На правах рукописи

Двинин Сергей Александрович

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В ПОСТОЯННЫХ, ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

М о с к в а

2009

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный консультант
Доктор физико-математических наук, профессор Александров А.Ф.

Официальные оппоненты:
Доктор физико-математических наук Коссый Игорь Антонович.
Доктор физико-математических наук Найдис Георгий Вениаминович.
Доктор физико-математических наук, профессор Синкевич Олег Арсеньевич.

Ведущая организация: Институт нефтехимического синтеза Российской академии наук.

Защита состоится " 23 " апреля 2009 г. в 16 часов на заседании Диссертационного совета Д.501.001.66 Московского Государственного университета по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские Горы, Московский Государственный университет, Физический факультет, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "_____" _____2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.501.001.66,
доктор физико-математических наук А.П. Ершов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время газоразрядные источники плазмы используются во множестве приложений: в гетерофазных и гомофазных плазмохимических реакторах, в источниках света, плазменных двигателях, как инициатор химических реакций и средство управления газовыми потоками в плазменной аэродинамике. Параметры плазмы в этих устройствах изменяются в широких пределах (плотности заряженных частиц от 10^7 до 10^{15} см$^{-3}$, давление газа от 10^{-4} Тор до атмосферного, в качестве рабочего вещества используются инертные, молекулярные, электроотрицательные газы и их смеси). В связи с этим актуальной является задача разработки единого подхода к созданию моделей разряда, которые бы позволяли рассчитывать их параметры так же просто, как это позволяют делать классические модели Шоттки (диффузионный режим газового разряда) и Тонкса-Ленгмюра (режим свободного падения ионов на стенку).

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному изучению явлений, наблюдающихся в газоразрядных источниках плазмы в широком диапазоне давлений газа от 0.01 Тор до атмосферного. Развитие нанотехнологий требует создания плазмохимических реакторов нового поколения, работающих в области давлений, в которой длина свободного пробега ионов λ порядка размеров системы L и построения соответствующих моделей разряда, учитывающих его двух и трехмерную неоднородность (в отличие от длинных цилиндрических разрядных трубок с плазмой, однородной вдоль оси, рассматриваемых в классических моделях). Теоретическое описание этих задач к началу настоящей работы отсутствовало.

В некоторых технологических приложениях важна высокая степень равномерности воздействия на подложку. Поэтому необходимы обобщения классических моделей разряда, учитывающих относительно простую кинетику электронов, на двухмерную и трехмерную геометрию с целью оценки достижимой степени однородности. Классические модели положительного столба разряда в этих условиях недостаточны. Работа плазменных источников при низких давлениях обусловливает переход от разряда постоянного тока к высокочастотным (ВЧ) и сверхвысокочастотным (СВЧ) разрядам, исключающим дрейф заряженных частиц в поле как процесс, приводящий к дополнительным потерям заряженных частиц.

Увеличение размеров плазмы, генерируемой с помощью высокочастотных полей, неминуемо приводит к нарушению квазистационарности электромагнитных ВЧ и СВЧ полей в разряде, который уже нельзя рассматривать как сосредоточенный объект, что является еще одной проблемой, решаемой в настоящей работе.

Следующей практической задачей является необходимость расчета воздействия потока ионов на стенки камеры и подложку, что принципиально требует учета инерции ионов. Это означает, что вместо линейных уравнений диффузии должна быть использована нелинейная система уравнений гидродинамики с учетом ионизации и конвективного слагаемого $(\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V}$, ответственного за инерцию ионов. К началу настоящей работы были получены решения только одномерной задачи[1], в то время как в современных плазмохимических реакторах плазма принципиально двух или трехмерно неоднородна. Более того, граничные условия для плазмы (равенство скорости движения ионов ионно-звуковой, называемое критерием Бома) были установлены только для одномерных течений. Задача управления энергией ионов, бомбардирующих стенку, на практике обычно решается путем возбуждения высокочастотных электромагнитных полей на границе плазмы с обрабатываемой подложкой. При этом возможна обработка диэлектрических подложек, так как постоянные поля в области слоя пространственного заряда генерируются за счет выпрямления ВЧ полей на нелинейности слоя. Однако увеличение размеров подложек и в данном случае приводит к тому, что распределение ВЧ поля и потоков заряженных частиц по площади подложки становится неравномерным. Поэтому актуальной является задача расчета распределения ВЧ полей на границе плазмы с металлической и диэлектрической подложками.

Увеличение давления нейтрального газа повышает производительность источников плазмы, использующихся для осуществления гомогенных химических реакций. При этом размер разряда определяется интенсивностью процессов переноса в газе, а роль стенок разрядной камеры несущественна, или они отсутствуют вовсе. Идеальным случаем можно считать создание однородной среды, в которой протекает химическая реакция с локальным балансом заряженным частиц. Элементарной разрядной структурой, обеспечивающей переход среды из невозбужденного состояния в возбужденное, является фронт ионизации. Теория таких фронтов может быть построена по аналогии с теорией волн, описываемых нелинейным уравнением диффузии, которая была создана А.Н. Колмогоровым, И.Г. Петровским, Н.С. Пискуновым. Для волн медленного горения теория была разработана Я.Б. Зельдовичем и Д.А. Франк-Каменецким, а для газового разряда первые работы выполнены Ю.П. Райзером. Обобщение данных моделей на ВЧ и СВЧ разряды затрудняется тем, что скорость химических реакций зависит от распре-

[1] Существуют двух- и трехмерные решения уравнения диффузии, не учитывающие инерцию ионов. Однако нулевые граничные условия не позволяют рассчитать потоки ионов на подложку, а применение модельных условий не является строго обоснованным. Строго говоря, именно полученные автором результаты и могут служить обоснованием модельных граничных условий.

деления ВЧ и СВЧ поля в пространстве, описываемого волновым уравнением. Поэтому в этих типах разрядов нелинейный источник в уравнении диффузии будет не только нелинейным но и нелокальным, что требует разработки соответствующей теории. Разряды в свободном пространстве могут быть использованы в качестве инициатора химических реакций, как в неподвижном газе, так и в газовом потоке, для управления обтекания газом различных объектов. Умение управлять пространственной структурой плазмы важно для использования газового разряда в плазменной аэродинамике, в объемных химических реакторах и в качестве инициатора химических реакций. Эффективность процесса зависит от объема, в котором существует разряд, и реализуемых температур газа, поэтому необходимо исследование процессов, определяющих форму и структуру разряда. Помимо того, что изучение таких механизмов интересно само по себе, именно эти процессы лимитируют эффективность многих технологических устройств. Параметры плазмы в разрядах высокого давления СВЧ и постоянного тока близки, что делает уместным совместное рассмотрение этих типов разрядов.

В последние годы был разработан эффективный источник плазмы, использующий электромагнитную поверхностную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела диэлектрической антенны с плазмой. Спецификой этой формы разряда является его промежуточный характер между разрядом в свободном пространстве и разрядом, ограниченным стенками. Теории аналогичных разрядов, имевшиеся до настоящей работы, предполагали локальную связь плотности заряженных частиц с полем, что не позволяет рассмотреть процесс установления стационарного состояния, а также не применимо в широкой области внешних условий.

Из проведенного выше анализа ясно, что построение теории перечисленных явлений актуально с точки зрения практических применений, однако представляет собой сложную физическую задачу. Рассматриваемая проблема усложняется тем, что все задачи являются существенно нелинейными.

Поэтому изучение рассматриваемого в диссертации круга процессов является актуальным и имеет как чисто научный, так и прикладной интерес.

Цель диссертационной работы

Целью работы является построение моделей разряда для новых источников плазмы, использующих разряды постоянного тока, ВЧ и СВЧ разряды низкого давления и разряды в свободном пространстве. Построенные модели должны объяснить наблюдающиеся в эксперименте эффекты: гистерезис характеристик, наличие пространственных структур разряда, скачкообразные переходы от одной формы разряда к другой. Модели должны допускать возможность дальнейшего усовершенствования путем включения более продвинутой кинетики элементарных процессов с учетом упомянутого выше круга вопросов и их проверки в «чис-

ленных» и реальных экспериментах. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих основных задач.

1. Построение кинетической теории положительного столба разряда низкого давления в условиях, когда размер разряда порядка длины свободного пробега ионов. Модель должна переходить в известные модели Шоттки и Тонкса-Ленгмюра в предельных случаях высоких и низких давлений газа.

2. Построение неодномерной гидродинамической модели разряда, учитывающей в дополнение к стандартной диффузионной модели инерцию ионов и ее решение для геометрий разрядной камеры, типичных для современных газоразрядных источников плазмы.

3. Построение модели СВЧ разряда, поддерживаемого плоской волной, учитывающей возможность возбуждения поверхностной волны и взаимной трансформации волн.

4. Изучение условий существования и дисперсионных характеристик волн, распространяющихся вдоль границы неравновесной плазмы ВЧ разряда низкого давления с металлом.

5. Построение модели распространения разряда, поддерживаемого плоской СВЧ волной, при плотностях электронов больше критической.

6. Объяснение механизма формирования нитевидной структуры СВЧ разряда высокого давления (построение теории высокочастотного стримера).

7. Построение модели разряда постоянного тока в поперечном потоке газа.

8. Построение самосогласованной модели СВЧ разряда на поверхности диэлектрической антенны.

Научная новизна работы заключается в следующем

Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные теоретические и экспериментальные результаты.

1. Выведено уравнение плазмы и слоя, позволяющее описать свойства разряда с учетом отклонений от квазинейтральности, инерции ионов, перезарядки, и реального распределения ионов по энергиям для разряда положительного столба постоянного тока. Это уравнение позволяет рассчитывать свойства разряда в режимах, типичных для плазмохимических реакторов низкого давления.

2. Применено преобразование годографа для решения уравнений гидродинамики с учетом ионизации, что позволило получить распределения плотности заряженных частиц и их скоростей в двух- и трехмерно неоднородной среде. Представление решения полученных уравнений в виде ряда позволило подтвердить критерий Бома в качестве граничного условия для двух- и трехмерно неоднородных плазм.

3. Впервые построены линейная и нелинейная модели ионизационно-полевой неустойчивости, связанной с самовозбуждением поверхностной волны, и на их

основе создана теория СВЧ разряда в волноводе, описывающая как его электродинамические свойства, так и формирующиеся в нем нелинейные структуры.

4. С помощью построенной модели объяснен гистерезис мощностных характеристик СВЧ разряда низкого давления.

5. Впервые экспериментально подтверждено самовозбуждение поверхностной волны в СВЧ разряде низкого давления, поддерживаемого волной типа H_{10} в волноводе.

6. Построена модель распространения высокочастотных поверхностных волн вдоль границы плазмы с металлом, учитывающая нелинейность слоя пространственного заряда. В нелинейной постановке получены параметры поверхностных волн, распространяющихся вдоль слоя пространственного заряда на границе плазмы с металлом, которые иногда существенно модифицируют свойства разряда. Основным механизмом нелинейности поверхностных волн являются осцилляции границ плазмы, обусловленные электрическим полем этих волн, а наиболее сильное изменение дисперсионных характеристик связано с изменением толщины слоя. Определены условия распространения поверхностной волны и рассчитаны ее дисперсионные характеристики в столкновительной плазме.

7. Впервые построена теория распространения плоского фронта ионизации, обусловленного амбиполярной диффузией, в поле СВЧ волны с учётом отражения волны от набегающей плазмы. Теория включает оригинальный подход к построению моделей фронта ионизации в многокомпонентной плазме и фронтов ионизации в СВЧ разряде на основе уравнения диффузии с нелинейным и нелокальным источником.

8. Проведено численное моделирование поперечного разряда постоянного тока в потоке газа.

9. Построена теория разряда, поддерживаемого волной, распространяющейся вдоль поверхности диэлектрической антенны, позволяющая рассчитать пространственное распределение плотности заряженных частиц для заданной мощности и частоты СВЧ волны.

10. Предложен механизм формирования нитевидных структур в СВЧ разряде высокого давления. Проведено численное моделирование, подтвердившее предложенную модель.

Достоверность полученных результатов. Расчет характеристик разряда проведен как аналитическими, так и численными методами. При проведении численных расчетов использовались различные дополняющие друг друга математические алгоритмы. Полученные результаты сопоставлены с результатами других групп исследователей в России и за рубежом. Проведено сравнение проведенных расчетов с экспериментом там, где такие данные существуют. Это позволяет считать полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Практическая значимость работы

Практическая значимость проведенных исследований разряда обусловлена возможностью использования полученных результатов при конструировании плазмохимических реакторов низкого давления. Предложенные методики являются научной базой

- для расчета усредненных характеристик разряда в источниках плазмы для нужд микроэлектроники,
- расчета электродинамических характеристик ВЧ и СВЧ разрядов,
- управления воздействием ионов на стенки реактора и подложку,
- оценки однородности процесса в объеме реактора и на поверхности подложки.

Модели разряда в свободном пространстве применимы

- для анализа процессов в плазменной аэродинамике (создание разрядов для управления газовыми потоками),
- инициации химических реакций.

Результаты исследований могут быть использованы в следующих организациях: ИОФ РАН, ИВТ РАН, МРТИ РАН, ЦАГИ, Институт механики МГУ, ФТИ РАН, и ряде других организаций.

