

На правах рукописи

МУРАДОВ АХЛИМАН ХАНАЛИ оглы

**ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УСКОРЕНИЕ
ЭЛЕКТРОНОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ И
НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА**

Специальность 01. 04. 08 — физика и химия плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

№ 27.022

Работа выполнена на кафедре физической электроники
Бакинского государственного университета им. М. Э. Расулзаде

Официальные оппоненты:

Кузнецов Юрий Константинович — доктор физико-математических наук (ХФТИ, г. Харьков)

Рожков Алим Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор (ХГУ, г. Харьков)

Солошенко Игорь Александрович — доктор физико-математических наук (ИФ АН Украины, г. Киев)

Ведущая организация — Институт ядерных исследований АН Украины

Защита диссертации состоится «9» апреля
1993 г. в «17» часов на заседании специализированного совета Д 053.06.01 при Харьковском государственном университете (310108, г. Харьков—103, пр. Курчатова, 31, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан «9» марта 1993 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
доктор физико-математических наук *В.И. Лапшин* ЛАПШИН В. И.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00803306 (K)

АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В низкотемпературной плазме газового разряда характер многих процессов с участием электронов зависит от формы функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ). Знание условий изменения ФРЭЭ, их использование с целью получения плазмы с определенными свойствами и умение управлять параметрами плазмы имеют важное значение. В конкретных условиях форма ФРЭЭ определяется тем, какие механизмы в данном процессе играют преобладающую роль. В стационарном и однородном положительном столбе разряда ФРЭЭ формируется под действием электрического поля, упругих и неупругих столкновений. Однако в ряде случаев нестационарной или неоднородной плазмы роль отдельных членов в кинетическом уравнении возрастает и в определенные моменты времени или области пространства ФРЭЭ отличается от своей формы в стационарных или однородных условиях.

Примером проявления изменений электрокинетических характеристик плазмы может служить положительный столб разряда в режиме модуляции разрядного тока при выполнении определенных условий. Действительно, если в цепь разряда, по которой течет постоянный ток, подключить источник переменной ЭДС, то разрядный ток будет модулироваться. При этом в зависимости от элементарных процессов, происходящих в разряде, от величины, формы и частоты возмущения, наложенного на разрядный ток, появляется ряд интересных эффектов.

Если в разряде ионизация происходит только прямым путем, а заряженные частицы исчезают из газоразрядного объема в результате амбиполярной диффузии, то при частотах модуляции $\nu \ll \frac{1}{2\pi\tau_a}$, где τ_a — время ухода электронов в результате амбиполярной диффузии, концентрация электронов меняется в фазе с разрядным током, а скорость ионизации, следовательно, электронная температура и электрическое поле не меняются.

Заметную глубину модуляции электрического поля можно получить только при частотах порядка $\nu \gtrsim \frac{1}{2\pi\tau_a}$. Если $\nu \gg \frac{1}{2\pi\tau_a}$, то устанавливается некая средняя концентрация

электронов, и т.к. плотность тока j , концентрация электронов n и напряженность продольного электрического поля E связаны соотношением $j = ne v_e E$, где v_e - подвижность электронов, и j периодически меняется, то E должно модулироваться приблизительно так же, как и j . Если при этом выполняется условие $\nu \ll \frac{1}{2\pi\tau_e}$, где τ_e - время релаксации ФРЭЭ, то в каждый момент времени функция распределения успевает установиться, и ее можно рассмотреть как квазистационарную, т.е. образуется плазма с почти постоянной концентрацией и периодически меняющейся электронной температурой.

При более высоких давлениях газа и больших значениях разрядного тока существенную роль в образовании заряженных частиц играет ступенчатая ионизация. В условиях ступенчатой ионизации из-за сравнительно малой частоты разрушения возбужденных атомов, с которых идет ступенчатая ионизация, эффекты модуляции могут появляться при гораздо более низких частотах. При этом характерные частоты, при которых начинают проявляться заметные эффекты в модуляции электрического поля, концентрации метастабильных атомов и электронов, порядка $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_0} (\frac{1}{\tau_m} + \alpha_n n)}$, где τ_m - время диффузии метастабильных атомов к стенкам сосуда, $\alpha_n n$ - скорость их разрушения за счет электронного удара.

Если частота модуляции удовлетворяет условиям $\nu \ll \frac{1}{2\pi\tau_m}$, $\nu \ll \frac{1}{2\pi\tau_0}$, то столб квазистационарен, т.е. концентрация электронов, заселенности метастабильных атомов и напряженность продольного электрического поля имеют те же значения, что и в случае стационарного разряда при соответствующем разрядном токе.

При частотах $\frac{1}{2\pi\tau_m} < \nu < \frac{1}{2\pi\tau_0}$ в ходе концентрации метастабильных атомов появляются сдвиги относительно изменений разрядного тока, и в некоторых фазах появляется остаточная возбужденная или заниженная ионизация. В результате этого в этих фазах скорость ионизации изменяется, следовательно, напряженность электрического поля модулируется. Изменения электрического поля приводят к тому, что форма ФРЭЭ изменяется в различных фазах колебаний.

Из-за того, что число возбуждений и ионизаций очень сильно зависят от формы ФРЭЭ, заметная модуляция поля приводит к росту

среднего числа ионизаций и концентрации электронов, что при данном среднем разрядном токе алет за собой падение среднего значения поля.

Дальнейшее повышение давления газа приводит к тому, что в гибели заряженных частиц возрастает роль объемной рекомбинации. В режиме рекомбинации в амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристиках разряда возникают новые особенности, в частности при довольно низких частотах модуляции разрядного тока напряженность продольного электрического поля подвергается колебаниям с глубиной модуляции, превышающей глубину модуляции разрядного тока. Следовательно изменения формы ФРЭЭ по фазам можно наблюдать при гораздо более низких частотах.

Изменение формы ФРЭЭ и других электроинетических характеристик плазмы возможно также в областях различных неоднородностей разряда. Так, в области изменения сечения ПС разряда образуется двойной электрический слой пространственных зарядов (ДС) и связанный с ним скачок потенциала. В этой области, согласно уравнению Пуассона, изменяется ход потенциала, резко возрастает электрическое поле, электроны приобретают дополнительную энергию, в результате чего ионизация в пограничной области узкой части трубки сильно возрастает. На ФРЭЭ появляется дополнительный максимум, соответствующий группе электронов, ускоренных в ДС. По мере перемещения по круто изменяющейся ветви потенциала, вторичный максимум перемещается в сторону боковых энергий. В результате этого для тех линий, у которых в функции возбуждения имеются острые максимумы, при совпадении этого максимума со вторичным максимумом на ФРЭЭ, создаются наиболее благоприятные условия возбуждения. Таким образом появляется возможность прецизического селективного возбуждения группы уровней в разряде с двойным слоем.

Другим примером проявления ФРЭЭ с двумя максимумами может служить ДС, образовавшийся в результате неоднородности плазменного столба при возникновении неустойчивостей. В таких системах ДС представляет собой область пространственного заряда, сосредоточенную в размерах порядка нескольких десятков радиуса Дебая. В районе ДС разность потенциалов может значительно превышать электронную температуру (выраженную в потенциалах) со стороны

низкого потенциала (т.н. катодной плазмы). Заряженные частицы, попав в область ДС, ускоряются, и в областях, прилегающих к ДС, образуется система, состоящая из пучка и плазмы, со своеобразным видом распределения с двумя максимумами. После прохождения свободных электронов через ДС по анодную сторону происходит взаимодействие пучок-плазма и возникают интенсивные высокочастотные колебания.

