

ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 533.9:537.525

Таибов Калабег Таибович

**ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КИНЕТИКУ
НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА
В КОРОТКИХ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ В ГЕЛИИ**

Специальность: 01.04.04. - физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Махачкала

1998

Работа выполнена в лаборатории “Физика плазмы” кафедры физической электроники физического факультета Дагестанского государственного университета

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

Омаров О.А.

кандидат физико-математических наук, доцент

Ашурбеков Н. А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

Василяк Л.М. (МФТИ)

доктор физико-математических наук, профессор

Мейланов Р.П. (ДНЦ РАН)

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится “ ____ ” “ _____ ” 1999 г в 14⁰⁰ час. на заседании специализированного Совета К.063.61.06 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук в Дагестанском государственном университете по адресу г.Махачкала, ул. М.Гаджиева 43^а

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Даггосуниверситета

Автореферат разослан “ ____ ” “ _____ ” 199 __ г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Гайдаров Ш.А.

Актуальность темы диссертации. Плотная плазма, полученная с помощью того или иного жесткого ионизатора, представляет интерес в связи с ее широким применением в качестве активной среды лазеров, а также в других газоразрядных устройствах. Стремление улучшить энергетические характеристики газовых лазеров привело к широкому использованию для их накачки электронных пучков. Однако, необходимость вакуумной изоляции ускорительного промежутка от лазерной кюветы порождает ряд сложностей при вводе энергии электронного пучка в активный объем. Помимо этого, использование высоковольтной импульсной техники значительно усложняет конструкцию лазеров и делает их малонадежными. В этой связи наиболее перспективным оказался способ создания пучков электронов в самой активной среде при плотности газа в ускорительном промежутке, соответствующем рабочему давлению лазерной смеси.

Генерирование пучка в газе с высокой плотностью возможно при обеспечении условий эффективного перевода электронов в режим “убегания”, когда в процессе пробоя газа под действием сильного внешнего электрического поля, несмотря на многочисленные столкновения с атомами газа, они приобретают на длине свободного пробега энергию, во много раз превышающую энергию, теряемую при одном столкновении. При этом одной из важных является задача управляемого изменения характеристик созданных таким образом быстрых электронов. Одной из таких возможностей является наложение внешнего магнитного поля. Имеющиеся в литературе работы в этом направлении в основном посвящены изучению тлеющего разряда в скрещенных E и B полях. Значительная часть этих исследований посвящена изучению положительного столба разряда. Лишь в отдельных работах изучаются свойства приэлектродных, в частности, прикатодных слоев в магнитном поле. В литературе также, насколько нам известно, отсутствуют работы, посвященные исследованию влияния внешнего магнитного поля на оптические характеристики плазмы, образованной быстрыми электронами, формируемыми в высоковольтном импульсном разряде.

Недостаточно изученным является также механизм ионизации и возбуждения в катодных частях импульсного разряда в инертных газах во внешнем магнитном поле. Теоретические исследования таких разрядов крайне затруднены как из-за нестационарности и анизотропии плазмы, так и из-за большого числа учитываемых процессов. Поэтому получение надежных экспериментальных данных об основных параметрах пучковой плазмы в

магнитном поле, таких как электрокинетические характеристики (n_e , T_e), населенности возбужденных состояний атомов, выяснение механизмов ионизации и возбуждения в катодных частях наносекундного импульсного разряда и сочетание методов теоретического и экспериментального исследования является весьма актуальной задачей.

Цели диссертационной работы:

Дальнейшее развитие методики исследования наносекундных разрядов пучкового типа во внешнем магнитном поле.

Комплексное исследование влияния поперечного магнитного поля на характеристики разряда плазменно-пучкового типа в коротких промежутках. Выяснение механизма влияния поперечного магнитного поля на электрические, оптические и спектральные характеристики таких разрядов в гелии при средних давлениях газа.

Экспериментальное и теоретическое исследование кинетики образования и распада пучковой плазмы в коротких промежутках при наложении внешнего постоянного поперечного магнитного поля.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в данной работе применялись следующие методы:

- для исследования электрических характеристик импульсного наносекундного разряда использован осциллографический метод с временным разрешением ~ 1 нс;
- в целях выявления роли состояния поверхности диэлектрических стенок разрядной трубки в формировании начальных стадий разряда использованы масс-спектрометрический метод определения состава адсорбированных газов и методика изучения диэлектрических свойств материала стенки во время его облучения электронными пучками;
- оптические и спектральные характеристики исследовались методами лучеиспускания, полного поглощения и поляризационной спектроскопии.