Апробация работы

Результаты работы являются итогом более чем 25-летних исследований автора в области физики газового разряда. Основные результаты работы, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на Международных конференциях по явлениям в ионизованных газах (XVI Duesseldorf, 1983, XVII Budapest, 1985, XIX Belgrade, 1989, XX Pisa, Italy 1991), Всесоюзных конференции по физике низкотемпературной плазмы, (VII, Ленинград, 1983 г., VIII, Минск, 1991), II Всесоюзном совещании по физике электрического пробоя газов, Тарту, 1984 г. и Всесоюзном семинаре по ВЧ пробою газов, Тарту, 1989 г., IV Всесоюзной конференции "Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", Ташкент, 1985, Weakly Ionized Gases Workshops (4^{th}, Anaheim, 2001, 9^{th}, Reno, 2006, 10^{th}, Reno, 2007), Workshops on Magneto- Plasma- Aerodynamics in Aerospace Applications. (2^{nd} Moscow, 2000, 3^{rd} Moscow 2001, 6^{th} Moscow, 2005, 7^{th} Moscow 2007), III Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ-2003, Махачкала, 2003, Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС, Звенигород, (XXXI, 2004 г., XXXII, 2005 г., XXXIII, 2006 г., XXXIV, 2007 г., XXXV, 2008 г.), VI International Workshop Microwave Discharges: Fundamentals and applications, Russia, Zvenigorod, September 11-15, 2006, Ломоносовских чтениях по физике на физическом факультете МГУ (2007), 5-ом Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 5–8 сентября 2008 г. и семинарах в ИОФ РАН, ИНХС РАН, НИИЯФ МГУ, научном семинаре кафедры

физической электроники физического факультета МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 статьи в реферируемых журналах (из них 23 в журналах из списка ВАК), 1 статья в трудах факультета ВМК МГУ, 14 докладов и 5 расширенных тезисов докладов в трудах Международных конференций, и получен один патент.

Личный вклад автора заключается в формулировке рассматриваемых задач, выводе исходных уравнений, проведении аналитических расчетов и математическом моделировании разряда. Автором разработана методика измерения полей поверхностной волны. Эксперименты по измерению поля и электродинамических характеристик СВЧ разряда в волноводе выполнены при непосредственном участии автора. Автором выполнено сопоставление данных расчетов с экспериментом, сформулированы и обоснованы выводы диссертации. Вклад соискателя в работы, выполненные в соавторстве, является определяющим.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Работа изложена на 398 страницах, включая 134 рисунка и одну таблицу. Список цитируемой литературы включает 439 наименований.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, показана научная новизна и практическая ценность результатов, изложены основные выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

Первая глава посвящена исследованию проблем, не решенных классической физикой газового разряда. В §1 рассмотрены результаты классических работ по теории положительного столба разряда. В §2 автором выведено уравнение

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = 4\pi e n_0 \left\{ \exp\left(\frac{e\varphi(x)}{kT_e}\right) - \nu_i \int_0^x dx' \frac{\exp\left(-(x-x')/\lambda\right)}{\sqrt{(2e/M)(\varphi(x')-\varphi(x))}} \times \right.$$
$$\left. \times \left\{ \exp\left(\frac{e\varphi(x')}{kT_e}\right) + \frac{1}{\lambda}\int_0^{x'} dx'' \exp\left(\frac{e\varphi(x'')}{kT_e}\right) \right\} \right\}, \qquad (1)$$

обобщающее уравнение Ленгмюра и Тонкса, учитывая дополнительно перезарядку ионов, и справедливое как в бесстолкновительном и диффузионном режимах, так и в промежуточной области ($L \sim \lambda$), где до настоящей работы описание отсутствовало. Развитая на основе этого уравнения теория позволила распространить на эту область все результаты, полученные ранее в диффузионной модели Шоттки и модели Тонкса-Ленгмюра. Как и в моделях Шоттки и Тонкса–Ленгмюра, собственным значением уравнения является частота ионизации, являющаяся функцией давления, размера вакуумной камеры и рода газа. Рассчитанная с ис-

пользованием различных моделей величина частоты ионизации в безразмерных переменных приведена на рис. 1 [18].

В §3 с помощью решения кинетического уравнения для ионов показано, что аналогичное интегро-дифференциальное уравнение может быть получено и в случае неполной рекомбинации ионов на поверхности твердого тела, а также при учете упругого рассеяния ионов на нейтралах наряду с перезарядкой. При этом интеграл в правой части уравнения (1) заменяется резольвентой интегрального уравнения Фредгольма для функции распределения ионов. Решение уравнения для случая, когда хотя бы часть ионов нейтрализуется на стенке, может быть получено методом последовательных приближений. Полученные с помощью (1) или более сложных уравнений §3 распределения потенциала позволяют рассчитать функцию распределения ионов по энергиям в любой точке положительного столба, включая границу, что важно для расчета воздействия разряда на стенку (§4).

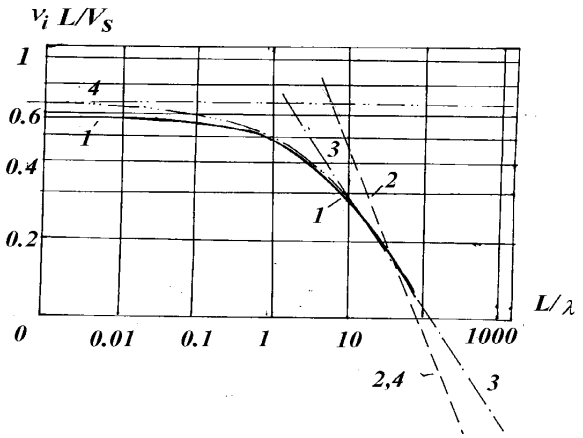


Рис.1. Изменение безразмерной частоты ионизации, как функции длины свободного пробега ионов в плазме в квазинейтральном приближении. 1 – Расчет с помощью интегро-дифференциального уравнения. Расчет в гидродинамическом приближении: 2 – режим нормального дрейфа ионов, 3 – режим аномального дрейфа, 4 – учет режимов как нормального (в центре плазмы), так и аномального (вблизи границы) дрейфа, а также инерции ионов [18].

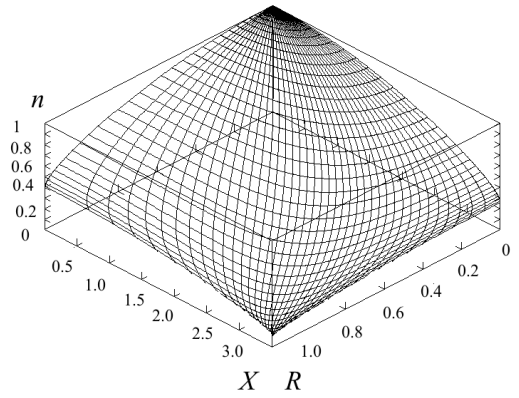


Рис. 2. Распределение плотности электронов в разряде в цилиндрической разрядной камере [29]. Линии, обрисовывающие поверхность, представляют собой линии постоянной скорости (W) и постоянного направления скорости (угла θ). Отношение частоты столкновений ион-нейтрал к частоте ионизации равно 10.

В следующих рассмотренных автором задачах учитывалась двумерная неоднородность плазмы, что необходимо для оптимизации конструкции плазмохимических реакторов. В §5 методом годографа получены точные решения нелинейных уравнений одножидкостной гидродинамики, учитывающие прямую ионизацию электронным ударом в двух- и трехмерно неоднородном разряде. Решение этих уравнений позволило рассчитать распределение плотности заряженных час-

тиц в цилиндрическом реакторе в случае, когда его поперечные и продольные размеры одного порядка (Рис. 2). Для разряда произвольной формы решение соответствующих уравнений может быть получено в виде ряда. Разложение в ряд решения в граничной точке дало возможность теоретически подтвердить критерий Бома формирования слоя пространственного заряда для двумерно неоднородной плазмы.

Найденные в §5 решения не применимы для исследования двумерно неоднородного разряда в режиме свободного падения ионов на стенку, поэтому в §6 была сделана попытка получить аналог уравнения Ленгмюра и Тонкса для двумерно неоднородной среды. В уравнении учтено возникающее при этом несовпадение траекторий движения ионов и силовых линий электрического поля. При этом движение в направлении, перпендикулярном к силовым линиям электрического поля, считается малым возмущением. Полученное уравнение может являться основой для расчета характеристик разряда в многомерно-неоднородной среде в режиме свободного пробега ионов на стенку.

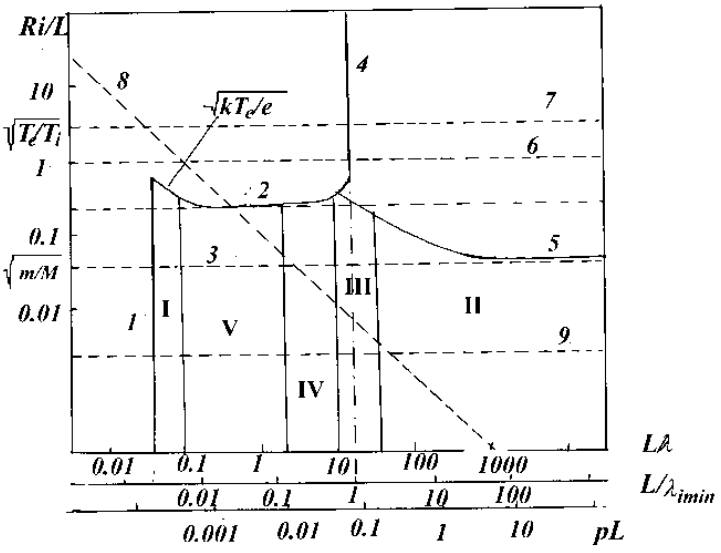


Рис. 3. Диаграмма применимости различных моделей плазменного столба на плоскости параметров (L/λ), (R_i/L) [18]. 1 – граница существования разряда в режиме Ленгмюра-Тонкса со стороны низких давлений, связанная с дефицитом ионизации. 2 – граница существования разряда в режиме Ленгмюра-Тонкса со стороны неквазинейтрального положительного столба. 3 – граница увеличения поля в разряде, связанного с дефицитом быстрых электронов. 4 – граница существования разряда в диффузионном режиме 5 – граница пренебрежения упругими столкновениями, 6 – граница ускорения ионов до ионно-звуковой скорости, 7 – граница свободной диффузии, 8 – граница столкновительного и бесстолкновительного слоев пространственного заряда. 9 – граница существенного влияния неквазинейтральности на частоту ионизации в разряде. I – Область применимости модели Ленгмюра-Тонкса. II – Область применимости модели Шоттки. III – Область применимости гидродинамической модели с учетом аномального дрейфа ионов. IV – Область применимости гидродинамической модели с учетом аномального дрейфа и инерции электронов.V – Область, где применимо только столкновительное уравнение плазмы-слоя (работает также в областях I, III, IV). Кривые 1 и 4 привязаны к шкале L/λ_{imin}, остальные – к шкале L/λ. (λ_{imin} – минимальная длина ионизации, определяемая максимумом сечения ионизации в области высоких энергий электронов, λ – длина свободного пробега ионов. p – приведенное давление нейтралов в Тор, R_i –радиус Дебая). Шкала pL (Тор·см) – произведение приведенного давления на полуширину разряда.

В §7 на примере разряда в аргоне приведена диаграмма применимости различных моделей положительного столба на плоскости параметров R_i/L, L/λ. (R_i – электронный радиус Дебая, λ – длина свободного пробега ионов, L – характерный размер плазменного столба). Полученное автором в §1 уравнение применимо в областях I, V и IV, причем в области V оно является единственной альтернативой численному решению кинетического уравнения для ионов (Рис.3).

Во второй главе диссертации описаны экспериментальные и теоретические исследования СВЧ разряда в волноводе. В §1 приведены фотографии структур разряда в волноводе, проведен обзор работ, посвященных исследованию этого типа разряда. Главная задача исследования гл. 2 – объяснение второго минимума в области низких давлений в зависимости минимальной мощности существования разряда от давления (рис. 4), гистерезиса мощностных характеристик разряда, разработка механизма формирования пространственных структур (рис. 5). В §2

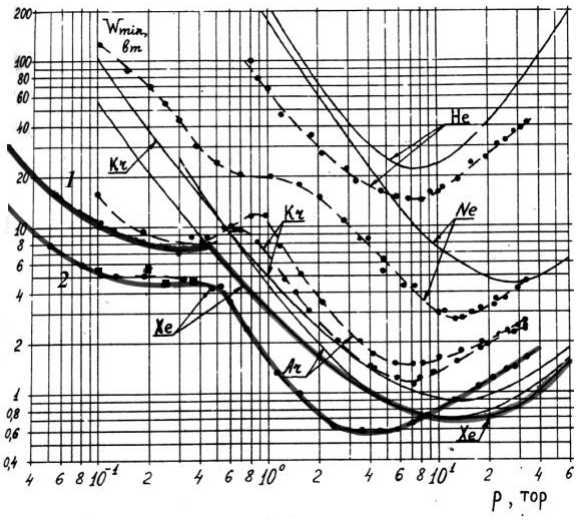


Рис. 4. Зависимость минимальной мощности поддержания разряда W_{min} от давления газа в гелии, неоне, аргоне, криптоне и ксеноне. Точки – эксперимент, тонкие сплошные кривые – расчет в модели однородного столба[2]. Жирные кривые: 1 – расчет с учетом ионизационной неустойчивости [4], 2 и точки, обозначенные квадратами – эксперимент автора в ксеноне [5].