Актуальность темы диссертации.

Исследование динамических свойств ПС разряда и их описание исходя из элементарных процессов, происходящих в самом разряде, дает возможность судить о механизме процессов возбуждения и ионизации. Знание и понимание этих процессов со своей стороны помогают при решении вопроса устойчивости тока разряда при заданных условиях и характера установления стационарных состояний. Эти вопросы представляют значительный интерес на пути повышения эффективности излучения газоразрядных источников света низкого давления, при выборе оптимальных рабочих условий ламп высокого давления и газоразрядных лазерных трубок.

После первых работ Грановского /2/ длительное время установилось мнение о том, что при модуляции тока разряда находящегося в ионизационно-диффузионном режиме, заметную глубину модуляции электрического поля можно получить только при частотах, порядка $\nu \sim \frac{1}{2\pi \tau_a}$. Не вдаваясь в детали механизма ионизации считалось, что вплоть до этих частот колебания концентрации электронов следят за колебаниями тока, электрическое поле не модулируется. Однако первые же наши измерения ФРЭЭ в различных фазах колебаний показали, что при условии $\nu < \frac{1}{2\pi \tau_a}$ продольное электрическое поле и ФРЭЭ значительно меняются по периоду колебаний, и этот факт никак невозможно было объяснить в рамках установившегося мнения. Между тем исследование этих явлений в области ступенчатой ионизации и далее в режиме рекомбинации представляло огромный интерес, т.к. в нескольких ведущих фирмах мира велись поиски путей повышения эффективности излучения газоразрядных источников света с использованием модуляции разрядного тока /10, 12/.

Наличие скачка потенциала и связанного с ним вторичного максимума на ФРЭЭ в области изменения сечения разряда приводит

к изменению режимов возбуждения и ионизации в этой области. Изучение этих процессов представляет большой интерес с точки зрения создания ионных источников моно- и дуоплазмотронных геометрий, различных источников света и газовых лазеров /3/. Однако экспериментальное исследование структуры слоев пространственных зарядов, связи распределения потенциала и ФРЭЭ с этой структурой, ускорения электронов и изменения формы ФРЭЭ, процессов возбуждения и ионизации в области ДС не проводилось. Исследование динамики таких сложных систем даже в очень ограниченном рассмотрении представляющие значительные трудности позволяют изучить ряд элементарных процессов, с участием возбужденных атомов.

Изучение ДС в бесстолкновительной плазме, попытка объяснить присутствие быстрых заряженных частиц в космической плазме наличием двойных электрических слоев в магнитосфере Земли и их моделирование в лабораторном и численном эксперименте свидетельствуют о повышенном интересе к этой проблеме /8/. Однако известные из лабораторных экспериментов разности потенциалов ДС обычно имели порядок $\frac{kT_e}{e}$, что препятствовало привлечению механизма ДС для объяснения северных сияний и др. явлений в магнитосфере. Во многих лабораториях мира для получения ДС со скачком потенциала $U \gg \frac{kT_e}{e}$ использовались разрядные камеры с большим объемом между которыми прикладывалась большая разность потенциалов /13/. Значение этой разности потенциалов и определяло значение скачка потенциалов в промежуточной камере. Однако физически более корректным было бы получение $U \gg \frac{kT_e}{e}$ в токовой системе (т.е. при задании источника тока). Поэтому получение и исследование ДС с $U \gg \frac{kT_e}{e}$ при заданном источнике тока представлял значительный интерес.

Цель работы.

I. Исследование динамических свойств разряда в условиях ступенчатой ионизации и далее в режиме рекомбинации. Выявление в конкретных условиях характерных частот изменения электрического поля и ФРЭЭ. Измерение ФРЭЭ в различных фазах колебаний и изучение влияния изменений ФРЭЭ на процессы ионизации и возбуждения в режиме модуляции разрядного тока.

2. Исследование стационарных двойных электрических слоев в области изменения сечения разряда в гелии и ртути. Изучение процесса ускорения электронов в ДС. Рассмотрение некоторых временных характеристик области скачка потенциала.

3. Получение и исследование двойных электрических слоев в бесстолкновительной плазме со значением скачка потенциала, превосходящим эквивалентную электронную температуру.

Задачи работы:

1. Разработка теории ДС разряда в условиях модуляции с учетом ступенчатой ионизации.

2. Расширение области рассмотрения теории на случай рекомбинации.

3. Разработка методики измерения ФРЭЭ и других электрических и оптических характеристик колеблющейся плазмы, с периодически изменяющимися параметрами.

4. Исследование колебаний малой амплитуды электрических и оптических характеристик разряда.

5. Измерение электрокинетических и оптических параметров сильно модулированного разряда.

6. Изучение процесса ускорения электронов и изменения режима возбуждения различных групп уровней в области ДС разряда в гелии.

7. Определение скоростей реакций ступенчатого возбуждения в нестационарном ДС разряда в гелии.

8. Исследование структуры пространственных зарядов и установление связи распределения потенциала и ФРЭЭ разряда в ртути.

9. Изучение скоростей реакций с участием возбужденных атомов ртути в нестационарном ДС разряда.

10. Измерение ФРЭЭ в конической трубке при различных направлениях протекания тока.

11. Получение и исследование двойных электрических слоев со скачком потенциала $U \gg \frac{k T_e}{e}$ в плазме при очень низких давлениях.

12. Развитие методов диагностики флуктуирующей плазмы. Исследование релаксации электронов и баланса числа электронов в анодной плазме.

Объект исследования. Основными объектами исследования

ожили разряды в ртути, гелии и неоне. Выбор этих объектов был связан с тем, что в гелии и неоне хорошо известны границы существования стративных колебаний, а в ртути страты вообще отсутствуют. Поэтому можно было получить разряды без страт, т.к. при исследовании колебательных процессов их наличие привело бы к взаимодействию этих колебаний, что препятствовало бы наблюдению за динамикой процессов. С другой стороны разряды в инертных газах наиболее подходят к рассмотренной трехуровневой модели. В этих разрядах ФРЭЭ быстро спадают за первым потенциалом возбуждения, и скорости прямых ионизаций и возбуждений, связанные с "хвостом" распределения, сильно зависят от напряженности продольного электрического поля. А процессы, определяемые большинством электронов "телом" ФР слабо зависят от поля.

При рассмотрении разрядов с двойными слоями также очень важно было отсутствие колебаний в области неоднородности. Кроме того, атомы гелия и ртути имеют подобный ход эффективных сечений различных групп уровней. Так, в обоих случаях сечения триплетных уровней начиная от порога быстро возрастают, имеют острый максимум, а затем спадают, в то время как сечения синглетных уровней в широком интервале энергий медленно возрастают. Это обстоятельство позволило получить в области ДС изменения отношения заселенностей триплетных и синглетных уровней и использование этого факта при определении скоростей реакций с участием возбужденных атомов.

Научная новизна определяется тем, что в ней:

- Впервые проведены измерения ФРЭЭ в различных фазах колебаний и экспериментально обнаружено новое явление - эффект модуляции электрического поля и изменение ФРЭЭ, при частотах, ниже обратного времени амбиполярной диффузии.

- Создана теория ДС разряда в условиях модуляции с учетом ступенчатой ионизации - дана интерпретация обнаруженного явления.

- Разработанная теория распространена на случай рекомбинации, проведено сравнение с экспериментом.

- Изучен ДС в области изменения сечения разряда, измерены ФРЭЭ в области ДС, получены ФРЭЭ со вторичными максимумами. Обнаружена возможность локального преимущественно селективного

возбуждения различных групп уровней.