Научная новизна:

1. Выполнены комплексные экспериментальные исследования электрических и спектральных характеристик наносекундного разряда в гелии в коротких межэлектродных промежутках в поперечном магнитном поле.
2. Установлено, что в частотно-периодическом режиме основному пробую газа в диэлектрической трубке предшествует несамостоятельная фаза длительностью в несколько наносекунд, обусловленная переносом заряда, осажденного на стенках разрядной трубки. Выяснено влияние состояния

поверхности диэлектрических стенок разрядной трубки на процессы формирования ускоренных электронов в объемном наносекундном высоковольтном импульсном разряде в коротких промежутках.

3. Впервые проведен детальный анализ интенсивных и поляризационных профилей спонтанного излучения наносекундного разряда в коротких промежутках. Показано, что частичная линейная поляризация спонтанного излучения такого разряда связана с анизотропией процессов электронного возбуждения.
4. Прослежена кинетика возбужденных, в том числе метастабильных, атомов в наносекундном разряде в поперечном магнитном поле. Установлено, что в коротких межэлектродных промежутках существенную роль в изменении оптических свойств разряда играет изменение толщины катодного слоя в поперечном магнитном поле.

Практическая ценность работы. Развитые в работе методики исследования могут быть использованы для диагностики других типов разрядов при наличии внешнего магнитного поля. Результаты, полученные в диссертационной работе, важны для понимания процессов, протекающих в наносекундных плазменно - пучковых разрядах в коротких промежутках в условиях анизотропии функции распределения электронов по скоростям и наличия внешнего поперечного магнитного поля.

Полученные результаты по кинетике возбужденных атомов могут быть использованы при разработке эффективных газоразрядных источников оптического излучения, в том числе и газовых лазеров.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XX Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (Pisa, Italy, 1991), на II Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям (Минск, 1997), на региональной научно-практической конференции по физике межфазных явлений (Нальчик, 1998), на IX конференции по физике газового разряда (Рязань, 1998), и на конференции ФНТП-98 “Плазма XX век” (Петрозаводск, 1998).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Общий объем диссертации 139 страниц, включая 29 рисунков и 9 таблиц. Библиографический список содержит 127 наименований.

Содержание работы

Во введении рассмотрена актуальность поставленной проблемы, дано обоснование выбора темы диссертационной работы, перечислены решаемые в работе задачи, кратко изложены основные результаты исследования.

В первой главе приведен обзор литературных данных об исследовании плазмы газового разряда с жесткой составляющей электронной компоненты. Обосновывается вывод о том, что пучок быстрых электронов образуется на стадии формирования разряда, и возможно его существование в стадии коммутации в зависимости от условий среды. Рассматриваются механизмы образования электронного пучка за счет “убегающих” электронов. Приводятся имеющиеся в литературе критерии образования этих электронов и их параметры. Отдельными параграфами выделены работы, в которых рассматривается влияние поперечного магнитного поля на электрокинетические и оптические параметры разрядов плазменно-пучкового типа. Проведенный анализ показывает, что в литературе имеются теоретические и экспериментальные работы, в которых исследовано влияние внешних магнитных полей на функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и магнитооптические эффекты в стационарном тлеющем разряде, однако практически нет таких исследований в нестационарных наносекундных высоковольтных импульсных разрядах.

Вторая глава содержит описание разработанных методик, позволяющих методами лучеиспускания, полного поглощения и поляризационной спектроскопии измерять временные зависимости концентраций метастабильных атомов и интенсивных и поляризационных профилей спектральных линий в исследуемом разряде с наносекундным временным разрешением. Описаны также методы осциллографирования разряда с временным разрешением ~ 1 нс и измерения диэлектрических свойств материала стенок разрядной трубки после его облучения электронными потоками.

В качестве объекта исследований была выбрана гелиевая плазма, образованная наносекундным разрядом в диэлектрических трубках. Измерения проводились в диапазоне давлений инертного газа (5-100 Тор) в разрядных трубках диаметрами 1-2 см и межэлектродным расстоянием 0,4-1 см. Генератор высоковольтных импульсов напряжения был собран по трансформаторной схеме, где в качестве коммутирующего устройства использовался керамический тиратрон с водородным наполнением типа

ТГИ1 1000/25. Импульсный трансформатор был собран на ферритовых кольцах по коаксиальной схеме.

С целью исследования влияния состояния диэлектрических стенок разрядной камеры на начальные стадии пробоя в коротких межэлектродных промежутках использовались различные цилиндрические трубки диаметрами 1-2 см из стекла, оптического кварца и полимерного материала на основе эпоксидных смол типа ПЭ-2.

Особенности осаждения заряда на диэлектрических поверхностях изучались путем измерения $\text{tg}\delta$ - диэлектрических потерь материала стенки после его облучения электронными потоками, сформированными специальной электронной пушкой. Для таких исследований изучаемые диэлектрики помещались в вакуумную камеру общим объемом ~ 50 л. Откачка камеры производилась по трехступенчатой схеме с помощью форвакуумного насоса, электроразрядного насоса НОРД-250, и двух сверхвысоковакуумных агрегатов СВА-025. Давление остаточных газов и газовыделение из образцов контролировалось монопольным масс-спектрометром типа РОМС-2. $\text{tg}\delta$ - диэлектрических потерь материала стенок измерялся цифровым измерительным мостом Е8-2 на частоте 1 кГц. Держатель образца снабжен электрической печкой, которая позволяла регулировать температуру образца с помощью высокоточного регулятора температуры ВРТ-3 в диапазоне 20°C - 150°C .