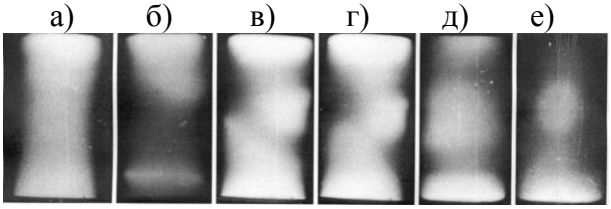


Рис. 5. Структура СВЧ разряда в волноводе при низких давлениях газа P = 0,1 Тор: а-140 Вт, б - 9 Вт, в - 17 Вт, г - 9 Вт, д - 6,5 Вт, е - 5.5 Вт; а, б - разряд в состоянии I, в–е - в состоянии II (Рис. 6) [5].

рассмотрена задача об устойчивости положительного столба СВЧ разряда по отношению к возбуждению поверхностных волн. Разряд описывался системой уравнений гидродинамики с учетом ионизации и уравнений Максвелла. Показано, что в тех случаях, когда возможно распространение вдоль разряда поверхностной волны, т.е. его длина больше, чем половина длины указанной поверхност-

[2] Приведенные результаты получены В.А.Довженко (Довженко В.А., Солнцев Г.С., Нещадименко В.И. Исследование параметров плазмы стационарного СВЧ-разряда в гелии внутри волновода. // Радиотехника и электроника, 1973. Т. 18. №9. С. 1875–79.)

ной волны, однородное распределение оказывается неустойчивым. Физический механизм неустойчивости заключается в следующем. При появлении в разряде флуктуации плотности электронов происходит перекачка поля падающей волны в поле поверхностной волны с длиной, равной пространственному периоду флуктуации. Интерференция падающей и поверхностной волн приводит к неоднородности распределения частоты ионизации в пространстве, а следовательно, усилению или ослаблению исходной неоднородности плотности электронов. При определенных соотношениях между частотой СВЧ волны, плотностью электронов и длиной возмущения обратная связь оказывается положительной. Таким образом, в разряде происходит развитие ионизационно-полевой неустойчивости. В отличие от широко известных страт, указанный тип неустойчивости имеет резонансный характер. Расчет инкремента неустойчивости показал, что характерное время ее развития близко к характерному времени ионизации, т.е. развитие разряда и формирование структуры происходят с близкими скоростями. При относительно высоких давлениях нейтралов оба типа неустойчивости (страты и ионизационно-полевая неустойчивость) могут проявляться совместно.

В §3 проведено рассмотрение самосогласованного процесса взаимодействия мощной электромагнитной волны с газоразрядной плазмой, ею же создаваемой. Система уравнений, описанная в §1 была решена методом Бубнова-Галеркина. При построении решения учитывались неустойчивые гармонические возмущения и уравнения для усредненных по объему параметров плазмы. Расчеты показали следующее.

1. Ионизационная неустойчивость столба плазмы на поверхностной волне стабилизируется при некотором значении пространственной модуляции концентрации электронов в плазме. Глубина модуляции зависит от мощности, подводимой к разряду, и давления газа.

2. Развитие неустойчивости модифицирует энергетические характеристики столба плазмы и приводит к увеличению доли поглощаемой энергии в плазме, а также к снижению уровня мощности, необходимой для поддержания разряда, так как энергия возбуждающейся поверхностной волны также затрачивается на поддержание плазмы.

3. Рассматриваемое расслоение имеет резонансный характер. Резонанс может наблюдаться при равных концентрациях электронов в плазме, соответствующих возбуждению поверхностных волн с различными волновыми числами, что приводит к появлению неоднозначности в зависимости концентрации электронов в плазме от мощности падающей волны.

Полученные теоретически результаты были подтверждены измерением мощностных характеристик разряда (§4). Пример сопоставления рассчитанной и экспериментальной зависимостей характеристик плотность электронов – мощ-

ность (являющихся аналогом обычных вольт-амперных характеристик разряда постоянного тока) приведен на рис. 6 и показывает их удовлетворительное согласие. Прямое измерение структуры поля в разряде с помощью вводимых в волновод емкостных и индуктивных зондов подтвердило возбуждение в разряде поверхностной волны.

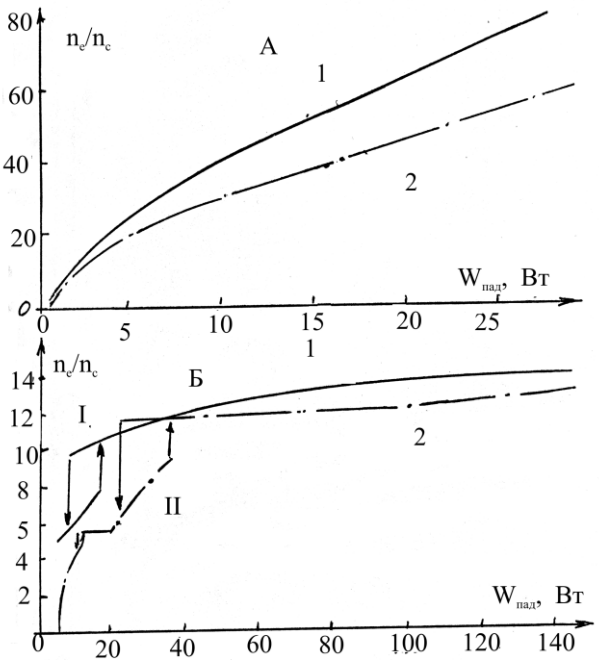


Рис. 6. - Зависимость плотности электронов n_e/n_C в плазме разряда от подводимой мощности (W_{pad}) при различных давлениях нейтрального газа (1 – эксперимент, 2 – теория [5]). Ксенон, а) – P=3 Тор, б)- P=0.1 Тор. I и II – две кривые, соответствующие различным формам существования разряда [5].

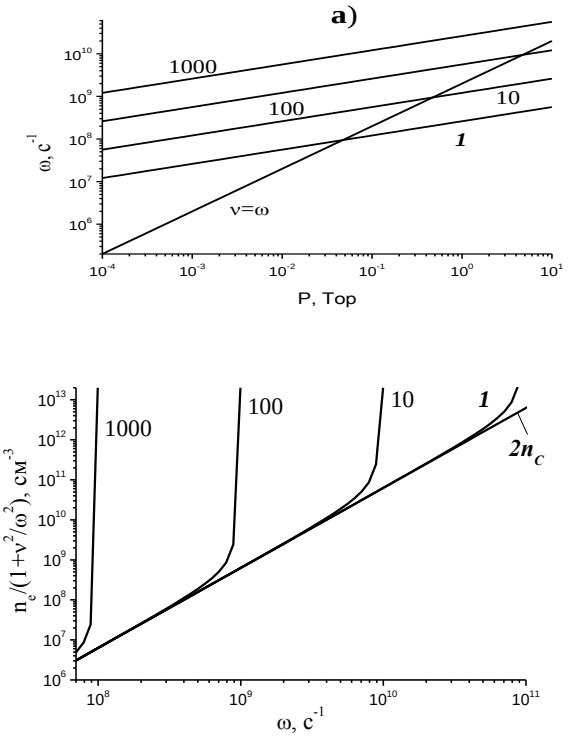


Рис. 7. Области, параметров разряда, при которых возможно проявление ионизационно-полевой неустойчивости на поверхностной волне. а) – области частот СВЧ волны как функция давления, б) Области неустойчивости на плоскости плотность электронов – частота. Неустойчивость возможна между кривыми $n_e=2n_c$ и одной из кривых 1, 10, 100, 1000. Цифра у кривой – размер разряда в см ($n_c=m\omega^2/4\pi e^2$).

В §5 рассмотрено влияние неоднородности плазмы на распространение поверхностных волн. Как показано Тамиром и Олинером, в поверхностной волне в области Reε>0 энергия поля переносится в направлении волнового вектора, а при Reε<0 в обратном. Резонанс, при котором постоянная распространения стремится к бесконечности, соответствует равенству потоков в прямом и обратном направлении. Поэтому дисперсия поверхностной волны очень сильно зависит от характерной длины неоднородности плазмы L в окрестности точки плазменного резо-

нанса. Кузелевым, Рухадзе с сотрудниками[3] в столкновительной, слабо неоднородной плазме теоретически обнаружено качественное изменение спектра поверхностных волн при выполнении условия $0.45 << \omega L/c$, т.е. для волн с длиной порядка или меньше характерной длины неоднородности плазмы. В данной работе в условиях наблюдения возбуждения поверхностных волн точка плазменного резонанса находится в слое пространственного заряда или близко к нему, поэтому характерная длина неоднородности мала и упомянутое выше условие не выполняется.

Еще одним эффектом, приводящим к усилению поглощения СВЧ волны в плазме, является усиление поля в точке плазменного резонанса. Для того, чтобы отделить этот эффект от самовозбуждения поверхностных волн, в были проведены экспериментальные исследования взаимодействия импульсного СВЧ поля с распадающейся плазмой в индуктивном плазменном стержне в волноводе (§6). Малое время импульса исключало развитие ионизационно-полевой неустойчивости. Полученные результаты сопоставлены с расчетом поглощаемой энергии и показали удовлетворительное согласие. Указанный процесс также должен существенно влиять на условия поддержания СВЧ разряда, наряду с процессом возбуждения собственных волн плазменного столба, однако он проявляется при более низких концентрациях электронов. В условиях, когда наблюдается возбуждение поверхностных волн, точка плазменного резонанса находится внутри слоя пространственного заряда и поглощение в ней мало.

В §7 обсуждены возможности проявления обсужденных в главе процессов. Рассматриваемый эффект самовозбуждения поверхностных волн может иметь место не только в индуктивном плазменном стержне в волноводе, но и в других условиях. Во-первых, для эффективной перекачки энергии из одной моды поля в другую отношение эффективной частоты столкновений электронов к частоте поля должно быть меньше единицы (кривая $\nu=\omega$ на рис. 7а). Кроме того, минимальная длина поверхностной волны (которая ограничивается ее затуханием) должна быть меньше размеров системы (оставшиеся кривые, цифра у кривой равна длине разряда в см). Указанные два условия ограничивают значения частот СВЧ волны и давлений газа, при которых может наблюдаться данное явление областью, лежащей выше каждой из упомянутых кривых. Кроме того, существуют условия на величину плотности электронов в плазме: $n_e > 2n_c$ и $h > \pi/L$. Соответствующие кривые приведены на рис. 7б. Расслоение должно наблюдаться в области между кривыми, обозначенными цифрой, равной длине разряда и кривой $n_e=2n_c$. Приве-

[3] Кузелев М.В. Романов Р.В., Рухадзе А.А., Хунджуа Н.Г. Поверхностные волны и зарядовые слои в пространственно неоднородной плазме. Физика плазмы, 2007, т. 33, №12, с. 1073-1080

денные кривые необходимо рассматривать как ориентировочные, вследствие влияния элементов разрядной камеры на спектры поверхностных волн. Поэтому в отдельных случаях неустойчивость может наблюдаться в области, лежащей выше кривых 1, 10, 100, 1000, но близкой к ним. Таким образом, поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы плазмы разряда с диэлектриком, существенно модифицируют его характеристики, приводя к дополнительному поглощению поля, гистерезису характеристик разряда и возникновению в нем пространственных структур.

В **третьей главе** рассмотрены поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы плазмы с металлом. В §1 проведен обзор общих свойств этих волн. Впервые идея о существовании таких волн возникла в 60 годах прошлого века при анализе экспериментов по измерению импеданса штыревых антенн, помещенных в плазму. Теоретически объяснить существование этих волн удалось ряду авторов (Meier и др.) в предположении, что слой пространственного заряда, формирующийся на границе плазмы и металла, может быть представлен, как тонкий слой диэлектрика с проницаемостью равной единице. В дальнейшем свойства линейных и нелинейных поверхностных волн изучались группой Харьковских физиков (Кондратенко, Азаренков и др.) в связи с созданием полосковых линий, использующих плазму полупроводников в качестве одной из сред, в которой распространяются электромагнитные волны.

Специфика волн, распространяющихся на границе плазмы с металлом, связана с малой толщиной слоя пространственного заряда, который и является основным переносчиком энергии. Поэтому уже при небольших амплитудах поля поверхностная волна будет нелинейной. Выпрямление поля волны на нелинейной вольт-амперной характеристике слоя пространственного заряда приводит генерации гармоник и увеличению падения постоянного напряжения на слое пространственного заряда. Последний эффект используется в технологии для управления энергией ионов, бомбардирующих контактирующую с разрядом поверхность. Основные задачи, решаемые в данной главе сводятся к следующим:

1) – учет взаимодействия поверхностных волн вблизи противоположных границ плазмы (в.т.ч. и для несимметричных слоев пространственного заряда),

2) – учет влияния столкновений на характеристики поверхностных волн,

3) – анализ механизмов генерации гармоник в этом типе поверхностных волн и влияния нелинейности на распространение поля вдоль слоя пространственного заряда.