- Разработанный метод модуляции применен к ДС в области изменения сечения разряда и получены константы некоторых реакций с участием возбужденных атомов.

- Получены ДС в плазме в бесстолкновительном режиме со значением скачка потенциала, превосходящим эквивалентную электронную температуру на порядок величины. Измерены ФРЭЭ, изучены релаксации пучка электронов, ускоренных в ДС, баланс числа электронов в анодной плазме.

Научная и практическая значимость работы. Выполненное исследование позволило описать частотные зависимости параметров плазмы разряда в широком диапазоне разрядных условий. На его основе объяснен эффект модуляции электрического поля и изменения ФРЭЭ при частотах ниже обратного времени амбиполярной диффузии в условиях ступенчатой ионизации. Предсказаны колебания электрического поля при очень низких частотах в режиме рекомбинации. Полученные результаты могут использоваться для повышения эффективности излучения газоразрядных источников света, при выборе оптимальных рабочих условий ламп высокого давления и газоразрядных лазерных трубок.

Результаты изучения физических процессов в области неоднородности плазмы газового разряда с переменным сечением позволяют осуществлять рациональный выбор конструкции и режимов работы плазменных источников ионов и источников света, использующих исследованный тип разряда. Изучение временных характеристик этих систем позволяет определить скорости некоторых реакций с участием возбужденных атомов.

Выполненные эксперименты показали принципиальную возможность образования скачка потенциала, существенно превосходящего эквивалентную электронную температуру в плазме со стороны низкого потенциала. Эти результаты могут использоваться для объяснения присутствия быстрых заряженных частиц в магнитосфере Земли и явления полярных сияний.

Полученные результаты используются в учебном процессе на кафедре физической электроники БГУ, и вошли в ставшие классическими специальные физические практикумы /5/.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В условиях преобладающей ступенчатой ионизации характерные частоты, при которых проявляются заметные колебания электрического поля и изменения ФРЭЭ существенно ниже, чем в случае прямой ионизации. Причем в случае ступенчатой ионизации амплитуды колебаний электрического поля и концентрации электронов могут иметь максимум при частотах порядка $\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_m} + \alpha_m n \right)}$.

2. При более высоких давлениях и токах, в режиме рекомбинации, характерные частоты, при которых начинает проявляться заметные эффекты в модуляции продольного электрического поля смещаются еще ниже.

3. Результаты экспериментального исследования амплитуд и фаз колебаний малой амплитуды концентрации электронов, напряженности продольного электрического поля, заселенностей метастабильных уровней в ПС разряда в условиях прямой и ступенчатой ионизации - амбиполярной диффузии и ступенчатой ионизации - рекомбинации. Результаты сравнения полученных экспериментальных данных с теоретическими.

4. Колебания электрического поля в ПС разряда приводят к изменениям ФРЭЭ в различных фазах колебаний. В тех фазах, когда электрическое поле имеет большее значение, ФР имеет большее количество быстрых электронов.

5. Формирование двойного электрического слоя в ПС разряда с переменным сечением. Образование ФРЭЭ со вторичным максимумом в результате ускорения электронов в ДС и изменение режимов возбуждения различных групп уровней в гелии и ртути.

6. Константы скоростей реакций с участием возбужденных атомов гелия и ртути, определенных в нестационарном двойном слое разряда с переменным сечением.

7. Принципиальная возможность получения двойных электрических слоев в бесстолкновительной плазме со значением скачка потенциала, существенно превосходящим эквивалентную электронную температуру. Метод исследования и механизм релаксации ускоренных в ДС заряженных частиц, баланс числа электронов в анодной плазме.

Апробация работы и публикации. Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены на I Всесоюзной конференции по спектроскопии низкотемпературной плазмы, Ленинград, 1973; XI Международной

конференции по явлениям в ионизованных газах, Прага, 1973; IV Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы, Киев, 1975; IV Республиканской межвузовской конференции по физике, Баку, 1978; Республиканской научно-технической конференции "Достижения и перспективы развития радиотехники и электроники", Баку, 1982; VI Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы, Ленинград, 1983; Всесоюзном совещании по проблемам возникновения и динамики двойных электрических слоев в токовых и пучково-плазменных системах, Сочи, 1983; XI Международной конференции по атомной спектроскопии. Болгария, Варна, 1986; II Всесоюзной конференции по физике газового разряда, Киев, 1986; IV Всесоюзной конференции по физике газового разряда, Махачкала, 1988; Всесоюзной конференции по спектроскопии низкотемпературной плазмы, Петрозаводск, 1990; XII Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Италия, Пиза, 1991; VI Симпозиуме по ДС и другим нелинейным структурам в плазме, Австрия, Иннсбрук, 1992, VI Всесоюзной конференции по физике газового разряда, Казань, 1992 г.

Результаты работы по теме диссертации в разные годы докладывались на семинарах кафедры физической электроники БГУ, семинарах кафедры оптики ЛГУ, семинарах кафедры электроники МГУ, семинарах отдела электроники и физики плазмы Королевской Высшей Технической Школы, г.Стокгольм, на семинаре сектора физики плазмы ИОСАН. Теме диссертации посвящено 30 работ, основное ее содержание изложено в работах, приведенных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации 259 стр. машинописного текста, включая 67 рисунков, 9 таблиц. Список литературы содержит 203 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, ее связь с проблемами, представляющими в настоящее время научный и практический интерес. Приведены цель и задачи работы, особенности объектов исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и изложена структура диссертации.

В первой главе описаны экспериментальные методы исследования неоднородной и нестационарной плазмы. Хотя в каждом конкретном случае разработаны оригинальные методы измерений, с целью облегчения чтения диссертации наиболее общие, основополагающие методы выделены в отдельную главу. Здесь большое внимание уделяется зондовым методам диагностики. Рассмотрены способы определения ФРЭЭ методом второй производной с использованием переменного сигнала малой амплитуды, вводимого в зондовую цепь. Рассмотрена методика измерения ФРЭЭ в плазме, с периодически изменяющимися параметрами. Описана методика измерения других электрических параметров плазмы. Проведена оценка времени формирования зондового слоя, определены пределы применимости метода.

Далее рассмотрены оптические методы диагностики колеблющейся плазмы. Описана методика измерения заселенностей нижних возбужденных уровней по поглощению спектральных линий. Рассмотрена методика измерения абсолютных интенсивностей спектральных линий и определения заселенностей высоковозбужденных уровней по испусканию спектральных линий.

Во второй главе рассматривается ПС разряда в режиме модуляции разрядного тока. Описаны различные подходы в исследовании динамических свойств разряда. Приводятся результаты линейной теории ПС разряда в условиях модуляции с учетом ступенчатой ионизации. Рассмотрение проводится на основе системы уравнений, состоящей из уравнений баланса электронов, метастабильных атомов и выражения тока разряда.

$$\frac{dN_e(t)}{dt} = N_o \alpha_{oi}(\varepsilon) n_e(t) + N_m(t) \alpha_{mi} n_e(t) - \frac{n_e(t)}{\tau_a} \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = N_o \alpha_{om}(\varepsilon) n_e(t) - \left[\alpha_m n_e(t) + \frac{1}{\tau_m} \right] N_m(t) \quad (2)$$

$$j(t) = e g(R) b_e n_e(t) E(t) \quad (3)$$

где $g(R) = 2\pi \int_0^R I_0(2,4 \frac{\rho}{R}) \rho d\rho$. Предполагается, что концентрация электронов распределена по радиусу согласно функции Бесселя;

$J(t)$ - сила разрядного тока, N_0 , N_m , N_e - концентрации нормальных и метастабильных атомов и электронов; $\alpha_{om} = \langle \sigma_{om} v \rangle$ и $\alpha_{oi} = \langle \sigma_{oi} v \rangle$ - скорости реакций прямого возбуждения и прямой ионизации; α_m и α_{mi} - скорости разрушения метастабильного уровня электронным ударом и ступенчатой ионизации; \bar{v}_e - подвижность электронов, R - радиус трубки.

