

На правах рукописи

Кобзева Виола Сайпуллаевна

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В ПОПЕРЕЧНОМ НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ
С ЩЕЛЕВЫМ КАТОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ**

Специальность
01.04.04 – Физическая электроника

АФТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Махачкала – 2008

Работа выполнена в Дагестанском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Ашурбеков Н.А.

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
доцент Иминов К.О.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Высикайло Ф. И.

доктор физико-математических наук,
профессор Гаджиалиев М.М.

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур
РАН

Защита состоится «29» октября 2008 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.053.02 при Дагестанском государственном университете по адресу: 367001, г. Махачкала, ул. М.Гаджиева, 43а, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан «27» сентября 2008 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Курбанисмаилов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Несамостоятельные плазменно-пучковые разряды (ППР), образованные внешним жестким ионизатором в инертных газах и их смесях обладают целым рядом преимуществ. Исследования последних лет показали, что коэффициент преобразования вложенной в газовую среду энергии в лазерное излучение в пучковых разрядах на порядок выше, чем в классических разрядах. Неравновесная плазма, создаваемая электронным пучком, находит широкое применение в различных технологических устройствах, в частности, для накачки электроионизационных лазеров, обработки поверхностей и нанесения тонких пленок, в радиационной и электронно-лучевой технологии, в плазмохимии и других областях. Однако получение таких разрядов связано с такими недостатками, как стоимость установок и громоздкость конструкций. Поэтому актуален вопрос о создании газоразрядных систем, в которых пучки быстрых электронов формируются в самом разряде в процессе электрического пробоя газа. На настоящий момент быстрые электроны получены в продольных разрядах в длинных трубках на фронте высокоскоростных волн ионизации; в открытых разрядах с короткими межэлектродными промежутками; в разрядах с полым катодом; в скользящих по поверхности диэлектрика разрядах.

Одним из перспективных направлений создания пучковой газоразрядной плазмы является импульсный поперечный наносекундный разряд с полым катодом. Существенные отличия разрядов с полым катодом от разрядов с плоскими электродами позволило выделить их в отдельный класс. В настоящее время наиболее полно изучены разряды с цилиндрическим полым катодом. Свойства ППР во многом определяются условиями в стадии формирования разряда и геометрией катода. В связи с этим значительный интерес представляют разряды с щелевым катодом, в которых из-за проникновения плазмы в полость катода и осциллирующего движения электронов в ней может формироваться пучок электронов с энергией до нескольких сот электронвольт. Такие разряды позволяют получить токи до сотен ампер при средних и повышенных давлениях газа, необходимые для получения оптической генерации. Преимуществами поперечного разряда с щелевым катодом перед другими аналогичными разрядами являются существенно больший объем плазмы, малые рабочие напряжения и возможность управления свойствами пучка. Несмотря на эти очевидные преимущества таких разрядов к настоящему времени хорошо изучен только тлеющий разряд с цилиндрическим полым катодом в стационарном или квазистационарном режиме.

Настоящая диссертация посвящена изучению кинетических эффектов в поперечном наносекундном газовом разряде с щелевым катодом в инертных газах при средних давлениях газа. В частности работа посвящена исследованию динамики формирования оптических свойств и кинетики

заряженных частиц таких разрядов и их влияния на процесс формирования пробоя газа, а также установлению оптимальных характеристик поперечных наносекундных газовых разрядов с щелевым катодом с точки зрения генерации высокоэнергетичных электронов.

Объектом исследования являлись поперечные наносекундные разряды плазменно-пучкового типа с щелевым катодом в инертных газах (гелий, аргон). Исследования проводились в диапазоне давлений рабочего газа 1-100 Тор и напряжениях на разрядном промежутке 0,5-5 кВ.

Целью диссертационной работы являлось комплексное исследование кинетических эффектов в импульсных наносекундных разрядах плазменно-пучкового типа с щелевым катодом в гелии и аргоне.