В §2 рассмотрены характеристики поверхностных волн на границе плазмы с металлом в приближении замены слоя пространственного заряда тонким диэлектрическим слоем. Эта модель использовалась в 60-е годы для расчета характеристик поверхностных волн на границе металлического стержня с плазмой.

Кроме того, в определенных случаях подложка или стенка рабочей камеры могут представлять собой металл, покрытый слоем диэлектрика. Расчеты, проведенные до настоящего исследования, показали, что постоянная распространения поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы плазмы с металлом, гораздо больше, чем постоянная распространения этих же волн на границе плазмы с диэлектрическим полупространством. Вычисления в §2 подтвердили этот результат. Взаимодействия двух поверхностных волн (рис. 8), распространяющихся вдоль двух противоположных границ плазмы, наиболее сильно проявляется вблизи частоты геометрического резонанса плазма-слой пространственного заряда, изучавшегося в связи с проблемой объяснения резонансов на вольт-амперных характеристик ВЧ разряда. При этом постоянная распространения h четной (по продольному полю) волны увеличивается, а нечетной – уменьшается. Сам резонанс плазма-слой пространственного заряда представляет собой резонанс разомкнутой линии передачи для нечетной волны. Данный анализ имеет принципиальное значение в плазмохимических реакторах с большой площадью пластин для управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, т.к. при анализе распределения поля вдоль подложки необходимо учитывать волновой характер распределения поля. §4 посвящен исследованию влияния столкновительного поглощения поверхностных волн на дисперсию волн. Необходимость этого анализа связана с тем, что поля, используемые для управления энергией ионов в плазмохимических установках, имеют малую частоту, поэтому отношение частоты столкновений электронов к частоте поля может быть достаточно велико. Основой для проведенного анализа является малость толщины слоя пространственного заряда по сравнению с длиной поверхностной волны.

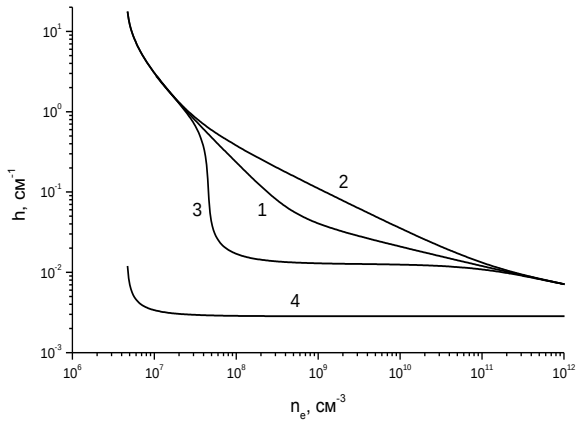


Рис. 8. Дисперсионные характеристики поверхностных волн в различных условиях: 1 – точное решение для неограниченной плазмы, 2 – асимметричная поверхностная волна, 3 – симметричная поверхностная волна, 4 – поверхностная волна в плазменном полупространстве. Данные расчета: толщина слоя 0.1 см, а) – Частота волны– 13.56 МГц (критическая концентрация – $2.28 \cdot 10^6$ см$^{-3}$, полуширина плазменного столба – 5 см).

На рис. 9 и 10 показаны глубина проникновения поля плоской волны в плазму и постоянная затухания поверхностной волны как функции отношения эффективной частоты столкновений электронов к частоте поля и плотности электронов для типичных условий плазменных технологических реакторов. Глубина

скин-слоя составляет 10см для плотности электронов 10^9 см$^{-3}$ и уменьшается до 1 см при 10^{11} см$^{-3}$. В связи с этим актуальным представляется использование для управления свойствами ионного потока поверхностных волн, поглощение которых, напротив, падает с ростом плотности электронов (рис. 10). Обращает на себя внимание существование области плотностей электронов 10^9–10^{10} см$^{-3}$ на рис 10, в которой поверхностная волна быстро затухает, т.е. распределение поля вдоль подложки будет резко неоднородным. В §3 получены аналитические выражения для границ этой области.

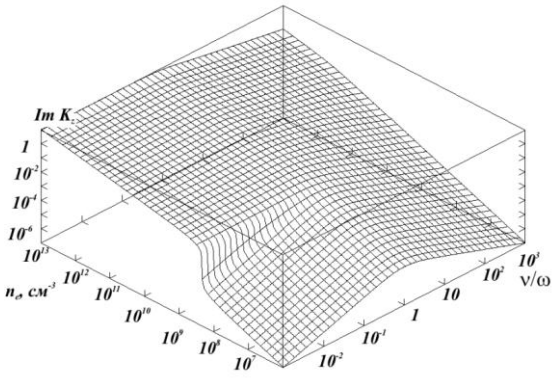


Рис. 9. Обратная глубина проникновения поперечной волны в плазму Поле частотой 135.6 МГц.

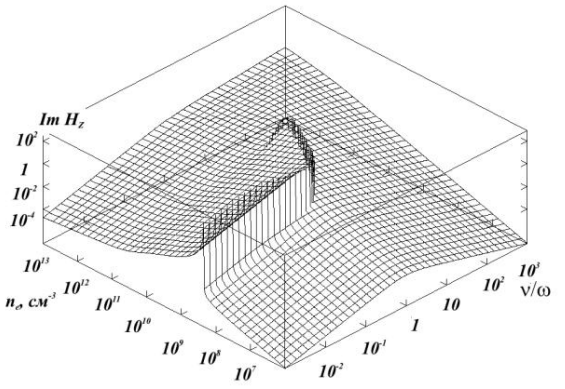


Рис. 10. Затухание поперечной поверхностной волны, распространяющейся вдоль слоя пространственного заряда на границе плазмы с металлом. Поле частотой 135.6 МГц. Толщина слоя – 0.1 см.

Проведенные в §2 и §3 исследования могут считаться только качественными, так как характеристики слоя пространственного заряда должны быть согласованы со свойствами поверхностной волны. Кроме того, необходимо учесть осцилляцию границы плазмы под действием электромагнитного поля и ее влияние на дисперсию волны. Для сосредоточенной системы влияние осцилляции границы плазмы на электродинамические свойства слоя в приближении $|\varepsilon| >> 1$ исследовались Либерманом, а позже Годяком и Штернберг. Данные процессы исследованы в §4. Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рис. 11. Область 1 занята однородной плазмой. В области между плазмой и металлической стенкой 4 формируется слой пространственного заряда. Вся область слоя заполнена положительными ионами, пространственное распределение которых предполагается однородным. Часть слоя пространственного заряда $x < s$, заполненная электронами, обозначена цифрой 2. В силу квазинейтральности плазмы в этой области выполнено условие $n_e = n_+$. В оставшейся области слоя ($x > s$, 3 на рис. 11) электроны отсутствуют. Обозначениями x_1 и x_2 на рис. 11 отмечены граница плазмы и слоя пространственного заряда (т.е. наиболее удаленное положение границы рас-

пределения электронов за время периода поля поверхностной волны) и положение металла. Также на рисунке приведены среднее положение границы плотности электронов $x_0 = \bar{s}$ и усредненное по времени распределение плотности электронов в слое $\bar{n}_e$. Рассмотрена только одна их возможных ситуаций в разряде, когда вторая граница плазмы и слоя удалена от рассматриваемой на расстояние больше глубины проникновения поля в плазму.

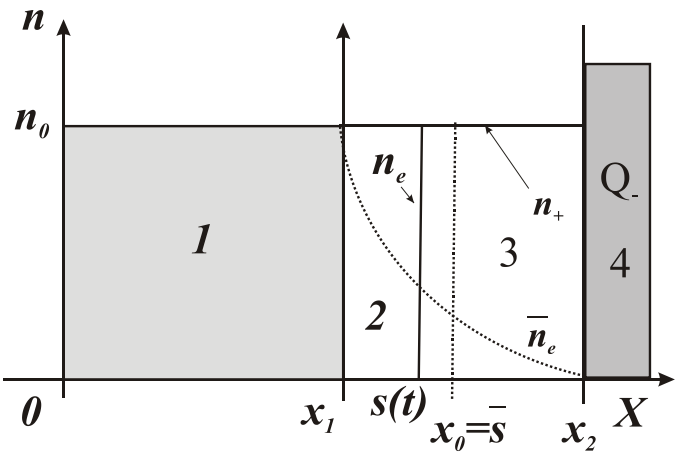


Рис. 11. Поверхностные волны на границе плазмы и металла, модель однородного ионного распределения. 1 – плазма, 4 – металл. x_1 – граница плазмы и слоя, x_2 – положение металла. n_0 – плотность заряженных частиц, n_+ – плотность ионов в слое, n_e, $\bar{n}_e$ – мгновенная и усредненная плотность электронов в слое, s (t) – мгновенное положение границы электронов в слое, $x_0 = \bar{s}$ – среднее по времени положение границы. Q_- – отрицательный поверхностный заряд на поверхности металла. В модели линейного слоя плотность электронов предполагается равной нулю во всем слое.

Структура бегущей волны выбиралась в виде $F(x, t - z/V)$. Основным механизмом нелинейности в данном случае является искривление границы плазмы (понимаемой, как граница электронной плотности). Расчет показал, что распространение волны сопровождается существенным отклонением формы волны от синусоидальной. Изменение формы волны с изменением параметров плазмы показано на рис. 12, а изменение амплитуды различных гармоник от плотности электронов в условиях, когда амплитуда колебаний электронов равна толщине

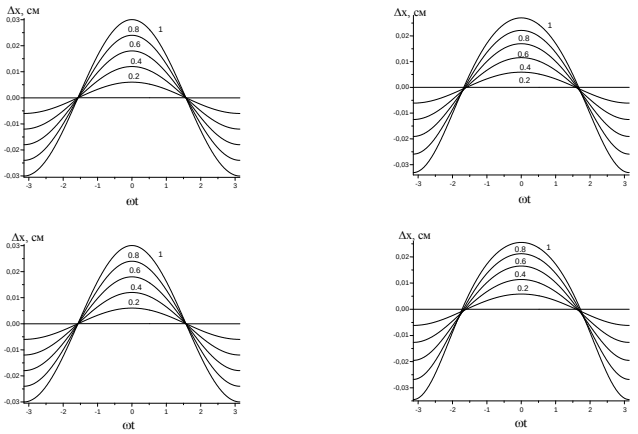


Рис. 12. Изменение формы нелинейной волны при изменении амплитуды волны и плотности электронов. Основная частота 135.6 МГц, толщина слоя – 0.03 см. Плотность электронов в плазме – а) $2 \cdot 10^8$ см$^{-3}$, б) $6.3 \cdot 10^8$ см$^{-3}$, в) $3.16 \cdot 10^9$ см$^{-3}$, г) $1.58 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$. Число у кривой – отношение амплитуды колебаний границы к средней толщине слоя Δx.

слоя – на рис. 13. Число гармоник, которые необходимо учитывать при расчете переносимой волной энергии и толщины слоя пространственного заряда в условиях, соответствующих типичной плазме технологического реактора (плотности электронов 10^{11} см$^{-3}$) достигает 6, а при более высоких плотностях может быть еще выше. Влияние возбуждения гармоник на фазовую скорость волны невелико, так как при высоких плотностях электронов скорости различных гармоник близки по величине. Основным механизмом влияния нелинейности на дисперсионную характеристику волны является изменение толщины слоя пространственного заряда. Расчет энергии, переносимой волнами в типичных условиях ВЧ плазменного источника (и необходимой для управления потоком ионов) проведен в §5 и показан на рис. 14.

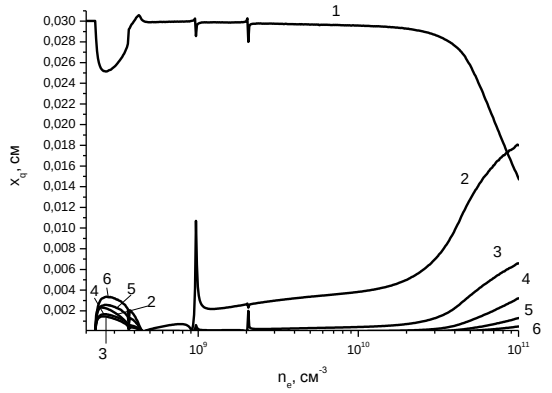


Рис. 13. Зависимости амплитуд гармоник от плотности электронов. Основная частота 135.6 МГц, толщина слоя – 0.03 см. Амплитуда волны равна толщине слоя Δx.

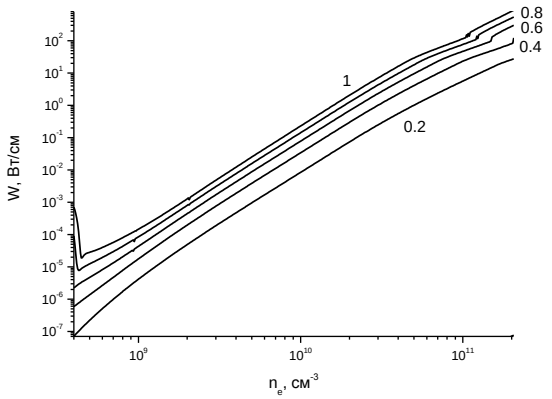


Рис. 14. Поток ВЧ энергии в слое пространственного заряда при толщине слоя 0.03 см на 1 см ширины слоя. Основная частота 135.6 МГц. Число у кривой – отношение амплитуды колебаний к толщине слоя Δx.