Рассматривается случай малых глубин модуляции разрядного тока:

$$J(t) = J_0 + J_1 e^{i\omega t}, \quad J_1 \ll J_0 \quad (4)$$

Тогда величины $E(t)$, $N_m(t)$, $N_e(t)$ также модулируются:

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 + E_1 e^{i\omega t} \\ N_m(t) &= N_{m0} + N_{m1} e^{i\omega t} \\ N_e(t) &= n_0 + n_1 e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

Постановка (4) и (5) в систему (1-3) и линейризация ее дает систему уравнений относительно комплексных амплитуд E_1 , N_{m1} , n_1 . Из решения этой системы получаются амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики колебаний параметров плазмы. Далее рассматриваются два предельных случая, при которых общие решения упрощаются:

1. Основную роль в образовании заряженных частиц играет прямая ионизация. В этом случае амплитуды колебаний концентрации электронов и напряженность продольного электрического поля меняются с частотой монотонно. Заметные изменения этих величин могут иметь место при частотах $\nu \gg \frac{1}{2\pi\tau_a}$.

2. Случай чисто ступенчатой ионизации. В этом случае частотные зависимости амплитуд колебаний параметров разряда могут иметь максимум. Причем максимумы достигаются при частотах $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_a} \left(\frac{1}{\tau_m} + \alpha_m n_0 \right)}$. Так как обычно в разряде имеет место неравенство $\frac{1}{\tau_a} \gg \frac{1}{\tau_m} + \alpha_m n_0$, то характерные частоты, при кото-

рых можно получить заметные эффекты в модуляции концентрации электронов и напряженности продольного электрического поля, в случае ступенчатой ионизации существенно меньше, чем в случае прямой ионизации.

Полученные в этих частных случаях зависимости амплитуд и фаз колебаний концентрации электронов, заселенностей метастабильных уровней и напряженности продольного электрического поля приводятся в виде качественных кривых.

Далее этот метод применялся к разряду, находящемуся в режиме ступенчатой ионизации-рекомбинации. Из полученных результатов следует, что в режиме рекомбинации при довольно низких частотах модуляции разрядного тока напряженность продольного электрического поля подвергается колебаниям с глубиной модуляции, превышающей глубину модуляции разрядного тока.

Приводятся результаты экспериментального исследования колебаний малой амплитуды электрических и оптических параметров разряда в гелии и неоне. Экспериментальные результаты сравниваются с полученными теоретическими амплитудно-частотными и фазово-частотными характеристиками колебаний концентрации электронов, напряженности продольного электрического поля и заселенностей метастабильных уровней.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию сильно модулированного разряда.

В случае малых глубин модуляции, когда применима линейная теория, экспериментальное изучение свойств положительного столба в условиях модуляции разрядного тока сводится к тому, что измеряются амплитуды и сдвиги фаз колебаний продольного электрического поля, концентрации электронов, заселенностей нижних возбужденных уровней и интенсивности свечения /9/. Так как при малых глубинах модуляции экспериментально трудно заметить изменения функции распределения электронов по энергиям, то делается предположение, что она имеет такой же вид, как и в случае стационарной плазмы и зависит только от E/ρ . Чтобы иметь возможность экспериментально изучать изменения по фазам ФРЭЭ, необходимо было исследовать разряд при больших глубинах модуляции разрядного тока.

С другой стороны, полученный в работе /12/ эффект усиления

света объясняется изменением вида функции распределения электронов по энергиям. Из-за отсутствия методики непосредственного измерения функции распределения в плазме с периодически меняющимися параметрами, экспериментально это предположение не проверилось, и авторы ограничились результатами численного решения кинетического уравнения Больцмана /11/.

С целью изучения процессов возбуждения и ионизации с учетом измененной функции распределения по фазам. При давлении $P = 0,6$ Тор, среднем разрядном токе $I_p = 50$ мА, частоте модуляции $\nu = 3$ кГц и при глубине модуляции разрядного тока $\zeta_p = 80\%$ одновременно измерялись следующие величины:

1. Изменение тока по периоду.
2. Функция распределения электронов в различных фазах.
3. Изменение концентрации электронов по фазам.
4. Изменение напряженности продольного электрического поля по фазам.

При этих условиях преобладает ступенчатая ионизация. При чем частота, при которой можно было ожидать заметные изменения продольного электрического поля, равнялась $\nu_0 \approx 3,6$ кГц. Выбор частоты модуляции был обусловлен тем, что частота $\nu = 3$ кГц близка к ν_0 , т.е. при этой частоте можно получить интересные результаты.

Функция распределения электронов по энергиям измерялась в восьми фазах. В каждой фазе измерялся ток при потенциале пространства, и по измеренному току на зонд при потенциале пространства находилась концентрация электронов. Результаты измерений показали, что имеет место значительная модуляция электрического поля и концентрации электронов. Колебания концентрации электронов отстают по фазе от колебаний разрядного тока, а колебания электрического поля опережают колебания разрядного тока. Это качественно согласуется с выводами линейной теории, рассмотренной в гл. II. ФР в фазах, соответствующих большим значениям поля, имеют большую долю быстрых электронов.

Из теории модулированного разряда без учета ступенчатой ионизации следует, что при частотах $\omega \ll \frac{1}{\tau_a}$, $\omega \ll \frac{1}{\tau_e}$ концентрация электронов меняется в фазе с током и имеет приблизительно такую же глубину модуляции, что и разрядный ток. При

этом поле и, следовательно, электронная температура почти не модулируется. В наших условиях $\frac{1}{\tau_e} \approx 6 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$, $\frac{1}{\tau_a} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$, $\omega \approx 2 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$. Таким образом, с точки зрения теории, но учитывающей ступенчатую ионизацию, вышеприведенное условие малости частот достаточно хорошо выполняется, и поэтому поле должно слабо модулироваться.

Учет ступенчатой ионизации приводит к иному результату. Из этой теории следует, что при наших условиях уже при $\omega \approx 2 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$ должна быть заметная модуляция электрического поля. Физически этот результат можно понять следующим образом. В условиях ступенчатой ионизации при изменении разрядного тока с круговой частотой, заключенной между частотой амбиполярной диффузии и частотой ухода метастабильных атомов, ответственных за ступенчатую ионизацию, метастабильные не успевают покинуть газоразрядный объем, и как бы получается остаточная завишенная или заниженная ионизация. Это приводит к тому, что концентрация электронов спадает медленнее, чем разрядный ток, и падает скорость ионизации и поле.

Измерялись заселенности четырех нижних возбужденных уровней в различных фазах модуляции при условиях $F=0,6 \text{ Тор}$, $J_p = 50 \text{ нА}$, $\nu = 3 \text{ кГц}$. Измерения поглощения на линиях $\lambda = 667,8 \text{ нм}$ и $\lambda = 587,5 \text{ нм}$ показали, что заселенности уровней 2^1P_1 и 2^3P_1 значительно меньше заселенностей уровней 2^1S_0 и 2^3S_1 , и их вкладом в ступенчатые процессы можно пренебречь.

Для расчета хода концентрации возбужденных атомов по периоду на уровнях 2^1S_0 и 2^3S_1 была составлена система уравнений для четырех нижних уровней гелия. Результаты численного решения этой системы дали удовлетворительное согласие с измерениями заселенностей с учетом погрешности при вычислении коэффициентов, входящих в эти системы.