По результатам измерения осциллограмм тока и напряжения проверялось соблюдение закона подобия в исследуемых условиях, а также оценивалась плотность электронов в разряде.

Основная идея исследования, используемая в работе, заключается в измерении интенсивных и поляризационных профилей отдельных спектральных линий гелия, начинающихся с уровней с главными квантовыми числами $n = 3, 4$, и плотности метастабильных атомов в зависимости от приложенного напряжения, внешнего магнитного поля и давления газа и анализе кинетики плазмы на основе полученного экспериментального материала.

В качестве спектрального прибора был использован спектрограф типа ДФС-452. На выходе спектрографа устанавливалась щель с микрометрическим винтом. Линейная дисперсия спектрографа составляет величину 4 Å/мм во втором порядке решетки. Излучение регистрировалось с помощью фотоэлектронных умножителей типа ФЭУ-87, ФЭУ-79, согласованных с широкополосным осциллографом С1-75 с помощью

эмиттерного повторителя, собранного на СВЧ-транзисторах. Временное разрешение ФЭУ определялось путем подачи на его вход излучения от импульсного азотного лазера на самоограниченных переходах с длительностью импульса генерации порядка 10 нс и составляло величину около 10 нс по фронту импульса. Собственное время задержки сигнала ФЭУ составляло величину порядка 80 нс при напряжении питания ФЭУ 1 кВ, и эта задержка определялась путем модуляции сигнала с ФЭУ по первому диоду и учитывалась при синхронной регистрации тока и свечении разряда.

Для сохранения постоянства телесного угла, из которого отбирается излучение, разрядная трубка жестко фиксировалась на оптической скамье, а для включения и выключения магнитного поля выдвигался постоянный магнит. Для определения поляризационных характеристик спектральных линий перед входной щелью спектрографа устанавливались диафрагмы и поляризатор, ось которого допускала вращение в плоскости, перпендикулярной оптической оси собирающей свет системы. Степень линейной поляризации оптического излучения определялась по формуле $P = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$. С целью учета частичной поляризации оптического излучения при отражении и прохождении через элементы установки оптический тракт градуировался по неполяризованному излучению от лампы накаливания.

Для определения концентрации метастабильных атомов $\text{HeI}(2^3S)$ методом полного поглощения на спектральной линии HeI ($\lambda = 388,9$ нм) численно были рассчитаны зависимости полного поглощения A от оптической плотности χ_0 с учетом трех компонент тонкой структуры и 18 Зеемановских компонент в поперечном магнитном поле. Контур каждой из компонент принимался Фойгтовским. Результаты расчета при напряженности магнитного поля $H = 4$ кЭрст и $H = 0$ приведены на рис.1.

В третьей главе приводятся результаты измерения электрических, спектральных и поляризационных характеристик разряда как при наличии магнитного поля, так и без него.

Исследования показали, что импульсы тока, как правило, имели вид кривых с двумя максимумами. На начальных стадиях импульса тока во всех исследованных условиях основному импульсу с двумя максимумами предшествовал кратковременный пик длительностью в несколько наносекунд (рис.2). Следует отметить, что амплитуда этого импульса на порядок превосходила амплитуду емкостного тока смещения. Были выполнены детальные исследования начальных стадий пробоя газа. Исследования показали, что амплитуда кратковременного пика, предшествующего

основному импульсу тока, уменьшается с увеличением диаметра разрядной трубки, увеличением температуры стенок, а также зависит от материала электродов. Дополнительно были проведены экспериментальные исследования $\text{tg}\delta$ - диэлектрических потерь материала стенок трубки после облучения электронным пучком. Из температурной зависимости $\text{tg}\delta$ -диэлектрических потерь (рис.3) облученного электронным потоком материала сделан вывод о том, что часть электронов захватывается материалом стенки трубки. Наблюдаемые максимумы на температурной зависимости $\text{tg}\delta$ -диэлектрических потерь, по-видимому, соответствуют разным глубинам энергий залегания ловушек электронов. Исследования показали, что релаксационные процессы осажденного на диэлектрике заряда длятся десятки минут, и с переносом этого заряда может быть связан первый кратковременный пик на осциллограмме импульса тока.

Далее были выполнены детальные исследования амплитуд основных импульсов тока в зависимости от давления газа и напряжения на разрядном промежутке. В магнитном поле в области больших давлений амплитуда тока возрастала на 5÷10 %, а при давлениях газа 5÷20 Тор относительный рост амплитуды тока составлял 20÷60 %.

