile resist development simulation techniques // Polimer Eng. Sci. — 1977. V. 17. 381 p.
72. *Shaqfeh E.S.G., Jurgensen C.W.* Simulation of reactive ion etching pattern transfer // J. Appl. Phys. — 1989. V. 66, N10. P. 4664–4675.
73. *Амироп И.И., Шумилов А.С.* Моделирование формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом циклическом процессе «травление-пассивация» // Микроэлектроника — 2007. Т. 36, №4, с. 277–287.
74. *Абачев М.К., Барышев Ю.П., Валиев К.А., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А.* Исследование формирования профилей глубоких канавок при плазмохимическом травлении кремния // Микроэлектроника — 1989. Т. 18, N3, с. 278–281.
75. *Abachev M.K., Baryshev Yu.P., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A.* Modelling of deep silicon etching in multicomponent plasma // Vacuum. — 1992. V. 43, N5-7. P. 565–566.
76. *Кустов В.Л., Пекарчук С.Б.* Метод численного расчета профиля в процессе сухого травления поверхности функционального слоя // Электронная техника. — Сер. Электроника СВЧ. Вып. 7(355), 1983. С. 50–53.
77. *Кустов В.Л., Пекарчук С.Б.* Кинетика и механизмы анизотропного радиационно-стимулированного плазмохимического травления // Электронная техника — Сер. Электроника СВЧ. Вып. 9(357), 1983. С. 52–57.
78. *Coburn J.W., Winters H.F.* Conductance considerations in the reactive ion etching of high aspect ratio features // Appl. Phys. Lett. — 1989. V. 66. P. 4664–4675.
79. *Gottsch R.A., Jurgensen C.W., Vitkavage D.J.* Microscopic uniformity in plasma etching // J. Vac. Sci. Technol. — 1992. V. B10, N5. P. 2133–2147.
80. *Lee Y.H., Zhou Z.H.* Feature-size dependence of etch rate in reactive ion etching // J. Electrochem. Soc. — 1991. V. 138, N8. P. 2439–2445.

81. *Gerodolle A., Pelletier J., Drouot S.* An improvement model of plasma etching including temperature dependence: comparison between simulation and experimental results // ESSDERC-90. — Nottingham, 1990. Session 3A5. P. 209—212.
82. *Tsujimoto K., Okudaira S., Tachi S.* Low temperature microwave plasma etching of crystalline silicon // Jap. J. Appl. Phys. — 1991. V. 30, N12A. P. 3319—3326.
83. Технология СБИС. В 2-х т. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. — М. : Мир, 1986. 483 с.
84. *Giapis K.P., Sceller G.R., Gotscho R.A., Hobson W.S., Lee Y.H.* Microscopic and macroscopic uniformity control in plasma etching // Appl. Phys. Lett. — 1990. V. 57, N10. P. 983—985.
85. *Ingram S.G.* The influence of substrate topography on ion bombardment in plasma etching // J. Appl. Phys. — 1990. V. 68, N2. P. 500—504.
86. *Pelletier J.* A model for the halogen-based plasma etching of silicon // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1987. V. 20, N7. P. 858—869.
87. *Chin D., Dhong S.H., Long G.J.* Structural effects on a submicron trench process // J. Electrochem. Soc. — 1985. V. 132, N7. P. 1705—1707.
88. *Gross M., Horwitz C.M.* Modeling of sloped sidewalls formed by simultaneous etching and deposition // J. Vac. Sci. Technol. — 1989. V. B7, N3. P. 534—541.
89. *Dohmae S., McVittie J.P., Rey J.C., Shafqeh E.S.G., Singh V.K.* Proceedings of the Symp. on Patterning Science and Technology II, ed. by W. Greene, G.J. Heffron, L.K. White. — Pennington, NJ : The Electrochemical Society, 1992. V. 92-6. 163 p.
90. *Баранцев Р.Г.* Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями — М. : Наука, 1975. 344 с.
91. *Гудман Ф., Вахман Г.* Динамика рассеяния газа поверхностью — М. : Мир, 1980. 423 с.
92. *Hamaguchi S. and Dalvie M. J.* // Vac. Sci. Technol. — 1994. A 12. P. 2745.
93. *Лукичев В.Ф.* Моделирование профилей при плазмохимическом травлении кремния // Труды ФТИАН — 1994. Т. 8. с. 37—49.
94. Плазменная технология в производстве СБИС / Под. редакцией Н. Айнспрука и Д. Брауна. — М. : Мир, 1987. 469 с.
95. *Данилин Б.С., Киреев В.Ю.* Ионное травление микроструктур — М. : Сов. Радио, 1979. 104 с.
96. *Flamm D. L., Donnelly V. M., Mucha J. A.* // J. Appl. Phys. — 1981. V. 52. P. 3633.