В четвертой главе исследуется разряд с переменным сечением в гелии. Появление двойного электрического слоя перед суженным разрядной трубкой и связанного с ним скачка потенциала может привести к разрыву в области ДС. Проходя ДС, заряженные частицы ускоряются и при соударениях часть приобретенного ими импульса передается атомам и молекулам нейтрального газа. Это

приводит к вытеснению газа из области ДС. При достаточно больших плотностях разрядного тока уменьшение плотности газа становится настолько существенным, что ухудшаются условия образования новых ионов. Увеличивается скачок потенциала в ДС, возрастает активное сопротивление плазмы и для поддержания разряда требуется более высокое межэлектродное напряжение. Достижение предела ионизации может вызвать либо полное прекращение тока, либо уменьшение его. Прекращение или снижение тока ведет к уменьшению разрежения газа в сужении, что вновь приводит к возрастанию тока. Процесс нарастания и спадания тока повторяется периодически, возникают колебания тока I/I_0 .

Исходя из вышеизложенного работы, посвященные исследованию ДС в ПС разряда подразделяются на две группы: Первая группа - это работы, в которых исследуются колебания и обрыв тока при наличии сужения в ПС низкого давления и работы, посвященные исследованию ДС вблизи критического тока. Вторая группа, к которой относятся описываемые в четвертой главе работы - исследование ДС при низких плотностях тока, вдали от критических значений разрядного тока.

С точки зрения причин возникновения и формирования ДС большое значение имеет изучение процессов ускорения электронов и изменение формы ФРЭЭ, процессы возбуждения и ионизации в области ДС, образующегося в сужении разряда в трубке, состоящей из двух отрезков разного диаметра. В такой трубке в каждом из отрезков имеется определенное распределение потенциала и лишь в области сужения потенциал круто возрастает. В этой области на ФРЭЭ образуется вторичный максимум, который с ростом потенциала сдвигается в сторону больших энергий. Наличие перемещающегося вторичного максимума на ФРЭЭ приводит к тому, что в продольном направлении изменяется режим возбуждения различных систем уровней из-за различных энергетических зависимостей сечений одиночников и триплетов.

Исследуемый разряд создавался в стеклянной цилиндрической камере диаметром 55 и длиной 700 мм. Подвижная система электродов и зондов позволяла проводить аксиальные и радиальные измерения в области сужения столба. На основании измеренных ФР, распределений потенциала и концентраций было получено:

1. Вдали от сужения в сторону катода потенциал изменяется линейно. ФРЭЭ, измеренная в этой части трубки, имеет вид характерный для однородного положительного столба разряда в этих условиях. В этой области концентрация электронов не меняется вдоль оси.

2. В области сужения образуется переходная область, состоящая из двойного электрического слоя с электронным пространственным зарядом со стороны катода и пространственным зарядом положительных ионов со стороны анода. Согласно уравнению Пуассона, в этой области изменяется ход потенциала, резко возрастает поле, электроны приобретают дополнительную энергию, в результате чего ионизация в пограничной области в узкой части трубки сильно возрастает. ФРЭЭ, измеренные у сужения имеют дополнительный максимум соответствующий группе электронов, ускоренных в ДС. По мере перемещения по круто возрастающей ветви потенциала дополнительный максимум перемещается в сторону высоких энергий. При этом величина вторичного максимума уменьшается и он быстро исчезает в результате упругих и неупругих столкновений с атомами.

3. В области сужения концентрация электронов резко возрастает, затем падает почти до уровня концентрации в широкой части, в некоторых случаях испытывает несколько таких сильных изменений и выходит на постоянное значение. Такое поведение концентрации связано с эффектом фокусировки электронов, так как ДС в устье узкой части имел форму сферического сегмента, поэтому ускоренные электроны фокусировались по направлению к узкой части. Радиальное распределение концентрации в начале узкой части трубки было существенно уже, чем в более удаленных областях от ДС.

По измеренным распределениям были рассчитаны числа возбуждений различных групп уровней с главными квантовыми числами 3 и 4. Результаты расчета, проведенного на оси трубки для уровней 3^3P_1 и 3^1P_1 и измеренных распределений относительных интенсивностей линий $\lambda = 388,9 \text{ нм}$ и $501,6 \text{ нм}$ показали, что изменяется режим возбуждения триплетного и синглетного уровней. Аналогичные изменения отношений заселенностей наблюдаются и для других одиночников и триплетов.

Произведен расчет ФРЭЭ из кинетического уравнения по мето-

ду, разработанному в /7/. Все столкновения подразделяются на квазиупругие и существенно неупругие, в которых теряется энергия, намного превосходящая характерный энергетический масштаб спада ФР, причем для последних предполагается учет возбуждения только одного уровня с энергией ϵ_1 . Такая ситуация часто реализуется в инертных газах, в том числе справедлива для условий экспериментов, описанных выше.

На рассчитанных ФР проявляется группа быстрых электронов и по мере возрастания потенциала эта группа перемещается в сторону высоких энергий. Результаты расчетов ФР удовлетворительно совпадают с измерениями.

Наличие перемещающегося вторичного максимума на ФРЭЭ приводит к изменению режимов возбуждения различных групп уровней. Так, триплетные уровни гелия, имеющие острую структуру функции возбуждения, при совпадении вторичного максимума ФРЭЭ с максимумом эффективного сечения имеют наиболее благоприятные условия возбуждения. В этой точке возрастает роль прямых возбуждений данного уровня. Это позволило определить скорости некоторых реакций, с участием возбужденных атомов.

Рассмотрение проводилось на основе систем уравнений баланса для двух уровней, один из которых является метастабильным и заселяется только в результате прямого возбуждения, а в заселении второго уровня кроме прямого возбуждения заметную роль играет ступенчатое возбуждение электронным ударом из первого. К этой системе применялся метод модуляции тока, и на основе измерений глубины модуляции интенсивности спектральной линии, испускаемой со второго уровня получена константа скорости ступенчатого возбуждения $2^3S_1 \rightarrow 3^1D_2$. Для этого перехода получено $\alpha_{mc} = 9 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

Наличие страт в положительном столбе приводит к колебаниям температуры и концентрации электронов, а следовательно, и к колебаниям выходной мощности излучения трубки. В работе /4/ показано, что использование конических разрядных трубок с весьма небольшими углами раствора взамен цилиндрических позволяет заметно снизить область существования самовозбуждающихся бегущих страт по току и давлению. А так как наличие отступлений формы разрядной трубки от цилиндричности приводит к резкому су-

жению области параметров разряда, соответствующей границе существования страт, переход к коническим трубкам открывает широкие возможности по стабилизации работы газовых лазеров. Поэтому важно было изучать функцию распределения электронов по энергиям в таких трубках, так как скорости возбуждения, ионизации и других элементарных процессов определяются видом функции распределения. Измерения ФРЭЭ показали, что в том случае, когда трубка сужается в сторону анода, ФР богата быстрыми электронами по сравнению с тем случаем, когда разрядная трубка расширяется в сторону анода.

В пятой главе приводятся результаты исследования ДС в области сужения разряда в ртути. Описаны результаты измерений распределения потенциала, ФРЭЭ, концентраций электронов и ионов в области ДС. Обнаружено разделение положительных и отрицательных пространственных зарядов. Получены ФРЭЭ, с дополнительным максимумом соответствующим группе электронов, ускоренных в ДС. Установлено изменение режима возбуждения различных систем энергетических уровней.