Систематизация приведенных закономерностей показала, что для всех значений давлений газа и напряжений в исследованных диапазонах выполняются определенные закономерности в виде зависимости j/p^2 от параметра E/p . В магнитном поле приведенная плотность тока j/p^2 при одних и тех же значениях E/p выше, чем без магнитного поля, т.е. в магнитном поле зависимость j/p^2 смещается в сторону меньших значений E/p . Здесь же получено, что для второго максимума тока зависимость j/p^2 от E/p более сильная, чем для первого. Кроме того, для второго максимума выше и абсолютные значения приведенной плотности тока.

В §3.2 приведены результаты экспериментального исследования интенсивных и поляризационных профилей спектральных линий HeI и концентраций метастабильных атомов He(2^3S) в зависимости от условий в разряде и внешнего магнитного поля. Наиболее подробно исследовались спектральные линии, отвечающие следующим переходам HeI: $3^3P - 2^3S$ ($\lambda = 388,9$ нм); $4^3D - 2^3P$ ($\lambda = 447,1$ нм); $3^1P - 2^1S$ ($\lambda = 501,6$ нм); $3^3D - 2^3P$ ($\lambda = 587,6$ нм); $4^1D - 2^1P$ ($\lambda = 492,2$ нм). На осциллограммах излучения всех исследованных линий, как правило, наблюдались три характерных максимума или характерных участка. Соотношение амплитуд первых двух максимумов на осциллограмме импульса излучения зависело от давления

газа в разрядной трубке, конфигурации разрядной трубки, приложенного напряжения и наличия внешнего магнитного поля. Приведены зависимости интенсивности излучения HeI на различных спектральных линиях от давления и амплитуды напряжения как в поперечном магнитном поле, так и без него. Соотношение между интенсивностями излучения в магнитном поле и без него зависело как от давления, так и от напряжения (рис.4). При малых напряжениях и больших давлениях интенсивность излучения на всех исследованных линиях в магнитном поле меньше, чем без магнитного поля, но при снижении давления наблюдается переход на противоположное соотношение. Уже при $U_0 \sim 3$ кВ при давлениях 5-100 Торр в магнитном поле интенсивность больше, чем в отсутствии магнитного поля. Дальнейшее увеличение напряжения (более 5 кВ) приводит к изменению механизма образования плазмы и структуры разряда.

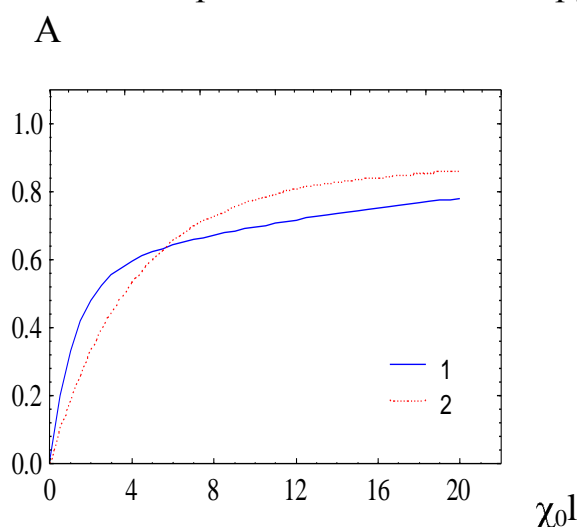


Рис.1. Зависимость полного поглощения A от $\chi_0 l$ при $H = 0$ (1) и $H = 4$ кЭрст (2).

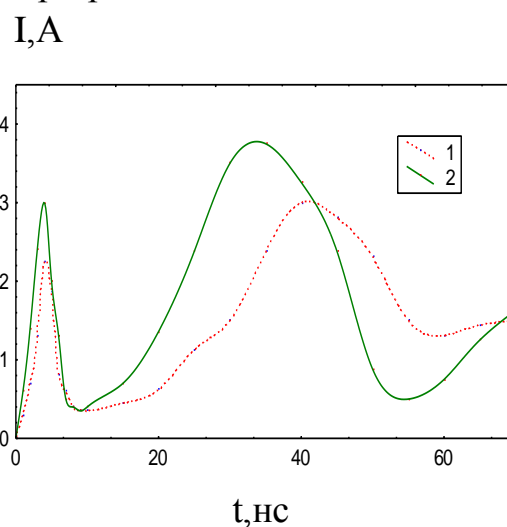
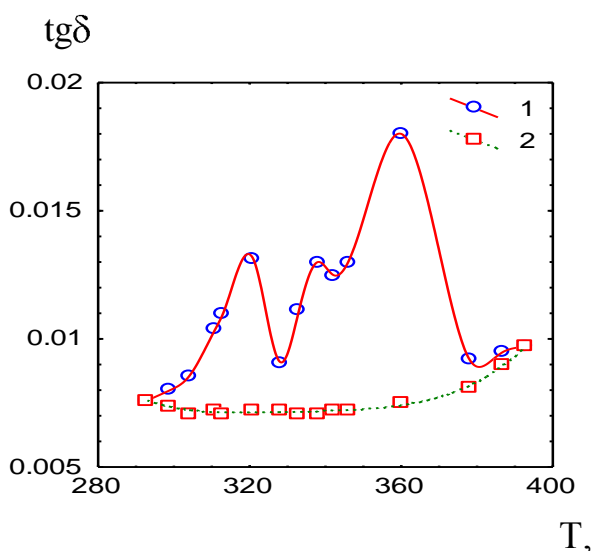