Задачи, решаемые в данной работе:

1. Развитие методики комплексного исследования наносекундного разряда плазменно-пучкового типа и получение экспериментальных сведений об основных параметрах наносекундного разряда с щелевым катодом в He, Ar в диапазоне давлений газа 1-100 Тор;
2. Детальное экспериментальное исследование и анализ механизмов и динамики развития поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом в инертных газах при средних давлениях газа в открытом и ограниченном диэлектрическими стенками режимах;
3. Экспериментальное исследование оптических и спектральных характеристик ППР с щелевым катодом;
4. Исследование механизмов формирования ускоренных электронов и режимов движения этих электронов в ППР с щелевым катодом;
5. Численное исследование распределения основных параметров ППР в полости щелевого катода.

Для решения поставленных задач были использованы **следующие методы:**

- Для определения плотности тока и электрокинетических характеристик разряда использовался метод осциллографирования вольтамперных характеристик (ВАХ) разряда с наносекундным временным разрешением.
- Для исследования пространственно-временного распределения оптического излучения разряда использовались метод лучеиспускания и фоторегистрация с использованием цифровой ПЗС-камеры, подключенной к компьютеру.
- Плотность метастабильных и возбужденных атомов измерялись методом реабсорбции излучения в разряде и модификацией этого метода – методом одного плоского зеркала за трубкой.
- Для исследования анизотропии функции распределения электронов и процессов электронного возбуждения атомов использовался метод поляризационной спектроскопии.

Научная новизна. В работе впервые проведено систематическое исследование наносекундного разряда с щелевым катодом в широком диапазоне изменения условий в разряде в открытом и ограниченном диэлектрическими стенками режимах. Получены экспериментальные сведения об основных параметрах таких разрядов. Впервые выполнен детальный анализ динамики и механизмов развития наносекундного разряда с щелевым катодом в различных режимах формирования и установлены общие закономерности в оптических и электрических свойствах.

Положения, выносимые на защиту:

1. При высоких значениях амплитуд напряжения на осциллограмме разрядного тока ограниченного разряда формируется дополнительный максимум тока. Плотность тока на катоде для открытого разряда на порядок больше, чем дает закон подобия для аномально-тлеющего разряда (АТР), а для ограниченного разряда это отличие еще больше. Поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом является особой формой разряда, отличной от АТР.
2. Коэффициент эмиссии γ имеет высокие значения, и они не могут быть объяснены эмиссией электронов с катода под действием его бомбардировки быстрыми тяжелыми частицами без привлечения дополнительных механизмов эмиссии, в частности фотоэлектронной эмиссии.
3. Образование катодного слоя происходит в начальной фазе разряда, и электроны, эмитируемые с катода, при прохождении катодного слоя, где сосредоточена основная часть приложенного поля, ускоряются, совершают колебательные движения внутри полости катода и одновременно смещаются в сторону анода. При определенных условиях возможна фокусировка части электронов вблизи основания щели. Проникновение электрического потенциала вглубь полости катода обусловлено исключительно накоплением пространственного заряда.
4. Критерий μ , определяющий границу перехода к пучковому режиму движения электронов от гидродинамического, является нелокальным и при движении в направлении анода пучковый режим движения электронов постепенно переходит в гидродинамический. Электроны, ускоренные в области КПП, достигают анода и оказывают существенное влияние на динамику развития и структуру оптического излучения. Наличие пучковой составляющей электронной компоненты приводит к поляризации атомных состояний.
5. Наблюдаемые в эксперименте для ограниченного разряда два характерных времени релаксации оптического излучения связаны со сменой локального режима релаксации высокоэнергетичных электронов на нелокальный в результате скачкообразного изменения пристеночного потенциала.

Научная и практическая ценность работы. Результаты работы важны для понимания физики процессов, протекающих в наносекундных разрядах плазменно-пучкового типа с генерацией быстрых электронов в самом разряде. Результаты комплексного исследования данного типа разряда могут быть использованы для оптимизации параметров плазменных лазеров, при разработке плазменных реакторов и различных устройств сильноточной электроники.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: VIII Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2001», Москва; II, III, IV Всероссийские конференции «Физическая электроника», Махачкала (2001, 2003 и 2006 гг.); Второй Международный конгресс студентов, молодых ученых и специалистов «Молодежь и наука – третье тысячелетие»/YSTM'02, Москва; XI Всероссийская конференция по физике газового разряда ФГР, 2002, Рязань; Третья и шестая региональные научно-практические конференции «Компьютерные технологии в науке, экономике и образовании» СТ+SEE, Махачкала (2002 и 2005 гг.); XXXIII и XXXV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород (2006 и 2008 гг.); Международная конференция «Наука и технологии: Шаг в будущее-2006», Киев; V International Conference Plasmas' Physics and Plasma Technology – PPPT-5 (2006), Minsk, Belarus; Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», 2007, Махачкала; VIII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул», 2007, Томск.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 работы. Из них статей в журналах, рекомендованных ВАК – 5, статей в других журналах – 2; тезисов докладов в материалах конференций – 16.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации 176 страниц (44 рисунка и 6 таблиц). Список цитируемой литературы содержит 257 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и решаемые в работе задачи, дается краткое описание структуры и содержания диссертации.

