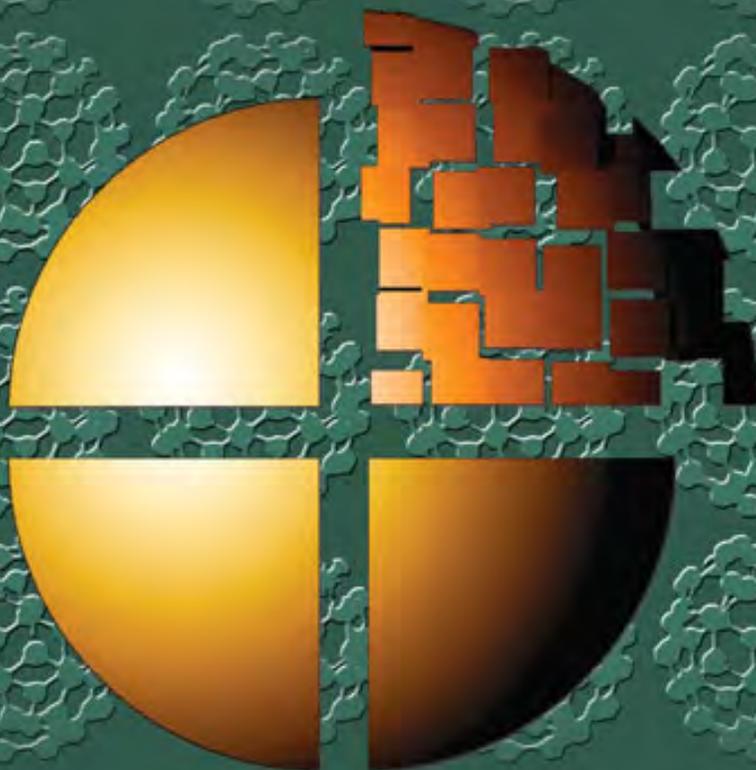


● ● ● Н А Н О Т Е Х Н О Л О Г И И ● ● ●

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

ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

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. Плазмохимическое 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. Растровая электронная микроскопия	135
3.6. Масс-спектрометрия	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

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 критических 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 наукоёмких и высокотехнологичных направлений современной микро- и нанoeлектроники.

д.т.н. проф. Тимошенко 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);
- криопроецесс.

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 (Флэм Д., Кобэрн Дж., Винтер Х., Донелли 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

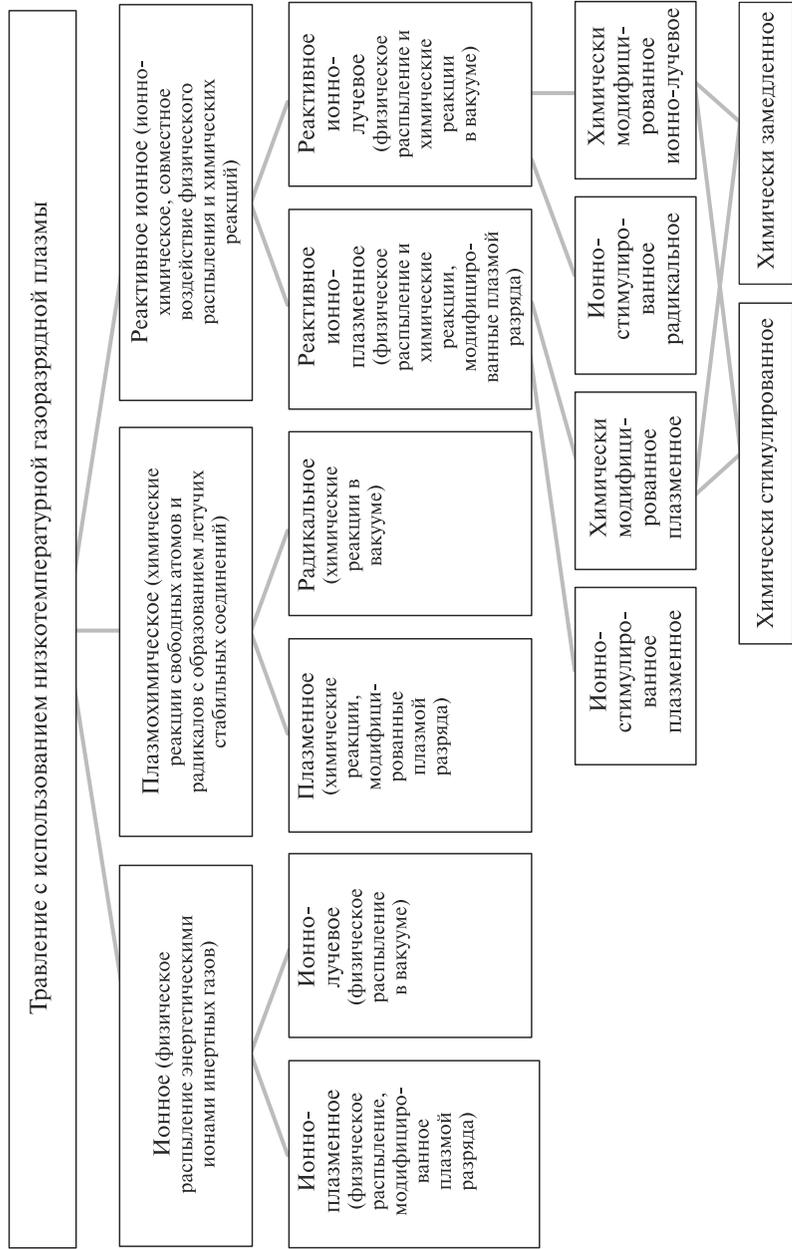


Рис. 1.2. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления [3]

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 переноса изображения, ионное травление, осуществляемое физическим распылением материалов энергетичными 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 — ТСП и ИСП) 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, жидком 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 ионизированных 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 флуктуациями 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 заряд 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. *πλάσμα* — 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), загорающийся 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, космического 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 используемой 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:

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

найдем:

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

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:

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



Галперин Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории НПК «Технологический центр» Московского института электронной техники (МИЭТ). В составе группы отечественных ученых принимал активное участие в разработке технологий формирования наноструктурированных областей в кремнии и других функциональных слоях микро- и нанoeлектроники с минимальной шириной элементов 15 нм. Научные интересы: ионно-плазменные технологии, солнечная энергетика, технологии микро- и нанoeлектроники. Автор более 50 научных публикаций, 18 изобретений и патентов.



Данилкин Евгений Владимирович – кандидат технических наук, инженер-технолог одного из крупнейших производителей интегральных схем в Восточной Европе ОАО «НИИМЭ и Микрон». Область научных интересов: моделирование процессов ионно-плазменных технологий, технологий микро- и нанoeлектроники. Автор 14 публикаций.



Мочалов Алексей Иванович – кандидат технических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. Автор учебного пособия «Металлизация ультрабольших интегральных схем», вышедшего в 2009 г. в издательстве «БИНОМ. Лаборатория знаний». В сферу его научных интересов входят технология, свойства и применение тонких пленок, плазменные технологии, водородная энергетика, системы металлизации интегральных схем. Автор более 200 научных публикаций, 30 изобретений и патентов.