Рис.2. Осциллограмма начальных стадий импульса тока в гелии без магнитного поля (1) и в магнитном поле (2) при давлении газа 40 Торр.

При этом в разряде возникали неустойчивости, и на импульсе тока и напряжения появлялись колебания с характерной частотой $\sim 3 \cdot 10^7$ Гц.

Экспериментальные исследования показали, что оптическое излучение разряда имело частичную линейную поляризацию. При изменении давления газа в диапазоне 5-100 Торр степень линейной поляризации менялась на $\sim 5 \div 10$ %. Следует также отметить, что степень поляризации некоторых спектральной линии в начальных стадиях разряда была отрицательной, а в поздних стадиях разряда становилась положительной.



К

Рис.3. Зависимость $\text{tg}\delta$ - диэлектрических потерь материала ПЭ-2 от температуры, измеренная через 5 минут после облучения электронным пучком. Энергия электронов 2 кэВ, ток пучка 10 мА. 1 - первый цикл нагревания. 2- повторный цикл нагревания.

Исследование степени поляризации излучения, регистрируемого из различных областей трубки показало, что вблизи катода степень поляризации излучения выше, чем вблизи анода (табл.1). С увеличением амплитуды приложенного напряжения степень поляризации для спектральных линий $\lambda=587,6$ нм и $\lambda=388,9$ нм заметно росла, а для линии с $\lambda=492,1$ нм этот рост был незначительным.

Характерный вид измеренной зависимости концентрации метастабильных атомов $\text{He}(2^3\text{S})$ от давления газа и времени приведен на рис. 5. Концентрация метастабильных атомов без магнитного поля с ростом давления растет, причем в зависимости от амплитуды приложенного напряжения расположение характерных точек меняется.

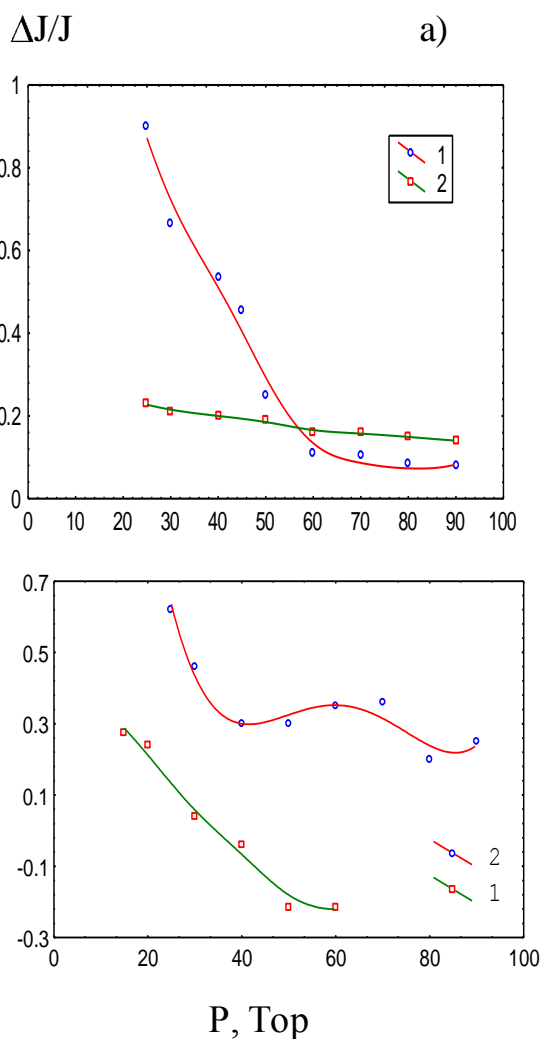


Рис. 4. Зависимость относительного изменения интенсивности излучения HeI от давления в первом максимуме при наложении магнитного поля. $U_0 = 3.2$ кВ а) 1 - $\lambda = 388.9$ нм; 2 - $\lambda = 501.6$ нм. б) 1 - $\lambda = 492.1$ нм; 2 - $\lambda = 587.6$ нм