В §6 проведено обсуждение результатов и приведены выводы к главе 3. Из полученных результатов следует, что расчет характеристик волн, распространяющихся на границы плазмы с металлом, принципиально необходим для анализа процессов и выбора рабочих режимов в современных технологических реакторах, отличающихся высокими плотностями электронов (10^{11} см$^{-3}$ и более) и размерами (до 40 см в диаметре).

Четвертая глава посвящена анализу процессов в разряде в свободном пространстве. В этом случае поведение разряда полностью определяется структурой электрического поля и химическими свойствами газа[4]. Формы СВЧ разряда,

[4] В классических моделях газового разряда преобладающими являются потери частиц на стенках разрядной трубки.

реализующиеся в различных условиях в экспериментах, проведенных в различных организациях (Физфак МГУ, ИОФ РАН, ИПФ РАН, МРТИ), рассмотрены в §1. Разряд может иметь различную структуру, в зависимости от давления газа, частоты и амплитуды электромагнитного поля. При низких давлениях разряд принимает форму волны ионизации, бегущей навстречу источнику излучения (примерная граница соответствует $P(Top) < 50/\lambda$ (см)), при высоких – представляет собой совокупность плазменных нитей, вытянутых преимущественно в направлении вектора напряженности электрического поля ($P(Top) > 1000/\lambda$ *(см)*). Определить, какая из форм разряда будет реализована, можно, сравнив времена достижения критической плотности и достижения разрядом размера порядка длины волны поля, поддерживающего разряд. Нити формируются из электронов, образующихся в газе на начальной стадии пробоя, и до тех пор, пока их длина не достигает резонансной (половина длины СВЧ волны), либо пока они не будут экранированы другими нитями, расположенными ближе к источнику СВЧ излучения, и вытянуты преимущественно в направлении вектора напряженности электрического поля волны [5]. В промежуточном случае формируется целый ряд сложных структур, не относящихся ни к первому, ни ко второму виду.

В дальнейшем в главе последовательно изучены две задачи – распространение разряда поддерживаемого плоской волной, и формирование плазменной нити разряда высокого давления. §2 посвящен изучению диффузионного механизма распространения разряда низкого давления, поддерживаемого плоской волной. Свойства фронта ионизации, реализуемого при этих условиях во многом аналогичны свойствам диффузионного фронта рассмотренного Колмогоровым, Петровским и Пискуновым. В применении к СВЧ разряду впервые данный режим был рассмотрен Семеновым, ограничившимся, однако, случаем низких плотностей электронов, для которых отражение СВЧ волны от плазмы отсутствует. В обратном случае распределение частоты рождения частиц в области перед фронтом является не функцией плотности электронов, а функционалом от всего распределения плотности в пространстве. Тем не менее, в §2 получено решение данной задачи. Основой для получения решения было наличие асимптотики распределения поля при $x \to -\infty$. В стационарном случае распределение плотности электронов удовлетворяет уравнению Хилла. По аналогии с задачей Колмогорова-Петровского-Пискунова (КПП), решение должно лежать в первой зоне неустойчивости, что определяет скорость распространения разряда. Качественно за-

[5] В случае создания резкой неоднородности поля, например с помощью металлического электрода, удается избежать возникновения множества плазменных нитей и разряд принимает форму единственного плазмоида, размер которого постепенно растет с увеличением времени (так называемый инициированный разряд).

висимость частоты ионизации от плотности электронов показана на рис 15. Для разряда при высоких плотностях электронов, когда толщина фронта много меньше длины СВЧ волны в вакууме, необходимо учесть физические ограничения (отсутствие электронов вдали от фронта ионизации), поэтому скорость фронта определяется напряженностью СВЧ поля в окрестности фронта.[6]

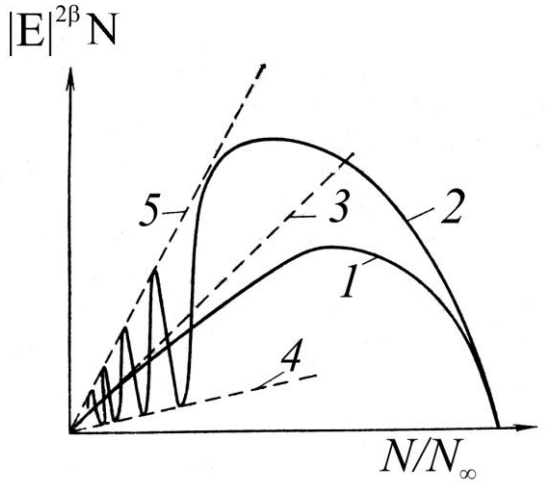


Рис. 15. Типичный вид функционала $F(N)=|E|^{2\beta}N$ для распространяющейся волны ионизации: 1 – в безотражательном приближении; 2 – с учетом отражения. Штриховые прямые: 3 – N, 4 – $(1-|R|)^{2\beta}N$, 5 – $(1+|R|)^{2\beta}N$

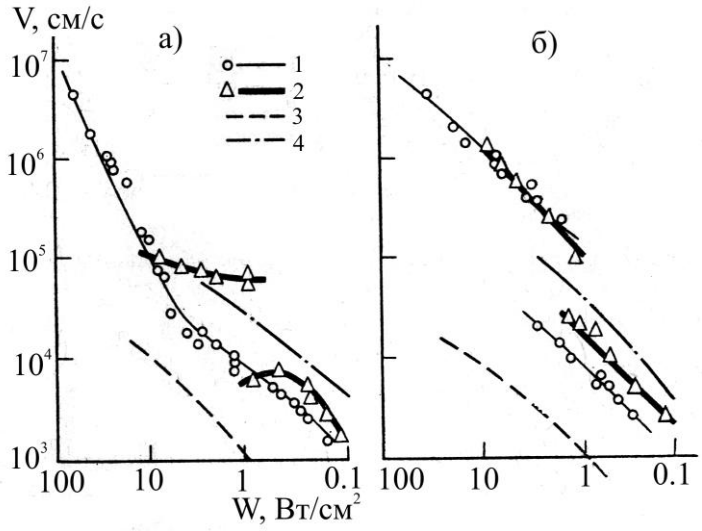


Рис. 16. Зависимости скорости распространения волны ионизации от плотности потока энергии в СВЧ волне: а – Xe, 0.35 Тор; б – Xe, I Тор. Эксперимент: 1 –труба диаметром 3,2 см, 2 – труба диаметром 5,1 см; расчет: 3 – учет только прямой ионизации, 4 – граница максимально возможной скорости с учетом ступенчатой ионизации

В результате удалось построить приближенную аналитическую модель фронта ионизации и сравнить ее как с численным расчетом, так и с экспериментом. Характеристики фронта ионизации (безразмерные скорость $v = V/(D\nu_{i0})^{1/2}$ и плотность электронов) в простейшем случае определяются двумя безразмерными параметрами – ν/ω и $\chi = k(D/\nu_{i0})^{1/2}$. Безразмерный коэффициент $\tilde{V}$ в формуле,

[6] В данной главе предполагается, что инициатором пробоя служит локализованный в пространстве источник электронов, т.е. не рассматривается случай волн пробоя, когда скорость распространения разряда определяется начальным распределением плотности в пространстве и исходной неоднородностью плазмы, а процессы переноса не существенны.

связывающей скорость распространения разряда, коэффициент диффузии и частоту ионизации в плоской волне $V = \widetilde{V} \cdot (D\nu_{i0})^{1/2}$ не равен двум, как в моделях Семенова и КПП, а может значительно отличаться, как в меньшую, так и в большую сторону. Сравнение полученных результатов с экспериментами, полученными Bethke и Ruess'ом приведены на рис. 16 и не противоречат гипотезе о диффузионном механизме распространения фронта. В эксперименте могут работать различные механизмы ионизации (ступенчатая и прямая), что приводит к различным результатам, однако наблюдаемое значение лежит внутри этих предельных случаев.

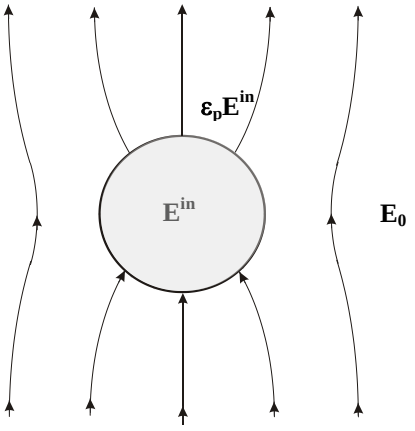


Рис 17. Плазмоид, сформировавшийся в начальный период пробоя, и распределение СВЧ поля. (E_0 –внешнее поле, E^{in} – поле внутри плазмоида, $\varepsilon_p E^{in}$ – поле вблизи границы, перпендикулярной напряженности электрического поля, ε_p – диэлектрическая проницаемость плазмы).

В §3 рассмотрена задача о формировании нитевидного фронта ионизации (распространении высокочастотного стримера). Сформулирована качественная модель формирования нити, связанная с усилением поля в областях поверхности стримера, перпендикулярных напряженности поля (рис. 17). Особенности электростатического взаимодействия нити с полем на поздних стадиях приводят к тому, что усиление поля происходит вблизи острий, поэтому возможно и распространение нити под небольшими углами к полю. Данная модель подтверждена численным моделированием распространения стримера. Результаты для внешнего поля в три в три раза больше пробойного E_{br} и отношения частоты столкновений электронов ν к частоте поля ω равного 10 приведены на рис. 18 и 19 (использовалась диффузионная модель). Численное моделирование подтвердило усиления поля в полярных областях. В реальной задаче усиление оказывается более низким, чем в модели, предполагающей нулевую толщину фронта ионизации. Тем не менее, усиление ионизации имеет место, и перемещение границы в результате движения фронта ионизации в этой области оказывается гораздо более быстрым, чем в экваториальной области. Дальнейшее вытягивание плазмоида сопровождается увеличением поля в плазме за счет геометрических эффектов (поле в длинной тонкой нити размером много меньше длины волны равно внешнему полю). Момент начала формирования нити совпадает с началом резкого роста диэлектрической проницаемости плазмы $\nu n_e / \omega n_C \geq 1$. Затем (рис. 19) происходит резкое увеличение продольной скорости распространения разряда и падение по-

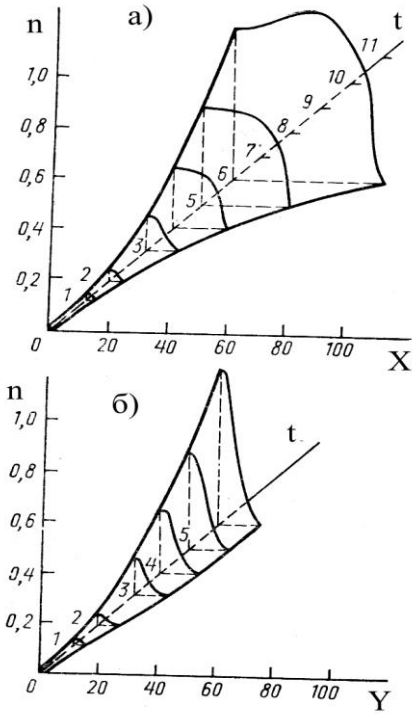


Рис. 18. Временная эволюция распределения плотности электронов вдоль большой и малой осей плазмоида ($\nu/\omega=10$, $E=3E_{br}$).

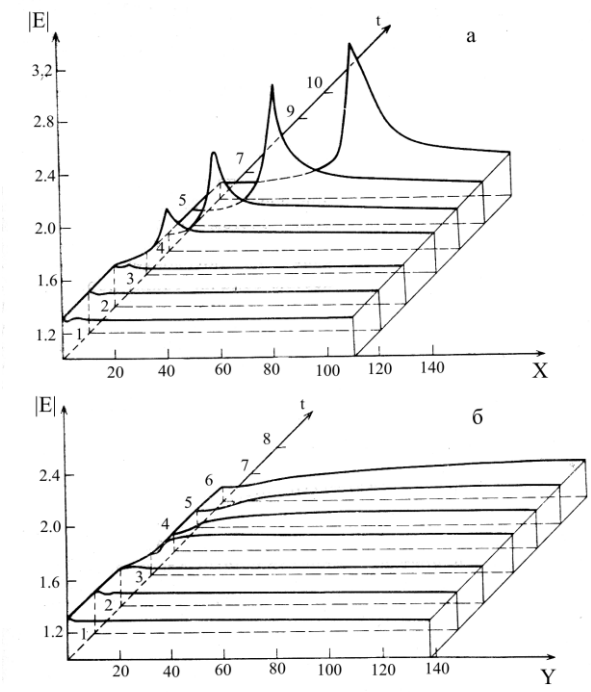


Рис. 19. Временная эволюция распределения электрического поля вдоль большой и малой осей плазмоида.