Измеренные распределения концентрации электронов и ионов показали, что в области сужения концентрации электронов и ионов резко возрастают, затем падают до уровня концентраций в узкой части. Концентрации электронов и ионов в целом смещены в анодную сторону относительно максимума напряженности электрического поля.

Электроны, ускоренные в ДС приобретают дополнительные энергии, увеличивается число ионизаций, вследствие чего концентрации заряженных частиц возрастают в сторону высокого потенциала от ДС. Кривая распределения концентрации электронов смещена в сторону катода относительно распределения концентрации ионов. Зависимости измеренных потенциала пространства V_n и плавающего потенциала V_0 от расстояния показали, что изменяется расстояние между V_n и V_0 . Это связано со значительными изменениями формы ФРЭЭ. ДС в устье узкой части имел форму сферического сегмента и поэтому ускоренные электроны фокусировались по направлению к узкой части. Радиальное распределение концентрации электронов в начале узкой части трубки было существенно уже, чем в более удаленных областях от ДС.

В результате ускорения электронов в ДС на ФРЭЭ образуется вторичный максимум. Дополнительный максимум на ФРЭЭ, измеренных на различных расстояниях от сужения соответствует группе электронов, ускоренных в ДС. По мере перемещения в сторону анода дополнительный максимум перемещается в сторону высоких энергий. При этом величина вторичного максимума уменьшается в результате упругих и неупругих столкновений с атомами.

По измеренным распределениям были рассчитаны числа возбуждений различных групп уровней. Изменение режимов возбуждений триплетного и синглетного уровней связаны с наличием перемещающегося максимума на ФРЭЭ и различной энергетической зависимостью эффективных сечений этих уровней.

Метод определения скорости реакции ступенчатого возбуждения в гелии, применялся также для изучения скоростей реакций с участием возбужденных атомов ртути в нестационарном двойном слое разряда. Атом ртути имеет подобную систему синглетных и триплетных термов и эффективные сечения возбуждения этих систем термов имеют такие же энергетические зависимости как в гелии /6/. Поэтому в области сужения разряда в ртути также наблюдается изменение отношений интенсивностей спектральных линий испускаемых с триплетных и синглетных уровней. Для спектральных линий с различными функциями возбуждения в разных точках разряда возникают различные условия возбуждения. Поэтому при модуляции тока разряда, содержащего сужение, вблизи области ДС интенсивности разных линий модулируются по разному. Амплитуды и фазовые сдвиги колебаний интенсивностей определяются элементарными процессами, происходящими в данной точке. Применяя метод линеаризации для решения нестационарной системы уравнений баланса, и подбирая условия, были определены скорости реакций с участием возбужденных атомов ртути скорости реакций ступенчатого возбуждения $6^3P_2 \rightarrow 7^1S_0$ и передачи возбуждения электронным ударом $7^3S_1 \rightarrow 7^1S_0$.

Полученные результаты приводятся в таблице.

$\alpha_{нк} (6^3P_2 \rightarrow 7^1S_0)$	$\alpha_{тс} (7^3S_1 \rightarrow 7^1S_0)$
$1,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	$5,45 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$

Шестая глава посвящена изложению результатов по получению и исследованию флуктуирующего ДС в бесстолкновительной плазме разряда в ртути с $u_{ac} \gg \frac{kT_e}{e}$. Источником плазмы являлся дуговой разряд между жидким ртутным катодом и полым электродом. Проходя через отверстия вдоль однородного магнитного поля, плазма попадала в вакуумную камеру с кварцевыми стенками, внутренний диаметр которой составлял 12 см. При плавающем потенциале анода в камере образуется бестоковый спокойный плазменный столб. С ростом потенциала анода относительно потенциала плазмы анодный ток экспоненциально возрастает. Увеличение потенциала анода выше потенциала пространства приводит к насыщению электронного тока и образованию прианодного двойного слоя. Повышение потенциала анода не изменяет распределение потенциала вдоль плазменного столба, так как электрическое поле не проникает в плазму и весь приложенный потенциал сосредотачивается вблизи анода. При определенном потенциале анода прианодный слой отрывается от поверхности анода и движется в сторону источника плазмы. Таким образом, регулируя ток на анод, можно устанавливать ДС на желаемом расстоянии от анода. Увеличение индукции магнитного поля и снижение давления паров ртути приводит к перемещению ДС в сторону анода. ДС не является стационарным и все время находится в нерегулярном движении в продольном направлении с амплитудами порядка ширины ДС. Кроме того, имеются флуктуации профиля и падения потенциала на ДС.

Исследование свойств ДС в приведенной установке проводилось при давлении паров ртути 10^{-5} мм рт.ст., индукции магнитного поля 25 Гс и токе анода 300 мА. При этих условиях дебаевский радиус имел порядок 10^{-2} см, а длина свободного пробега электронов - несколько метров. Толщина ДС составляла величину порядка нескольких миллиметров и приблизительно на порядок превышала дебаевскую длину. Падение потенциала в ДС было ~ 20 В и примерно в 2 раза превосходило потенциал ионизации ртути. Электронная температура в пучке была ~ 2 эВ. Область скачка потенциала отделяет так называемую катодную плазму с низким потенциалом от анодной плазмы с более высоким потенциалом. В этих областях потенциал изменяется слабо.

Потенциал катодной плазмы отрицателен относительно зазем-

ленной входной диафрагмы, а амплитуда флуктуаций потенциала в этой области мала по сравнению с амплитудой колебаний потенциала анодной плазмы, где потенциал флуктуирует почти когерентно с флуктуациями ДС. Радиальное электрическое поле в катодной плазме направлено внутрь, а в анодной плазме - наружу.

Измерения пространственного распределения электрического поля при частотах несколько десятков кГц, проведенные с помощью двух подвижных зондов с фиксированным расстоянием 0,5 см между ними, показали, что низкочастотное поле имеет максимум около ДС, где его амплитуда на порядок выше, чем в окружающих областях. Однако для более низких частот были получены пространственные распределения с более пологим максимумом, а в некоторых случаях - даже с двумя максимумами. По /14/ это означает, что в этом случае основным источником флуктуаций является аксиальное движение ДС целиком, а более высокочастотные поля связаны с изменением профиля потенциала в ДС. Зондовые характеристики и их производные измерялись в определенные моменты, когда потенциал плазмы в точке расположения измерительного зонда находился на заданном уровне. Измерения проводились на 5-7 уровнях потенциала в обоих направлениях пересечения данного уровня. Одновременно производился счет запускающих импульсов. Из катодной плазмы в область ДС приходят свободные электроны, часть которых отражается от минимума потенциала у ДС. Глубина потенциальной ямы у ДС с катодной стороны определяет концентрацию пролетных электронов.

В области ДС электроны ускоряются и образуют пучок с разбросом энергии порядка нескольких эВ. Ускоренные в ДС электроны увеличивают вероятность ионизации на несколько порядков, и этот процесс является единственным источником положительных ионов в анодной плазме. Ионы, ускоренные в ДС, исчезают в катодной плазме в результате перезарядки. После прохождения электронов через ДС, по анодную сторону на расстоянии нескольких сантиметров от ДС пучок быстро рассеивается, хотя распределение электронов сохраняет характер направленности на протяжении всей анодной плазмы. Это указывает на интенсивный энергообмен между электронами пучка и плазмой.