x, мм	η_1 , %	η_2 , %
0,5	-22	-36
2	-14	-22
3,5	-17	-15

Таблица 1

$$\lambda = 4921 \text{ (50 Торр, H=0)}$$

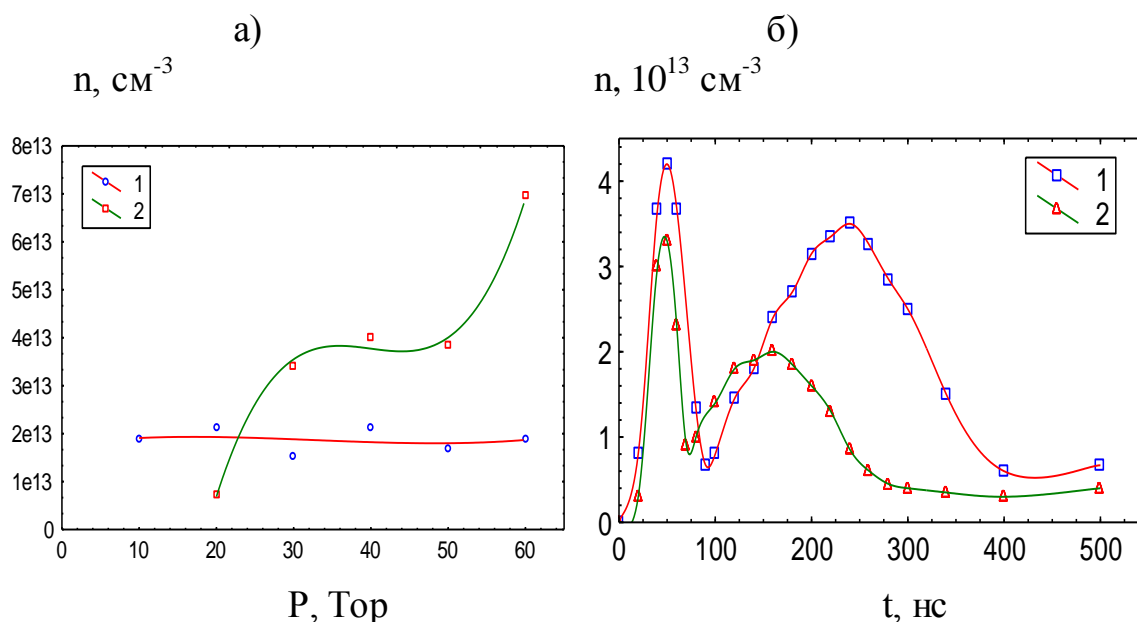


Рис. 5. Зависимость концентрации метастабильных атомов $\text{He}(2^3\text{S})$ от давления газа во втором максимуме импульса излучения (а). ($U_0 = 2,3$ кВ. 1 - $H = 4$ кЭрст, 2 - $H = 0$.) и от времени (б). (1 - $H=0$, 2 - $H=4$ кЭрст, $P=30$ Торр, $U_0=2,3$ кВ.)

Как видно из этого рисунка, в рассматриваемых условиях в без магнитного поля с увеличением давления газа в области 15-30 Торр концентрация метастабильных атомов растет, переходя впоследствии при давлениях газа 30-50 Торр на плато. Затем снова, начиная с 50 Торр и выше, наблюдается дальнейший рост. В магнитном поле в этих условиях (10-60 Торр) концентрация метастабильных атомов практически не меняется. При давлениях газа выше 25 Торр концентрация метастабильных атомов без магнитного поля была больше, чем в магнитном поле.

Зависимость концентрации метастабильных атомов на уровне $\text{HeI } 2^3\text{S}$ от времени приведена на рис.5б. На этой зависимости наблюдаются два пика, соответствующие двум основным пикам на импульсе тока.

Четвертая глава посвящена анализу влияния поперечного магнитного поля на электрокинетические и спектральные характеристики наносекундного разряда в гелии в коротких межэлектродных промежутках.

В §4.1 дан анализ времен формирования катодного слоя, его толщины и изменения этих параметров во внешнем поперечном магнитном поле. Получены зависимости толщины катодного слоя и катодного падения от давления как при наличии магнитного поля, так и без него. Наложение внешнего поперечного магнитного поля приводит к изменению длины катодного слоя по закону $l_{km}=l_k/(1+\tau^2 \omega^2)$. В рассмотренных условиях ток первичного пучка электронов составляет величину порядка 10 % от анодного тока. Увеличение приведенной плотности тока разряда во внешнем магнитном поле объясняется задержкой движения электронов через слой катодного падения потенциала. Здесь же делается вывод о том, что процесс ионизационной релаксации в магнитном поле и без него может быть описан одними и теми же уравнениями с той лишь разницей, что в магнитном поле электрическое поле E заменяется на $E_{эф} = E/(1+\tau^2 \omega^2)^{0.5}$, а подвижность электронов поперек магнитного поля $\mu_e = \mu_{e0} / (1+\tau^2 \omega^2)$.