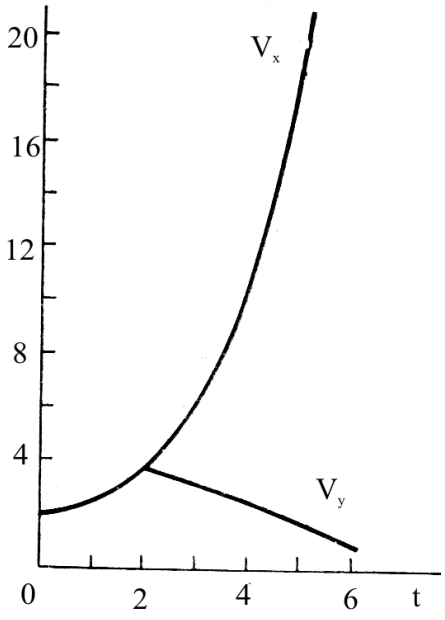
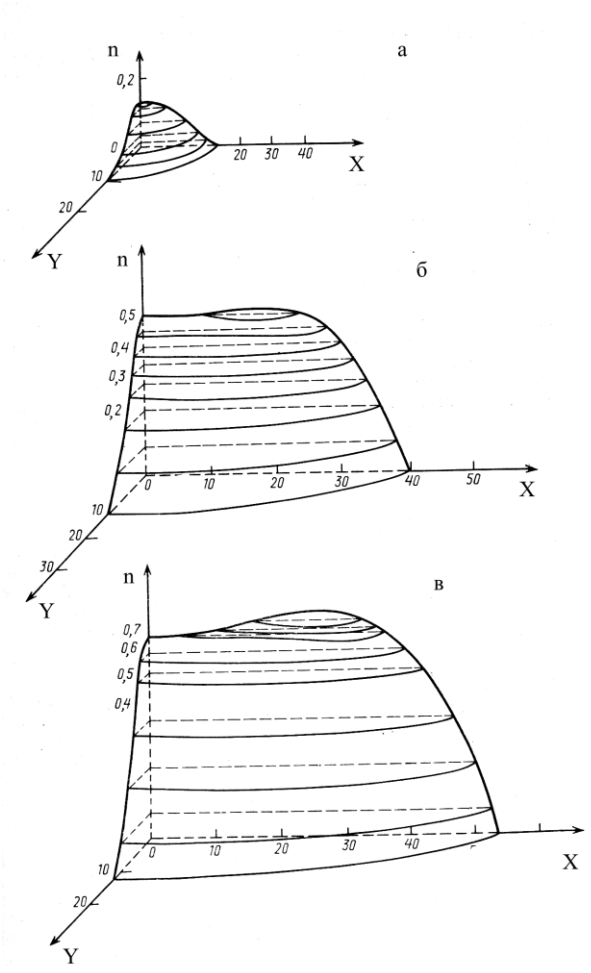


Рис. 20. Зависимости скоростей перемещения границ плазмоида от времени.

Рис. 21. Зависимость плотности электронов в плазме от координат для трех фиксированных моментов времени t=1.3, 3, 5.08 (в безразмерных переменных).



перечной. При расчете предполагалось, что $\nu/\omega >> 1$. Временная эволюция формы плазмоида, полученная в численных расчетах приведена на рис. 21. §4 по священ сравнению результатов расчета характеристик разряда, полученных в §3 с экспериментом, а также анализом более поздних результатов. Расчеты характеристик разряда, выполненные Ведениным и Розановым в 1992 и Ходатаевым с соавторами в 2002, также подтвердили идею о связи вытягивания нити с электростатическим усилением поля, высказанную автором в 1985 г. Измерения проводимости плазмы в нити, выполненные с участием автора [9], показали, что в плазменной нити выполнено условие $|\varepsilon| >> 1$. Экспериментальные исследования эволюции разряда, проведенные коллективом МРТИ также позволяют утверждать, что несмотря на более сложные процессы формирования плазмы внутри нити (развитие перегревной неустойчивости и т.п., возможность смены механизма распространения), процесс вытягивания нити связан с прежде всего электростатическим усилением поля в широкой области внешних условий.

В §5 предложенные в главе принципы анализа свойств разряда в свободном пространстве применены к исследованию разряда постоянного тока в поперечном потоке газа. Использовалась кинетическая модель, учитывающая диффузию заряженных частиц и рекомбинацию. Качественный анализ показал, что до тех пор, пока скорость потока газа меньше скорости распространения фронта ионизации, форма разряда близка к наблюдающейся в покоящемся газе. Затем происходит постепенный переход к стационарному разряду в виде двух плазменных следов, формирующихся за катодом и анодом. Синус угла между границей плазменного столба и направлением скорости нейтралов C_S равен отношению скорости фронта ионизации к C_S. Аналогичное поведение разряда было зафиксировано в экспериментах Васильевой и Баранова в 1964 и последующих экспериментах Баранова с соавторами 1966–1972 гг. Дальнейшее увеличение скорости приводит к тому, что длина плазменных следов растет, падение напряжения на разряде увеличивается выше напряжения пробоя и происходит вторичный пробой межэлектродного промежутка. Разряд при этом переходит в импульсно периодическую форму, которая наблюдается во множестве экспериментов, проводимых в связи с решением задач плазменной аэродинамики. Для подтверждения качественной модели было проведено численное моделирование поперечного разряда в сверхзвуковом потоке газа в диапазоне давлений 30 – 600 Тор, при скорости течения газа 300 – 1200 м/с, в двумерной геометрии. Пример распределения плотности заряженных частиц в пространстве для одного из моментов времени приведен на рис. 22.

Помимо качественного подтверждения изменения формы разряда численное моделирование показало, что свойства плазмы приэлектродных областей разряда слабо зависят от размера и формы плазменных следов, выносимых течением нейтралов. Если пренебречь возможностью вторичного пробоя, что достигается

при очень высокой частоте прилипания в слабоионизованной области, то на больших временах $t \to \infty$ реализуются одинаковые формы разряда. Размер поперечного сечения столба растет с удалением от катода. При высоких давлениях газа расчетный размер сечения разряда оказывается больше наблюдаемого в эксперименте, что объясняется отсутствием учета нагрева нейтралов в численной модели.

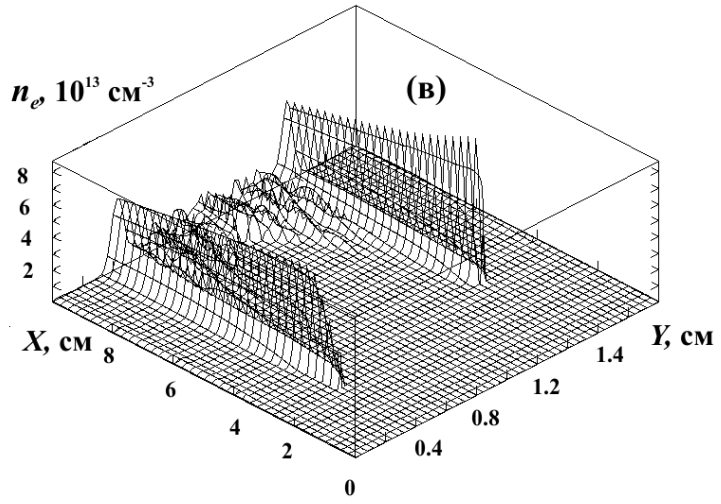


Рис. 22. Пространственное распределение плотности электронов в разряде. Двумерная модель. Плотность нейтралов – 2.12×10^{19} см$^{-3}$, плотность тока на катоде – 1 А/см^2. Размер электрода 1 см, расстояние между электродами 1.2 см, скорость течения 120000 см/с, ширина потока – 1.4 см. Момент времени t – 127 мкс после первоначального пробоя.

Проведенный анализ разрядов постоянного тока, ВЧ и СВЧ разрядов в свободном пространстве позволяет сделать вывод, что получение количественного согласия теории с экспериментом невозможно без одновременного учета электродинамики и полной кинетики процессов в плазме. Однако данная задача оказывается сложной даже для современных ЭВМ. Поэтому в §6 была проведена попытка построить приближенных подход к решению задачи многокомпонентной кинетики, основанный на сведении ее к одному уравнению диффузии с эффективными коэффициентами рождения и гибели частиц и коэффициентами переноса. Основой для развития данного подхода является выделение химических процессов, обладающих разными скоростями установления[7]. По существу применяемый метод представляет применение к задаче о распространении фронта ионизации «принципа подчинения», предложенного и развитого Г. Хакеном. Возможности метода продемонстрированы на простых задачах о распространении фронта в среде с прилипанием и о влиянии ступенчатой ионизации на распространение фронта ионизации, для которых получены простые формулы для скорости и параметров фронта ионизации. Для того, чтобы оценить возможность применения данного метода к более сложным задачам, в §6 проведено моделирование плазмы

[7] Например, при развитии пробоя в воздухе прилипательно-отлипательный баланс устанавливается гораздо быстрее, чем наработка заряженных частиц в целом.

положительного столба в воздухе с системой химических реакций, содержащих около 20 химических компонент. Разряд постоянного тока был выбран для того чтобы исключить влияние особенностей электродинамики на рассматриваемые процессы. Расчет показал, что на начальном этапе в распределении заряженных частиц можно выделить только одну асимптотику в периферийных областях разряда, и он должен хорошо описываться в рамках однокомпонентного уравнения диффузии с нелинейным источником. На последующих стадиях можно выделить от двух до трех асимптотических переходов из одного состояния в другое. Существуют также области, образовавшиеся на предыдущей стадии разряда, в которых происходит медленное накопление или распад плазмы, в зависимости от эволюции плазмы в центральной области, а роль переноса несущественна. Как те, так и другие области хорошо описываются с помощью приближенной модели §6, поэтому можно ожидать, что предложенные модели будут удовлетворительно описывать процессы в разряде в целом, причем при правильном отборе системы химических реакций это описание будет не только качественным, но и количественным. В §7 сформулированы выводы к главе 5.

После рассмотрения в главах 1–4 эффектов, которые имеют место в классических формах разряда, были изучены процессы в одной из новых форм, полученной в последние годы (Глава 5) – разряд на поверхности диэлектрической антенны (Рис. 23). Этот разряд перспективен для использования в плазменной аэродинамике для управления обтеканием тел газовыми потоками, инициации горения топливо воздушной смеси, а при низких давлениях газа может быть основой для построения технологических реакторов. Специфика разряда заключается в том, что на начальном этапе возбуждаемые в системе волны являются волнами диэлектрического волновода, а возбуждение плазмы приводит к видоизменению их дисперсии и превращению в поверхностные волны. Кроме того, в отличие от классического разряда, со всех сторон ограниченного твердотельной границей (металлической или диэлектрической) разряд на поверхности антенны имеет внешнюю твердотельную границу только с одной стороны. Впервые разряд такого типа был осуществлен В.А. Бабенко с соавторами, однако наиболее подробное исследование разряда было проведено В.М. Шибковым. В §1 главы V проанализированы различные подходы к построению модели данного типа разряда.

Рис. 23. Фотография разряда на поверхности диэлектрической антенны. Давление воздуха P=40 Тор, длительность импульса СВЧ τ=100 мкс, мощность СВЧ волны $W_и$=40 кВт, поперечные размеры антенны 0.9×2.1 см^2.

Впервые теория разряда, поддерживаемого поверхностной волной распространяющейся вдоль границы плазмы, в газе, граничащем с диэлектрическим полупространством, была предложена Боевым. Однако в его работах предполагалось, что плотность электронов локально связана с значением напряженности электрического поля, что соответствует относительно большим давлениями нейтралов и малой плотностью электронов. Хотя теория Боева охватывает широкую область параметров плазмы, однако в реальных условиях упомянутых ранее экспериментов плотность электронов на границе антенны и плазмы велика (10^{13}–10^{14} $см^{-3}$), а глубина проникновения электромагнитного поля в плазму мала, таким образом баланс энергии в плазме оказывается нелокальным. Кроме того, теории, не учитывающие процессов переноса, не могут описать процесс установления стационарного состояния разряда от начального возмущения.