Измерения, проведенные при частотах от 300 МГц до 700 МГц,

показали, что пространственное распределение амплитуды высокочастотного поля имеет максимум в анодной плазме, смещенный приблизительно на несколько см от ДС. Амплитуда поля имеет максимум вблизи плазменной частоты. Пространственно коррелированные измерения показали, что эти высокочастотные колебания распространяются в сторону анода с постоянной фазовой скоростью, на 10-20% ниже скорости пучка электронов. Эти факты подтверждают механизм энергообмена электронов пучка и плазмы посредством возбуждения волны пучком, а затем передачи энергии волны плазменным электронам.

В условиях наших экспериментов плазменный столб находился в продольном магнитном поле /электроны замагничены, а ионы - нет/. В поперечном направлении электроны не могли уходить на стенки из-за замагниченности. В осевом направлении (с торцов) падение потенциала на ДС не позволяло электронам покинуть анодную плазму (АП) в катодную сторону. Таким образом, уход электронов из анодной плазмы определялся прианодным падением потенциала. Поэтому, с целью изучения роли прианодного падения потенциала в балансе числа электронов в АП, нами была измерена с помощью многосеточного анализатора глубина потенциальной ямы у анода. Наиболее вероятные значения глубины потенциальной ямы соответствуют интервалу значений от 3 до 6 В, хотя в некоторых случаях эта величина может достигнуть значения 7-8 В.

В заключение кратко изложены основные результаты работы:

1. Разработана теория ПС разряда в условиях модуляции с учетом ступенчатой ионизации. На основе анализа решения системы уравнений, состоящей из уравнений баланса концентрации электронов, заселенностей метастабильных уровней и выражения тока разряда получены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики колебаний концентрации электронов, заселенностей метастабильных уровней и электрического поля. Эти характеристики в случае ступенчатой ионизации качественно отличаются от частотных характеристик столба в условиях чисто прямой ионизации. В случае ступенчатой ионизации характерные частоты, при которых начинает проявляться заметная модуляция электрического поля получаются на порядок величины ниже чем в случае прямой ионизации. Причем в случае ступенчатой ионизации амплитуды колеблющихся ве-

личин могут иметь максимум при частотах порядка $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_a} \left(\frac{1}{\tau_m} + \sigma_m n \right)}$, в то время как в случае прямой ионизации они меняются с частотой монотонно.

2. Теоретическое рассмотрение ПС разряда в режиме модуляции разрядного тока распространено на случай ступенчатой ионизации-объемной рекомбинации. Полученные амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики показали, что в режиме рекомбинации характерные частоты, при которых начинают проявляться заметные эффекты в модуляции продольного электрического поля сдвигаются еще ниже. При очень низких частотах электрическое поле подвергается колебаниям с глубиной модуляции, превышающей глубину модуляции разрядного тока.

3. Разработана методика измерения Φ_{P33} и других электрических и оптических характеристик колеблющейся плазмы, с периодически изменяющимися параметрами.

4. Экспериментально исследованы амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики колебаний малой амплитуды электрических и оптических параметров разряда в условиях: а) прямой ионизации-амбипольной диффузии, б) ступенчатой ионизации - амбипольной диффузии, в) ступенчатой ионизации - объемной рекомбинации. Проведено сравнение с теоретическими результатами.

5. Измерены в различных фазах колебаний тока разряда функция распределения и концентрация электронов, напряженность продольного электрического поля, заселенности метастабильных и излучающих уровней. Обнаружен эффект-модуляции электрического поля и изменения Φ_{P33} по периоду при частотах ниже обратного времени амбипольной диффузии. На основе этих измерений установлен характер процессов возбуждения и ионизации в различных фазах колебаний.

6. Измерены Φ_{P33} в области двойного электрического слоя, образующегося вблизи изменения сечения плазменного столба разряда в гелии. Получены распределения со вторичным максимумом соответствующим ускоренным в ДС электронам. Экспериментально исследована структура слоев пространственных зарядов и установлена связь распределения потенциала и Φ_{P33} с этой структурой. Проведен расчет Φ_{P33} из кинетического уравнения. Изучены про-

цессе возбуждения и ионизации в области ДС и обнаружено изменение режимов возбуждения различных групп уровней гелия. На основе изучения динамики двойных электрических слоев в области сужения разряда определены константы скоростей реакций ступенчатого возбуждения атома гелия.

7. Исследована структура пространственных зарядов и установлена связь распределения потенциала и ФРЭЭ разряда с переменным сечением в ртути. Разработанный метод модуляции разрядного тока применен к ДС в области изменения сечения разряда и получены константы ступенчатого возбуждения и передачи возбуждений электронным ударом между высоковозбужденными уровнями ртути.

8. Получены и исследованы двойные электрические слои в бесстолкновительной плазме со значением потенциала, превосходящим эквивалентную электронную температуру на порядок. Измерены ФРЭЭ, распределение потенциала и концентрации электронов в катодной и анодной плазме, в области ДС. Установлен характер релаксации ускоренных в ДС электронов.

9. Разработан метод диагностики флуктуирующей плазмы. Разработаны различные модификации измерений зондовых вольтамперных характеристик и их производных. Исследована роль флуктуирующего анодного падения в балансе числа электронов в анодной плазме.

Все перечисленные результаты получены впервые. Результаты комплекса проведенных исследований позволяют заключить, что в работе сделан принципиальный шаг в развитии представлений о динамических свойствах разрядов, находящихся в режиме ступенчатой ионизации-амбиполярной диффузии и ступенчатой ионизации-рекомбинации, а также процесса ускорения электронов и формирования ФРЭЭ в неоднородной плазме разряда при низких давлениях.

Полученные в диссертации результаты могут применяться при разработке различных газоразрядных источников света, повышения их эффективности излучения, выборе оптимальных рабочих условий. Результаты изучения физических процессов в неоднородной плазме могут быть полезными при рациональном выборе конструкции и режимов работы плазменных источников ионов и источников света. Результаты исследования ДС в бесстолкновительной плазме могут использоваться для объяснения присутствия быстрых заряженных частиц в магнитоосфере Земли и явления полярных сияний.

Разработанные в диссертации методы и техника эксперимента могут использоваться для решения широкого круга задач, возникающих при исследовании слабоионизованной плазмы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В.Л., Суетин Т.А. Использование обрыва тока в дуге низкого давления для генерации незатухающих электрических колебаний // ЖТФ. - 1947. - т.17. - № 3. - с.291-298.
2. Грановский В.Л. К теории нестационарного состояния электрического разряда в газах // ДАН СССР. - 1940. - т.26. - № 2. - с.873-879.
3. Лавров Б.П., Симонов В.Я. О слоях объемного заряда в прианодной плазме моно- и дуоплазмотронов // ЖТФ. - 1978. - т.48. - № 8. - с.1744-1746.
4. Маслова Л.И., Савченко И.А., Швилькин В.А. Потери в конических разрядных трубках // Физика плазмы. - 1984. - т.10. - № 4. - с.808-814.
5. Специальный практикум по газовой электронике и физике плазмы под ред. // Солнцева Г.С. - М. 1988. - Изд-во МГУ. - с.84-98.
6. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов. - М.Л. - Изд-во Ф. МЛ. 1963.
7. Цендин Л.Д. Функция распределения электронов слабоионизованной плазмы в неоднородных электрических полях. I Малые поля: баланс энергии определяется квазиупругими соударениями // Физика плазмы. - 1982. - т.8. - № 1. - с. 169-177.
8. Alfvén H. Electric currents in cosmic plasmas // Rev. Geophys. Space Phys. - 1977. - v.15. - P. 271-277.
9. Deutsch H., Pfau S. Untersuchungen Zum dynamischen Verhalten der positiven Säule stromschwacher Entladungen bei mittleren Drücken // Beitr. Plasma Physik - 1969. - B.9. - h. 2. - P. 129-140.
10. Deutsch H., Rutscher A., Ziemann H. Nichtlineare Effecte im dynamischen Verhalten der positiven Säule stromschwacher Niederdruck entladungen // Beitr. Plasma Physik - 1972. - B. 12. - h. 3. - P. 149-158.
11. Pollan J., Van der Wert J.S., Drop P.C. Nonlinear effects in the positive column of a strongly modulated mercury -

rare gas discharge // Journ. Phys. D: Appl. Phys. - 1972. - v. 5. - N 2. - P. 266-279.