В главе I диссертации дан литературный обзор работ, в которых изучаются разряды, в которых имеет место генерация высокоэнергетичных электронов.

В параграфе 1.1. рассмотрены основные свойства и характеристики газовых разрядов, развивающихся в режиме формирования высокоэнергетичных электронов. В параграфе 1.2. проанализированы работы, в которых исследуются разряды с полым катодом, где генерация высокоэнергетичных электронов происходит в самом разряде.

При достаточно больших перенапряжениях классические модели пробоя плотных газов не применимы, т.к. развитие газоразрядного процесса во многом отличается от закономерностей классических форм разряда. Одной из важных особенностей высоковольтных наносекундных разрядов, развивающихся в перенапряженных газовых промежутках, является формирование высокоэнергетичных электронов, называемых также в литературе как быстрые электроны или же «убегающие электроны». На основе экспериментальных данных и теоретических исследований в научной литературе предлагается следующий механизм генерации пучка убегающих электронов в газах: сначала, в предымпульсе, имеет место слабая фоновая предыонизация объема быстрыми эмиссионными электронами, затем распространяется волна размножения электронов фона. Когда волна размножения подходит близко к аноду, выполняется нелокальный критерий убегания электронов и происходит генерация пучка убегающих электронов.

Следует отметить, что согласно нелокальному критерию убегания электронов значительное число электронов в межэлектродном промежутке являются убегающими электронами, когда расстояние между электродами становится сравнимым с обратным коэффициентом Таунсенда. Нелокальный критерий сильно отличается от принятого в настоящее время локального критерия. В частности, из этих критериев вытекают различные рекомендации для формирования электронных пучков в газах. Нелокальный критерий приводит к универсальной для данного газа зависимости критического напряжения $U_{cr}(pd)$ между электродами (при котором убегающие электроны составляют значительную долю) от произведения расстояния между электродами на давление газа pd . Кривая $U_{cr}(pd)$ отделяет область эффективного размножения электронов от области, в которой электроны покидают разрядный промежуток, не успев размножиться. Эта кривая имеет верхнюю и нижнюю ветви. Верхняя ветвь характеризует убегание электронов, нижняя – уход за счет дрейфа. Минимальное значение pd на кривой $U_{cr}(pd)$ соответствует максимуму зависимости коэффициента Таунсенда от E/p . На основе зависимости $U_{cr}(pd)$ построены аналоги кривых Пашена $U_{br}(pd)$, характеризующих зажигание самостоятельного разряда. Они

отличаются от известных кривых Пашена наличием верхней ветки. Однако вышеизложенная теория имеет ряд противников, предлагающих другие критерии и механизмы формирования высокоэнергетичных электронов.

Другой вопрос, по которому в научной литературе нет единого мнения – это сам механизм формирования электронов и роль различных механизмов эмиссии электронов с катода.

Таким образом, обзор научной литературы показывает, что в настоящее время нет единого мнения по вопросам кинетики формирования и распада плазмы, образованной пучками быстрых электронов. Такие ситуации закономерны, поскольку нет достаточно полной экспериментальной базы данных для формирования достоверных выводов. В этой связи остро стоит вопрос о детальном комплексном экспериментальном исследовании физических процессов в таких системах.

В настоящее время для создания пучковой газоразрядной плазмы эффективно используется импульсный поперечный наносекундный разряд с полым катодом. Несмотря на очевидные преимущества таких разрядов к настоящему времени хорошо изучен только тлеющий разряд с цилиндрическим полым катодом, имеются работы, в которых рассматриваются разряды с сетчатым анодом и сравнительно небольшое количество работ, посвященных изучению высоковольтного разряда с щелевым катодом.