Таким образом, поперечное магнитное поле уменьшает дрейфовую скорость электронов, и отчего растет время пребывания электронов в катодном слое усиленного электрического поля. Это приводит к росту числа ионизаций в катодном слое. С другой стороны, в столбе разряда уменьшение эффективного значения электрического поля равносильно “ кажущемуся увеличению ” давления газа, что наоборот вызывает уменьшение коэффициента ионизации $\alpha = \alpha (E/p)$, если $(E/p) < (E/p)_{кр}$. Для гелия приведенное значение критического электрического поля, начиная с которого электроны переходят в режим непрерывного ускорения, $(E/p)_{кр} = 150$ В/ см Тор. Это означает, что эффект “ кажущегося увеличения ” давления газа должен привести к снижению средней энергии электронов. Это обстоятельство учитывалось при численном моделировании релаксации заселенностей возбужденных состояний атомов.

Аналізу поляризационных явлений высоковольтного импульсного разряда в коротких межэлектродных промежутках посвящен §4.2. Степень линейной поляризации излучения представлена в виде суммы поляризации, определяемой электрическим полем P_f и анизотропной накачкой P_0 по формуле $\eta = P_f + P_0$. Приводится анализ анизотропии возбуждения атомных состояний электронным ударом для синглетных спектральных переходов HeI $nP-2^1S$ и $nP-2^1P$ ($n=4,5$).

Оценки показывают, что при напряженности электрического поля $E \sim 10^4$ В/см вклад электрического поля в поляризацию излучения разрешенной спектральной линии $\lambda=396.4$ нм составляет величину порядка 1%. Значит,

наблюдаемая в эксперименте поляризация излучения данной спектральной линии свидетельствует о наличии пучковой составляющей электронной компоненты.

Экспериментально наблюдаемое уменьшение степени поляризации излучения, отбираемого из областей, расположенных ближе к аноду (табл.1), по-видимому, связано с релаксацией пучковой составляющей электронной компоненты, формируемой в катодном слое идвигающейся в сторону анода.

Из результатов поляризационных измерений сделан вывод о том, что в исследованных условиях существенную роль при возбуждении атомных состояний гелия играет анизотропная часть функции распределения, связанная с группой быстрых электронов.

В §4.3 на основе теории модифицированного диффузионного приближения (МДП) проанализирована кинетика возбужденных атомов в поперечном магнитном поле. Влияние магнитного поля учитывалось в уравнении для средней энергии электронов путем введения изменения частоты столкновений электронов с атомами.

Расчеты проводились численно на ЭВМ в ударно - радиационном приближении и с учетом процессов ассоциативной ионизации и диссоциативной рекомбинации. Была моделирована динамика релаксации заселенностей возбужденных состояний атомов гелия с главными квантовыми числами с $n = 3,4$ и динамика релаксации средней энергии электронов на заднем фронте импульса тока. Выявлено, что при одинаковых начальных концентрациях электронов и начальной средней энергии электронов в процессе релаксации электронной компоненты за первые 40-60-нс наложение внешнего магнитного поля приводит к снижению концентрации возбужденных атомов, затем к росту. Наблюдалась сильная зависимость плотности возбужденных атомов от плотности электронов при их одинаковых начальных средних энергиях. Кроме того, в магнитном поле уменьшается время релаксации средней энергии электронов. При этом на заднем фронте импульса тока значение энергии “узкого места” меняется от 1,4 до 0,6 эВ. Энергия связи для блока уровней гелия с $n=3$ порядка 1,6 эВ, а для $n=4$ - 0,85 эВ [4]. Из результатов расчета видно, что в процессе релаксации наблюдается переход узкого места через уровни с $n=3$, т.е. меняется механизм заселения этих уровней. Поскольку уровни, расположенные выше “узкого места” находятся в равновесии с континуумом, то температурная зависимость их заселенностей иная, чем для уровней, расположенных ниже узкого места.

Численные расчеты в чисто ударно-радиационном приближении дают монотонные изменения концентраций возбужденных атомов, поэтому можно заключить, что наблюдаемый рост заселенностей в послесвечении связан с влиянием реакций с учетом молекулярных ионов гелия.

Проведенный расчет показывает, что наложение внешнего поперечного магнитного поля приводит к уменьшению средней энергии электронов. Кроме того, из-за задержки прохождения электронами области усиленного поля в поперечном магнитном поле растет число ионизаций в катодном слое, т.е. растет плотность электронов. Расчеты показали, что в рассматриваемых условиях рост интенсивности спектральных линий при наложении магнитного поля в разряде в значительной степени определяется процессами в катодном слое. С одной стороны, уменьшение средней энергии “убегающих электронов” приводит к росту частоты возбуждения, с другой - изменение соотношения между размерами катодного слоя и столба разряда приводит к эффективной объемной релаксации анизотропной части функции распределения электронов.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в данной работе.