12. Pollan J., Van der Werf J. E. Enhanced light emission from a positiv column by means of current modulation // Appl. Phys. Lett. - 1970. - v. 17. - N 4. - P. 153-161.
13. Quon B.H., Wong A.Y. Formation of potential double layers in plasmas // Phys. Review. Lett. - 1976. - v. 37. - N. 21. - P. 1393-1396.
14. Torven S., Lindberg L. Properties of a fluctuating double layer in a magnetised plasma column // Journ. Phys. - 1980. - v. 13. - P. 2285-2300.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ
ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Абдуллаев Р.А., Мурадов А.Х. О колебаниях параметров разряда в неоне в режиме рекомбинации // ДАН Азерб.ССР. - 1990. - т.46. - № 3. - с.31-36.
2. Гарибов Г.И., Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. Исследование процесса зажигания разряда и ФРЭЭ в конической трубке // Труды IV Всесоюзной конференции по физике газового разряда. - Махачкала, 1988. - т.2. - с.23-25.
3. Гарибов Г.И., Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. Исследование функции распределения электронов по энергиям в положительном столбе разряда в неоне в конической трубке // Известия АН Азерб.ССР, серия физико-матем. - 1989. - № I. - с.67-70.
4. Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. Двойной электрический слой в разреженной гелиевой плазме // Известия БГУ. - 1992. - № I. - с.22-28.
5. Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. Изучение скоростей реакций с участием возбужденных атомов в нестационарном слое разряда // Всесоюзная конференция по спектроскопии низкотемпературной плазмы. - Петрозаводск, 1990.
6. Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. О слоях объемного заряда в области сужения разряда в ртути // Теплофизика Высоких Температур. - 1991. - т.29. - № 4. - с.821-823.

7. Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. К физической природе ускорения электронов в двойном электрическом слое // Сб. Кинетические и оптические явления в средах. - Баку. Изд-во БГУ. 1990. - с.71-72.
8. Гусейнов Т.Х., Мурадов А.Х. Исследование процесса ускорения электронов в разряде с сужением в гелии // ЭТФ. - 1991. - т.61. - № 5. - с.130-134.
9. Данилов М.Ф., Каган Ю.М., Миленин В.М., Мурадов А.Х. Исследование электрических параметров положительного столба модулированного разряда в гелии и смеси гелий-неон // ЭТФ. - 1975. - т.45. - № II. - с.2425-2427.
10. Каган Ю.М., Лягущенко Р.И., Миленин В.М., Мурадов А.Х. О модулированном режиме положительного столба разряда // ЭТФ. - 1975. - т.45. - № 5. - с.1019-1025.
11. Каган Ю.М., Миленин В.М., Мурадов А.Х. Исследование оптических параметров положительного столба модулированного разряда в гелии // Оптика и спектроскопия. - 1976. - т.40. - № 2. - с.235-239.
12. Каган Ю.М., Миленин В.М., Мурадов А.Х., Рыков В.И. Исследование электрических и оптических параметров положительного столба модулированного разряда // Труды IV Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы. - Киев, 1975.
13. Мурадов А.Х. Динамические свойства положительного столба модулированного разряда с учетом рекомбинации // IV Республиканская межвузовская конференция по физике. Тез. докл. - Баку, 1978, с.113-115.
14. Мурадов А.Х. Разрушение триплетного метастабильного состояния атома гелия электронным ударом в положительном столбе разряда // Республиканская научно-техн. конференция "Достижения и перспективы развития радиотехники и электроники: Тез. докл. - Баку. 1982. - с. 94-95.
15. Мурадов А.Х. Исследование электрических и оптических параметров положительного столба разряда в режиме линейной модуляции // Сб. электронные явления в твердых телах и газах. - Баку. Изд-во АГУ, 1982. - с.124-126.
16. Мурадов А.Х. Исследование распределения потенциала и энергетического спектра электронов в области двойного слоя в плазме // Сб. Неравновесные процессы в твердотельной и газо-

- вой плазмах. - Баку, Изд-во АГУ, 1983. - с.90-94.
17. Мурадов А.Х. Исследование функции распределения электронов по энергиям в области двойного слоя // Труды VI Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы. - Ленинград, 1983. - т. I. - с.276-278.
 18. Мурадов А.Х. О взаимодействии пучок-плазма в области двойных электрических слоев в плазме // Изв. АН Азерб.ССР, серия физико-матем. - 1985. - № 6. - с.89-93.
 19. Мурадов А.Х. Исследование двойных электрических слоев в ртутной плазме низкого давления // Физика плазмы. - 1985. - т. II. - с.1385-1390.
 20. Мурадов А.Х. О колебаниях концентрации метастабильных атомов гелия в положительном столбе разряда // Оптика и спектроскопия. - 1985. - т.59. - № 4. - с.901-903.
 21. Мурадов А.Х. Измерение зондовых характеристик и их производных в плазме при наличии колебаний // Теплофизика высоких температур. - 1986. - т.24. - № 2. - с.400-402.
 22. Мурадов А.Х. К измерению малых синусоидальных колебаний заселенностей метастабильных уровней по поглощению спектральных линий // Труды XI Международной конференции по атомной спектроскопии. Болгария, Варна. - 1986. - с.235-237.
 23. Мурадов А.Х. Измерение пучковой части распределения электронов по энергиям в анизотропной плазме // Приборы и техника эксперимента. - 1988. - № I. - с.150-151.
 24. Мурадов А.Х. О влиянии величины прианодного падения потенциала на баланс числа электронов в анодной плазме с двойным слоем // Сб. Вопросы физической электроники. - Баку, Изд. АГУ, 1987. - с.20-23.
 25. Мурадов А.Х. К динамической теории разряда в ионизационно-рекомбинационном режиме // Известия ВУЗ-ов "Радиофизика". - 1988. - т.31. - № 6. - с.763-766.
 26. Мурадов А.Х., Гусейнов Т.Х. Исследование двойного электрического слоя в области сужения положительного столба разряда // Сб. Физика плазмы и конденсированных сред. - Баку, Изд-во АГУ, 1985. - с.31-34.
 27. Мурадов А.Х., Гусейнов Т.Х. Двойной электрический слой в

- области изменения сечения положительного столба разряда // Труды III Всесоюзной конференции по физике газового разряда. - Киев, 1986. - т.3. - с.452-454.
28. Blagoev A.B., Kagan Y.M., Kolokolov N.B., Milenin V.M., Muradov A.H. The investigation of the modulated discharge plasma with the help of pulse probe methode // XI ICPFG - Prague - 1973 - P. 429.
29. Huseinov T.H., Muradov A.H. Electron - impact excitation transfer between 7^3S_1 - 7^1S_0 states of Hg in nonstationary discharge double layer // XX ICPFG - Pisa, Italy - 1991. - v, 1. - P. 101-102.
30. Muradov A.H. On the electron energy distribution function in the DL region in the helium discharge constriction // Y1 Symposium on DL and other nonlinear potential structures in Plasmas. - Innsbruck, Austria - 1992.



Бесплатно

АВ 27.020
АВ 27.020