Основой для построения модели разряда в данной главе является различие в характерных размерах системы – глубина проникновения поля в плазму Δ много меньше поперечного размера плазмы l, который в свою очередь много меньше длины антенны L (последнее условие может не выполняться в разряде низкого давления (меньше 0.01 Тор) при малых размерах антенны). В рассмотренной модели разряда предполагалось: 1 – выделение энергии СВЧ волны и ее передача электронному газу происходит в тонком слое вблизи поверхности антенны. Увеличение размеров плазмы на начальном этапе происходит за счет диффузионной волны ионизации (данное предположение согласуется с экспериментом). После установления стационарного состояния перенос энергии вглубь плазмы происходит за счет электронной теплопроводности, а баланс числа частиц можно считать локальным. В этих условиях устанавливающееся поперечное пространственное распределение температуры в безразмерных переменных описывается универсальной кривой, зависящей от рода газа. Расчету этой универсальной кривой посвящен §2 (рис. 24). В силу малости глубины проникновения поля в плазму Δ при расчете дисперсии волн и распределения поля волны в окрестности волновода плазму, окружающую волновод можно считать бесконечной. Характеристики волн, распространяющиеся в данной системе рассмотрены в §3. Численный расчет показал, что влияние неоднородности плазмы на характеристики поверхностной волны невелико. Малое значение продольной неоднородности плазмы по сравнению с поперечной позволяет при расчете продольной структуры поля не учитывать отражение поверхностной волны от торца плазмы. В этом случае продольное распределение плотности электронов также описывается универсальной кривой, полученной в §4. Расчетные зависимости плотности электронов от потока мощности в поверхностной волне в данном сечении и зависимости плотности электронов от координаты приведены на рис. 25 и 26. Задача о формировании диффузионного слоя на границе плазмы с антенной рассмотрена в §6. Наличие

слоя с уменьшенной плотностью электронов приводит к дополнительному поглощению поверхностной волны в плазме. Сравнение результатов расчета в §7 с экспериментами, проведенными В.М. Шибковым с соавторами, показывает их

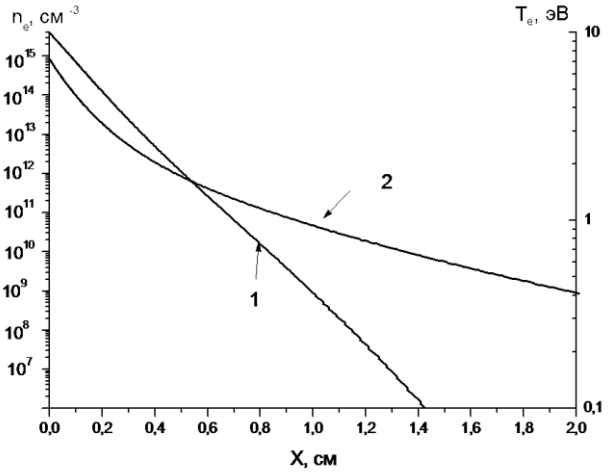


Рис. 24. Распределение плотности (1) и температуры (2) электронов n в плазме разряда как функция поперечной координаты для разряда в воздухе при давлении 1 Тор.

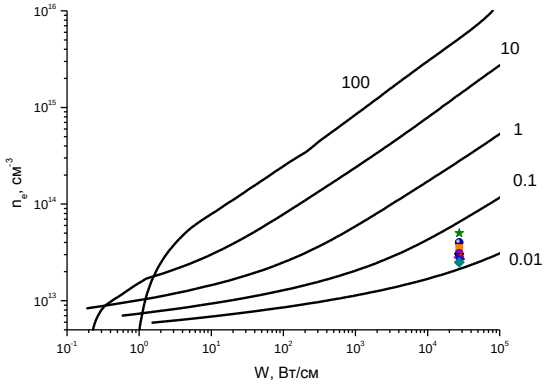


Рис. 25. Зависимость мощности поверхностной волны распространяющейся вдоль антенны (Вт на единицу ширины антенны) от плотности электронов в плазме. Цифра у кривой – отношение частоты столкновений электронов к частоте поля. Экспериментальные точки (получены В.М. Шибковым, ■ – 0.1 (ν/ω=0.007), ● – 0.2 (0.014), ◘ – 0.3 (0.02),◙ – 0.5 (0.035), ♦ – 1 (0.07), ▲ – 2 (0.14), ► – 5 (0.35), ◄ – 10 (0.7), ▼ – 20 (1.4) Тор).

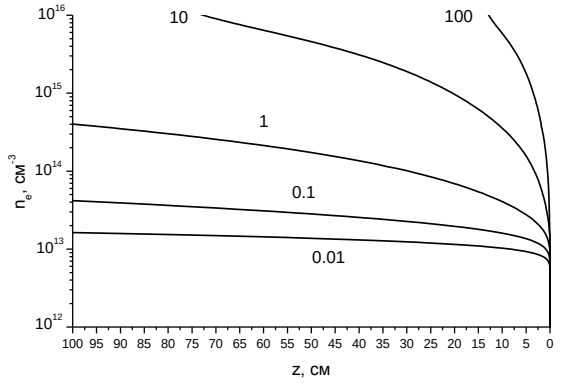


Рис. 26. Зависимость плотности плазмы вблизи границы плазмы и антенны как функция продольной координаты z для разряда в воздухе. Цифра у кривой – давление нейтралов. Расстояние отсчитывается от точки погасания разряда в сторону генератора. СВЧ волна падает слева – со стороны больших значений координаты. Для разряда при высоких давлениях, при котором точка обрыва разряда не фиксирована резонансом поверхностной волны, в качестве граничной взята точка 10^{12} см$^{-3}$.

удовлетворительное качественное согласие. Плотности электронов, измеренные в разряде на расстоянии 0.5 см от антенны при потоке мощности по волноводу 55 кВт нанесены на рис. 25. Правильно объясняется увеличение поперечных и продольных размеров разряда от мощности. Количественное различие на рис. 25

может быть вызвано отражением СВЧ волны от антенны, а также неучетом в теории формирования диффузионного слоя на границе плазмы с антенной. Зависимости поля в плазме, рассчитанные по данным частоты ионизации позволяют получить напряженность поля в волноводе и по его значению с помощью модели §2 оценить значение плотности электронов как функцию расстояния вдоль антенны (Рис. 27). Полученные результаты также согласуются с данными расчета.

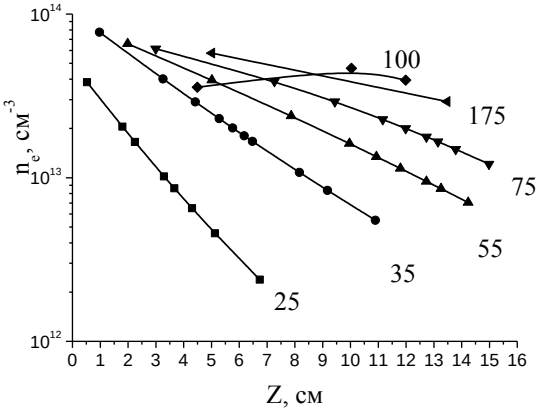


Рис. 27. Плотность электронов, как функция продольной координаты.[8] Давление воздуха p = 10 Тор и подводимой мощности W, kW:*1* — 25, *2* — 35, *3* — 55, *4* — 75, *5* — 100, *6* — 175.

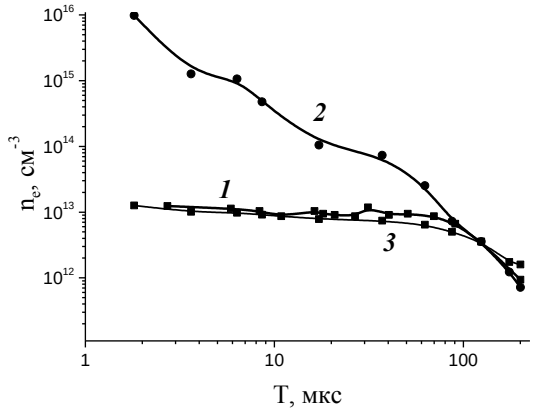


Рис. 28. Плотность электронов вблизи поверхности антенны (2) и у противоположной от нее границы плазмы (1). Кривая 3 соответствует плотности у границы антенны с учетом электростатического ослабления СВЧ поля. Давление воздуха 0.5 Тор, мощность СВЧ волны 35 кВт.[9]

Аналогичным образом могут быть обработаны данные по скорости распространения разряда в поперечном и продольном направлении.[10] Рассчитанные из эксперимента значения плотности электронов приведены на рис. 28. Кривая 1 содержит значения плотности электронов на границе, удаленной от антенны. Кривая 2 – на границе вблизи антенны. Последние являются явно завышенными. Однако если учесть, что поле в плазме отличается от поля на фронте и может быть

---

[8] Обработка экспериментальных данных, полученных В.М. Шибковым (Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 74-79, рис. 6).

[9] Обработка экспериментальных данных, полученных В.М. Шибковым (Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Константиновский Р.С., Сурконт О.С., Черников В.А. Физика плазмы. 2007. Т. 35. Вып. 54. С. 72-79).

[10] Значение скорости распространения в предположении о диффузионном механизме позволяет рассчитать частоту ионизации, а по частоте ионизации при известном коэффициенте рекомбинации – плотность электронов.

существенно (в |ε| раз) меньше (см. гл. 4), удается получить более близкие к эксперименту значения (кривая 3).

Вместе с тем сравнение теории с экспериментом показало ряд отличий. Во-первых, вблизи контакта плазмы с антенной формируется тонкий слой плазмы, плотность которого существенно выше, чем предсказываемая теорией. Одним из объяснений этого эффекта может быть увеличение температуры нейтрального газа. Кроме того, в количественной модели кроме переноса энергии электронами необходимо учесть перенос излучения, диффузию возбужденных частиц и т.п. Эти эффекты могут привести к увеличению поперечного размера по сравнению с полученным в расчете. С другой стороны учет этих явлений привел бы к тому, что поперечное распределение плотности электронов уже не было бы универсальной кривой, так как относительная роль этих процессов изменялась бы с изменением давления. Таким образом, построенная теория позволяет качественно описать поведение параметров разряда, и, несмотря на некоторые недочеты, позволяет наметить пути к дальнейшему ее развитию. В заключение работы приведены основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе дана теория различных модификаций газоразрядной плазмы, существенно расширяющая области внешних условий, при которых возможен расчет ее характеристик.

● Выведено обобщение интегро-дифференциального уравнения плазмы и слоя Ленгмюра и Тонкса, учитывающее дополнительно перезарядку ионов. Данное уравнение позволяет получить пространственное распределение плотности заряженных частиц в разряде, ограниченном стенками, при произвольном соотношении между размером разряда и длиной свободного пробега ионов, включая режим свободного падения ионов на стенку, диффузионный режим (с учетом аномального дрейфа ионов) и в промежуточной области, типичной для плазмохимических реакторов. Указанное уравнение решено численными методами для случая, когда основным процессом при столкновении иона с нейтралом является перезарядка. Получено аналитическое выражение для функции распределения по энергиям ионов в любой точке плазмы. Переход от диффузионного режима движения ионов к режиму свободного пробега происходит непрерывным образом, при этом потери частиц в плазме при уменьшении давления растут монотонно.

● Уравнения гидродинамики с учетом ионизации, описывающие стационарное распределение заряженных частиц в объеме положительного столба разряда и потоки заряженных частиц на стенки в диффузионном режиме с учетом инерции ионов, решены методом преобразования годографа для двух- и трехмерно неоднородной плазмы с учетом нелинейности и химических реакций в объеме

и на поверхности. Анализ полученных уравнений вблизи критической точки, соответствующей границе плазмы и слоя пространственного заряда показал, что известное условие равенства скорости течения плазмы на границе ионно-звуковой скорости (критерий Бома) должно выполняться для нормальной к границе компоненты поля. Полученные решения позволяют оценить степень неоднородности плазмы в реальном плазменном технологическом реакторе при низком давлении.

2. Построена модель СВЧ разряда в волноводе, учитывающая возможность распространения вдоль разряда поверхностных волн. Теория показала следующее.

● Периодическая неоднородность ограниченной плазмы разряда в направлении, перпендикулярном вектору напряженности электрического поля при плотностях выше критической приводит к увеличению поглощения падающей волны в плазме и уменьшению отражения волны от плазмы за счет возбуждения поверхностных волн.

● При низком давлении газа самовозбуждение поверхностных волн происходит за счет ионизационно-полевой неустойчивости плазмы, сопровождающейся возникновением периодической модуляции плотности электронов. Инкремент неустойчивости по порядку величины близок к частоте ионизации в плазме.

● Неустойчивость стабилизируется при определенной амплитуде поверхностной волны вследствие выхода разряда из резонанса из-за изменения усредненной плотности электронов в разряде.

● Развитие неустойчивости приводит к увеличению доли энергии, поглощаемой в разряде и уменьшению минимальной мощности поддержания разряда. Зависимость характеристик разряда от подводимой мощности в режиме с неустойчивостью становится неоднозначной.

● Данный эффект может иметь место в любом разряде, размер которого превышает половину длины какого-либо типа электромагнитной волны, распространяющейся в газоразрядной плазме, и должен быть учтен при разработке плазмохимических реакторов нового поколения, отличающихся большим размером плазмы.

● С помощью предложенной модели объяснен наблюдаемый в эксперименте гистерезис мощностных характеристик и формирование пространственных структур в СВЧ разряде низкого давления. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик разряда показало их удовлетворительное согласие.

3. Экспериментально подтверждено возбуждение поверхностной волны в СВЧ разряде при формировании неоднородной пространственной структуры в условиях, предсказываемых теорией.

4. Построена теория распространения поверхностных волн вдоль границы плазмы с металлом при наличии на границе слоя пространственного заряда. Дан-

ная задача актуальна для управления энергией ионов в плазменных реакторах для технологий наноэлектроники. Рассчитаны линейные дисперсионные кривые волн с учетом столкновений электронов и нелинейные в бесстолкновительной плазме. Теория привела к следующим результатам.

● В столкновительной плазме существует область параметров, при которых волна не распространяется и, следовательно, эффективное управление энергией ионов невозможно. Для перехода в рабочую область необходимо увеличение плотности электронов.

● Основным механизмом нелинейности этих поверхностных волн являются осцилляции границ плазмы, обусловленные электрическим полем этих волн, а наиболее сильное изменение дисперсионных характеристик связано с изменением толщины слоя.