Оглавление

Предисловие редактора	3
Введение.....	5
Глава 1. Физико-химические основы процессов сухого (вакуумно-плазменного) травления.....	7
1.1. Плазма: определения, способы получения, основные процессы	11
1.2. Уравнение непрерывности для химически активных частиц в плазме.....	25
1.3. Основные стадии процессов сухого травления	27
1.3.1. Доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда	28
1.3.2. Переход молекул рабочего газа в энергетические и химически активные частицы	31
1.3.3. Доставка энергетических и химически активных газовых частиц к поверхности обрабатываемого материала.....	37
1.3.4. Взаимодействие энергетических и химически активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала.....	39
Глава 2. Технологические основы сухого (вакуумно-плазменного) травления	43
2.1. Основные технологические характеристики процессов травления и их взаимосвязь с физико-химическими параметрами.....	44
2.1.1. Предельно разрешенный размер	45
2.1.2. Анизотропность процессов ВПТ	46
2.1.3. Селективность	51
2.1.4. Неравномерность	54
2.1.5. Загрузочный эффект	54
2.1.6. Текстура поверхности.....	55
2.2. Факторы, определяющие основные технологические характеристики процессов ВПТ	56
2.2.1. Энергия ионного воздействия.....	56
2.2.2. Давление	59
2.2.3. Мощность газового разряда	60
2.2.4. Температура стенок, подложкодержателя и обрабатываемой поверхности	62

2.2.5. Газы и газовые смеси, применяемые для сухого травления различных материалов	64
2.2.6. Материалы внутрикамерной оснастки	68
2.2.7. Загрязнения	69
2.3. Методы вакуумно-плазменного травления.....	71
2.3.1. Ионное травление.....	71
2.3.2. Плазмо химическое травление	71
2.3.3. Реактивно-ионное травление.....	72
2.3.4. Радикальное травление	80
2.3.5. Реакторы вакуумно-плазменного травления ..	81
2.4. Тенденции развития плазменных систем в области высоких технологий	116
Глава 3. Методы контроля технологических параметров и диагностики плазмы.....	122
3.1. Измерение профиля травления приборами с индикаторной иглой	124
3.2. Метод кварцевого резонатора	126
3.3. Эллипсометрия	127
3.4. Лазерная интерферометрия	134
3.5. Растворная электронная микроскопия	135
3.6. Масс-спектроскопия	140
3.7. Эмиссионная спектроскопия	143
3.8. Зондовые измерения.....	148
3.9. Методы анализа поверхности и их применение.....	150
3.10. Аппаратура и методы исследования процессов ионно-плазменного травления и анализа образцов после обработки	176
Глава 4. Разработка процессов плазмохимического травления кремния с использованием компьютерного моделирования	181
4.1. Основы моделирования процессов травления в плазме	181
4.2. Особенности расчетов профилей при плазмохимическом травлении кремния.....	186
4.2.1. Физико-химические основы модели	188
4.2.2. Математические основы модели	190
4.2.3. Структурные эффекты	198
4.3. Математическая модель	203
4.3.1. Основные частицы и процессы.....	203

4.3.2. Описание модели	206
4.3.3. Методика расчета	212
Глава 5. Современное применение плазменных технологий в микроэлектромеханических и ультрабольших интегральных системах	228
5.1. Тенденции развития микро- и наносистемной техники	229
5.2. Сухое травление полимеров	250
5.2.1. Характеристики травления для толстых слоев полимеров	250
5.2.2. Электрохимическое осаждение никеля в полимерные микроструктуры	254
5.2.3. Изготовление керамических микроструктур	255
5.3. Травление кремниевых микроструктур с высоким аспектным отношением	256
5.3.1. Технология глубокого травления с мелким диффузионным переходом	263
5.3.2. Особенности изготовления кремниевых горизонтально управляемых резонаторов	265
5.4. Полевые кремниевые эмиттеры с заостренным верхним концом	266
5.4.1. Регулирование профилей эмиттеров с применением сухого травления кремния	267
5.4.2. Изготовление микрозеркал и лазеров с применением сухого травления	272
Литература	275

Учебное электронное издание

**Галперин Вячеслав Александрович
Данилкин Евгений Владимирович
Мочалов Алексей Иванович**

**ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ
В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ**
Учебное пособие

Ведущий редактор канд. хим. наук *Д. К. Новикова*

Редактор *П. Селиверстов*

Художник *Н. Апрелова*

Технический редактор *Е. Денюкова*

Компьютерная верстка: *Е. Голубова*

Подписано 05.10.12. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 18.

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»
125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

Минимальные системные требования определяются соответствующими требованиями программы Adobe Reader версии не ниже 10-й для платформ Windows, Mac OS, Android, iOS, Windows Phone и BlackBerry.