Развита методика исследования и выполнены комплексные детальные экспериментальные исследования электрических и спектральных характеристик наносекундного разряда в гелии в коротких межэлектродных промежутках в поперечном магнитном поле в диапазоне давлений газа 5-100 Торр. В методе полного поглощения численно рассчитаны кривые полного поглощения на спектральном переходе $\text{HeI}(\lambda=388.9 \text{ нм})$ с учетом тонкой структуры и эффекта Зеемана.

Установлено, что в частотно-периодическом режиме основному пробую газа в трубке с диэлектрическими стенками предшествует несамостоятельная фаза длительностью в несколько нс, обусловленная переносом заряда, осажденного на стенках разрядной трубки.

Установлено, что наложение поперечного магнитного поля на нс разряд приводит к увеличению плотностью тока и уменьшению толщины катодного слоя при соблюдении закона подобия.

Впервые установлено, что в межэлектродных промежутках длиной 0.4-1 см изменение интенсивностей излучения в отдельных спектральных линиях при наложении поперечного магнитного поля в значительной степени обусловлено процессами в катодном слое и изменением соотношения

размеров катодного слоя и столба разряда.

Показано, что наложение поперечного магнитного поля приводит к увеличению скорости процессов рекомбинации, обусловленному уменьшением средней энергии электронов как за счет изменения частоты столкновений, так и за счет уменьшения относительной толщины катодного слоя.

Установлено, что спонтанное излучение наносекундного разряда в коротких промежутках частично поляризовано, и механизм поляризации обусловлен анизотропией процессов электронного возбуждения атомных состояний.

Прослежена кинетика метастабильных атомов в наносекундном разряде в поперечном магнитном поле. Предложен способ определения средней энергии электронов в нестационарной неравновесной плазме в поперечном магнитном поле на основе определения констант возбуждения метастабильных уровней электронным ударом.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Omarova N.O., Taibov K.T. Development kinetics of ionisation fronts and their impact on nanosecond discharge optic characteristics.// In Proceedings of the XX International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Pisa(Italy) , 1991. - P.540-541.
2. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Таибов К.Т. Кинетика продольных газовых разрядов с жесткой составляющей электронной компоненты. // Вестник ДГУ.Махачкала. 1995. Вып.1. -С.112-126.
3. Ашурбеков Н.А., Таибов К.Т. Разработка лазерных методов диагностики процессов пробоя в высоковольтных импульсных лазерно-технологических системах.// В сб.: Лазерная физика. Санкт-Петербург.1994, часть 4. Вып.7. -С.38.
4. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Таибов К.Т. Роль поверхностных явлений в процессе формирования ускоренных электронов в объемном разряде в коротких межэлектродных промежутках.// В сб.: Материалы II Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям. Минск.1997. -С.166-167.

5. Ашурбеков Н.А., Омарова Н.О., Таибов К.Т. Способ измерения плотности возбужденных атомов в наносекундном разряде./ Патент РФ N2082963. Бюлл.N18 от 27.06.1997.
6. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Омаров О.А., Таибов К.Т. Влияние поперечного магнитного поля на кинетические коэффициенты в плазме наносекундного разряда в гелии. // Вестник ДГУ. Махачкала,1997. Вып.1. -С.3-7.
7. Шахсинова М.Ш.,Ашурбеков Н.А. , Таибов К.Т. Реабсорбция оптического излучения нестационарной плазмы во внешнем магнитном поле. // В сб.: Мат. конф. молодых ученых , посв. 65-летию ДГУ. Махачкала. 1997. - С.112-113.
8. Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Таибов К.Т. Роль поверхностных явлений в процессе формирования ускоренных электронов в коротких межэлектродных промежутках. // В сб.: Физика межфазных явлений. Нальчик. 1998.-С.44-45.
9. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Омаров О.А., Таибов К.Т. Влияние поперечного магнитного поля на заселенности метастабильных состояний атомов гелия в наносекундном разряде. // В сб.: Материалы IX конференции по ФГР. Рязань. 1998. -С.67-68.
- 10.Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Омаров О.А., Таибов К.Т. Кинетика возбуждения атомов в наносекундном разряде в поперечном магнитном поле. // В сб.: Плазма XX век. Матер. конференции по ФНТП- 98. Петрозаводск.1998. Т.1. -С.187-189.
- 11.Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Таибов К.Т. Кинетика возбужденных атомов в плазме поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом. // Вестник ДГУ. Махачкала. 1998. Вып.1. -С.18-23.

Редактор Н.Т.Крайнова
Корректор З.М.Гаджибутаева

Подписано в печать 26.12.98.

Печать офсетная.

Тираж 100 экз.

Заказ 1204

Формат 60x80 1/16

Усл.п.л. 1.0

Уч-изд.л. 0,9

Издательско-полиграфический центр ДГУ
Махачкала, ул.26 Бакинских комиссаров, 59^е.