● Поверхностные волны, распространяющиеся вдоль слоя пространственного заряда на границе плазмы с металлом, могут использоваться для управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, и существенно влияют на свойства разряда.

● В пределе малых размеров электрода и плазмы из полученной модели следуют известные и проверенные в эксперименте результаты для импеданса емкостного СВЧ разряда низкого давления.

● Хорошо известный геометрический резонанс плазма-слой пространственного заряда в сосредоточенных системах является предельным случаем резонанса в распределенных системах связанных с распространением поверхностных волн в условиях, когда глубина проникновения поверхностной волны в плазму порядка межэлектродного расстояния.

5. Разработана теория распространения плоского фронта ионизации в поле СВЧ волны, обусловленного диффузией, с учётом отражения волны от набегающей плазмы. Эта задача расширяет задачу о формировании газового разряда в замкнутом объеме на случай трансляционно-инвариантной среды. Получены следующие результаты.

● Скорость распространения волны ионизации зависит от коэффициента отражения волны от плазмы и определяется соотношением между характерным размером фронта и длиной волны в вакууме.

● Сравнение результатов расчета с экспериментом показало, что распространение разряда в волноводе в области давлений 0.1– 10 Тор может быть количественно объяснено диффузионным механизмом.

6. Рассмотрена задача о формировании нитевидной структуры разряда высокого давления. Предложена модель формирования сверхвысокочастотного стримера, основанная на электростатическом усилении СВЧ поля вблизи области, где поле перпендикулярно поверхности плазмы. Данная модель подтверждена ре-

зультатами численного моделирования. Анализ экспериментальных и теоретических результатов других авторов подтвердил предложенный автором механизм формирования плазменной нити как основной, несмотря на сложность наблюдаемых явлений (возможность развития перегревной неустойчивости, генерации ударных волн, нарушения электростатического приближения при длинах нити, приближающейся к половине длины волны, возможности других механизмов распространения разряда).

7. На основе представления о фронте ионизации как одной из форм разряда в свободном пространстве разработана физическая модель процессов в поперечном разряде постоянного тока в потоке газа. Модель правильно описывает переход от обычного разряда к разряду в виде двух плазменных следов, а затем к импульсно-периодическому разряду по мере увеличения скорости потока.

8. Разработана самосогласованная нелинейная теория стационарного СВЧ разряда, поддерживаемого волной, распространяющейся вдоль поверхности диэлектрической антенны, позволяющая рассчитать пространственное распределение плотности заряженных частиц для заданной мощности и частоты СВЧ волны. Модель позволяет рассчитать пространственное распределение плотностей заряженных частиц в окрестности антенны, продольный и поперечный размер разряда, определяемые соответственно поглощением поверхностной волны в плазме и электронной теплопроводностью. Сравнение результатов теории с экспериментом показало их качественное согласие.

Основные результаты представлены в следующих работах:

1. Булкин П.С., Двинин С.А., Солнцев Г.С. Поглощение СВЧ волны при резонансном нагреве плазмы с высокой концентрацией электронов внутри волновода. // Вестник Московского университета. Сер. III, Физика, Астрономия. 1982. Т. 23. №6. С. 84-87.

2. Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. Ионизационная неустойчивость плазмы, связанная с поверхностной волной и ее влияние на структуру стационарного СВЧ разряда. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1228-1235.

3. Dvinin S.A., Solntzev G.S. On the theory of stationary nonuniform UHF discharge into waveguide. // XVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Contributed papers. Dusseldorf. 1983. V. 5. P. 752-753.

4. Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. Об изменении энергетических характеристик СВЧ разряда при развитии ионизационной неустойчивости на поверхностной волне. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. Вып. 5. С. 1058-1067.

5. Двинин С.А., Постников С.А., Солнцев Г.С., Цветкова Л.И. О самовозбуждении стоячей поверхностной волны в стационарном СВЧ разряде в волноводе и ее влиянии на свойства разряда. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. Вып. 6. С. 1297-

1302.
6. Двинин С.А. О механизме формирования нитевидной структуры СВЧ разряда высокого давления. // Вестник Московского университета. Сер. III, Физика, Астрономия. 1985. Т. 26. №6. С. 30-33.
7. Булкин П.С., Двинин С.А., Солнцев Г.С., Шкрадюк И.Э. Об измерении параметров импульсного СВЧ разряда в волноводе методом проводимости. // Вестник Московского университета. Сер. III, Физика, Астрономия. 1986. Т. 27. №5. С. 15-21.
8. Двинин С.А., Довженко В.А. Диффузионное распространение фронта ионизации в поле СВЧ волны. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып.1. С. 66-76.
9. Dvinin S.A., Kuzovnikov A.A. Plane ionization waves caused by diffusion in high frequency fields. // XVII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Contributed papers. Belgrade. 10-14 July 1989. P. 818-819.
10. Gildenburg V.B., Guschin I.S., Dvinin S.A., Kim A.V. Dynamics of high frequency streamer. // XVII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Contributed papers. Belgrade. 10-14 July 1989. P. 900-901.
11. Гильденбург В.Б., Гущин И.С., Двинин С.А., Ким А.В. Динамика высокочастотного стримера. // ЖЭТФ. 1990. Т. 96. Вып. 4. С. 1151-1158.
12. Гущин И.С., Двинин С.А. Численное моделирование развития разряда в высокочастотном квазистатическом поле. // Труды факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ. Методы математического моделирования и вычислительной диагностики. М.: Изд-во МГУ. 1990. С. 275-281.
13. Guschin I.S., Dvinin S.A. Discharge simulation in a high-frequency quasistatic field. // Computational Mathematics and Modeling. 1992. V. 3. N3. P. 339–345.
14. Dvinin S.A., Ponomarev A.V., Ovsyannikov S.V. On the theory of curve ionization fronts in high frequency fields. // XVII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Contributed papers. Pisa. Italy 6-11 July 1991. V.5 P. 2067-2068.
15. Гильденбург В.Б., Гущин И.С., Двинин С.А., Ким А.В. Динамика высокочастотного стримера. // В сб. "Нелинейные волны", Физика и Астрофизика. М.: "Наука", 1993. С. 118-125.
16. Вологиров А.Г., Двинин С.А., Слепцов В.В. Способ создания однородной плазмы с рабочей зоной большой площади на основе разряда в ВЧ-СВЧ диапазонах и устройство для его осуществления (варианты). // Патент России №2124248 от 27.05.98. С. 1–16.
17. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. Уравнение для плазмы и граничного слоя пространственного заряда с учетом столкновений ионов. // Вестник Московского университета. Сер. III, Физика, Астрономия. 1999. Т. 40. №5. С. 13–15.
18. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. К теории пристеночного

слоя в плазме газового разряда. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 882-892.

19. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. Функция распределения ионов по энергиям в положительном столбе газового разряда в чистых газах. // Вестник Московского университета. Сер. III, Физика, Астрономия. 2000. Т. 41. №1. С. 18–21.

20. Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. Кинетическая теория положительного столба газового разряда и пристеночного слоя. // Физика плазмы. 2000. Т. 26, Вып. 2. С. 179-189.

21. Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P., Timofeev I.B., Shibkov V.M. Features of transversal gas discharge in a supersonic gas flow. // The 2nd workshop on Magneto- Plasma- Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow. 5 April - 7 April 2000. P. 169-174.

22. Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P., Timofeev I.B., Shibkov V.M. Experimental and Theoretical research of DC transversal gas discharge in a supersonic gas flow. // The 3rd workshop on Magneto- Plasma- Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow. 24 april - 26 april 2001. P. 129-134.

23. Shibkov V.M., Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P., Shibkova L.V., Timofeev I.B., Vinogradov D.A., Voskanyan A.V. Dense large-diameter uniform plasma of a surface microwave discharge. // 15th International Symposium on Plasma Chemistry. Volume I. Oral Contributions. 9-10 July, 2001. France. P. 179-184.

24. Shibkov V.M., Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P., Raffoul Ch.N., Shibkova L.V., Timofeev I.B., Van Wie D.M., D.A. Vinogradov, Voskanyan A.V.. Surface microwave discharge in supersonic airflow. 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th Weakly Ionized Gases Workshop, 11-44 June 2001, Anaheim, CA, USA, AIAA 2001-3087. 8 p.

25. Chernikov V., Dvinin S., Ershov A., Shibkov V., Surcont O., Timofeev I., Van Wie D. Parameters and peculiarities of the transversal gas discharges in supersonic flows. // 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th Weakly Ionized Gases Workshop. 11-14 June 2001. Anaheim. CA. USA. AIAA 2001-3085. 6 p.

26. Shibkov V.M., Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P., Karachev A.A., Shibkova L.V., Surkont O.S., Voskanyan A.V. Microwave discharge on external surface of quartz plate. // Micro- and nano electronics 2003. Edited by K.A. Valiev and A.A. Orlikovcky. Proceedings of SPIE. Bellingham. 2004. P. 47-54.

27. Двинин С.А., Ершов А.П., Тимофеев И.Б., Черников В.А., Шибков В.М.. Моделирование разряда постоянного тока в поперечном сверхзвуковом потоке газа. // ТВТ. 2004. Т. 42. №2. С. 181-191.

28. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В., Свиридкина В.С., Омаров М.О. Распределение плотности плазмы в цилиндрической разрядной камере. Вестник

Московского университета. Сер. 3, Физика, Астрономия. 2004. Т. 45. №3. С. 43-46.

29. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В., Свиридкина В.С., Омаров М.О. Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде низкого давления. // Физика плазмы. 2004. Т.30. №12. С. 1043-1051.

30. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. Механизмы распространения поверхностного сверхвысокочастотного разряда. // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 74-79.

31. Dvinin S.A., , Timofeev I.B. Direct Current Discharge in High pressure supersonic gas stream. // Proceedings of the 6th International workshop on magnetoplasma aerodynamics. Volume 2. Moscow. 2005. P. 665–674.

32. Двинин С.А., Кузовников А.А.. Двумерное уравнение плазмы и слоя для положительного столба газового разряда. // Вестник Московского университета. Сер. 3, Физика, Астрономия. 2005. Т. 46. №5, С. 18-22.

33. Shibkov V., Aleksandrov A., Chernikov V., Dvinin S., Ershov A., Shibkova L., Abramova A., Konstantinovkij R., Surkont O., Voskanyan A., and Zlobin V. Surface Microwave Discharge in Air. // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 11 - 15 Jan 2006. Reno. Nevada. USA. AIAA2006-1455. 9 p.

34. Dvinin S.A., Mikheev V.V., Vologirov A.G., Sviridkina V.S. High frequency surface waves on plasma – metal boundary. // Microwave Discharges: Fundamentals and applications. VI International Workshop. Russia. Zvenigorod. September 11-15. 2006. P. 89-95.

35. Dvinin S.A., Mikheev V.V., Shibkov V.M., Sviridkina V.S. Numerical simulations of the microwave discharge on the dielectric antenna surface. // Microwave Discharges: Fundamentals and applications. VI International Workshop. Russia. Zvenigorod. September 11-15, 2006. P. 149-154.

36. Двинин С.А., Михеев В.В., Шибков В.М. К теории сверхвысокочастотного разряда на поверхности диэлектрической антенны. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. Вып. 7. С. 654-665.

37. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. Поверхностный СВЧ разряд в воздухе. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. Вып. 1. С. 77–85.

38. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Двинин С.А., Михеев В.В., Свиридкина В.С. О структуре положительного столба разряда в поперечном потоке воздуха. // Прикладная Физика. 2007. Вып. 1, С. 65-74.

39. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Двинин С.А., Михеев В.В., Свиридкина В.С. О структуре положительного столба разряда в поперечном потоке газа. II. Многокомпонентная кинетика в электроотрицательном газе. Численное моделирование. // Прикладная Физика. 2007. Вып. 2. С. 25–31.

40. Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A., Dvinin S.A., Ershov A.P.,

Konstantinovskij R.S., Shibkova L.V., Surkont O.S., Zlobin V.V.. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. // 44nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 12 - 16 Jan 2007. Reno. Nevada. USA. AIAA2007-0427. 11 p.

41. Двинин С.А. Поверхностные волны в ВЧ и СВЧ разрядах. // Сборник докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция физики. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2007. С. 21–25.

42. Aleksandrov A.F., Bychkov V.L., Dvinin S.A., Mikheev V.V., Sviridkina V.S. Structure and formation modes of direct current discharge in transversal air stream. // Proceedings of the 7th International workshop on magnetoplasma aerodynamics. Moscow. 2007. P. 129–137.

43. Двинин С.А., Вологиров А.Г., Михеев В.В., Свиридкина В.С. Высокочастотные поверхностные волны на границе плазмы с металлом. I. Линейная модель. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. Вып. 8. С. 746–755.

44. Двинин С.А., Вологиров А.Г., Михеев В.В., Свиридкина В.С. Высокочастотные поверхностные волны на границе плазмы с металлом. II. Дисперсия нелинейной волны. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. Вып. 8. С. 756-766.

45. Двинин С.А., Бычков В.Л., Михеев В.В. Структура положительного столба разряда постоянного тока в поперечном потоке воздуха. 5 Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново. 5–8 сентября 2008 г. С. 258–261.