Во второй главе описаны экспериментальные установки и методики комплексного исследования пучковой плазмы поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом, используемые в настоящей работе.

Вторая глава содержит четыре параграфа. В первом параграфе описывается экспериментальная установка для исследования поперечного импульсного наносекундного разряда с щелевым катодом. Во втором и третьем параграфе описываются методики исследования электрокинетических, оптических и спектральных характеристик исследуемого разряда. В четвертом параграфе оцениваются погрешности измерений.

Экспериментальная установка для исследования поперечного импульсного наносекундного разряда состоит из генератора высоковольтных наносекундных импульсов напряжения (ГИН), собранного по схеме Блюмляйна, генератора синхронизации ГИС, в качестве которого использовался генератор Г5-54, разрядной камеры, системы напуска, откачки газа и контроля давления газа, систем диагностики электрических и оптических характеристик разряда.

Накопительный элемент ГИН состоит из керамических малоиндуктивных конденсаторов типа КВИ-3, расположенных непосредственно на электродах с двух сторон разрядной камеры, соединенных полосковыми линиями. Такая их компоновка позволяет получить минимальную индуктивность разрядного контура и позволяет вырабатывать импульсы напряжения с передним фронтом 10-15 нс и частотой повторения до 50 Гц. Кроме того, использование в ГИН схемы

Блюмляйна позволяет реализовать режим удвоения напряжения и получать импульсы напряжения с регулируемой амплитудой до 10 кВ. В качестве коммутирующего устройства в ГИН использован керамический тиратрон с водородным наполнением типа ТГИ1-500/16, включенный по схеме с общим катодом.

Разрядная камера представляла собой кварцевую трубку, в которую помещены два алюминиевых электрода, расположенных на расстоянии 0,6 см друг от друга, один из которых (катод) имеет сложную геометрию, а именно представляет собой цилиндрический стержень длиной 40 см и диаметром 1,2 см, вдоль которого прорезана полость шириной 0,2 см, глубиной 0,6 см. Анод представляет собой плоскую пластину с шириной 2 см и толщиной 0,5 см. Выбор такой формы поверхности полого катода и расстояния между электродами обусловлены требованиями устойчивого горения объемного разряда. Этот разряд условно назовем открытым, поскольку плазма имеет возможность свободного расширения с двух сторон. В другой серии экспериментов область разряда ограничивалась диэлектрическими стенками из полированного стеклотекстолита, оставляя лишь прямоугольник, продолжающий полость катода. Такой разряд далее назовем ограниченным.

В следующих двух параграфах описаны методики и экспериментальные установки исследования электрических, оптических, спектральных и пространственно-временных характеристик поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом. В работе использовались следующие экспериментальные методы: метод осциллографирования вольтамперных характеристик (ВАХ) разряда с наносекундным временным разрешением; метод лучеиспускания; фоторегистрация с использованием цифровой ПЗС-камеры; метод реабсорбции излучения в разряде и модификация этого метода – метод одного плоского зеркала за трубкой; метод поляризационной спектроскопии.

Регистрационная система на основе осциллографа с цифровым люминофором типа Tektronix TDS 3032B обеспечивает непрерывный сбор данных со скоростью 3600 осциллограмм/с. Данный осциллограф имеет следующие технические характеристики: полоса пропускания осциллографа – 300 МГц; число каналов – 2; частота дискретизации в каждом канале – 2,5 Гвыб/с; максимальная длина памяти 10 тыс. точек. Точность измерений регистрирующей системы по времени составляет $20 \cdot 10^{-6}$; погрешность по амплитуде – $\pm 2\%$.

В данной работе для выделения спектральных линий использован Монохроматор/Спектрограф MS 7504i. MS 7504i оснащены 4-х позиционной турелью для автоматической смены дифракционных решеток.

Для регистрации анизотропии вместе с монохроматором использовалась цифровая камера HS 102H. Камера предназначена для работы в качестве системы регистрации в составе оптических спектральных приборов в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм под управлением персонального компьютера.

В заключение второй главы даны оценки общей погрешности измерений. Для условий эксперимента настоящей диссертационной работы погрешность измерений составляла не более 15 %.

В главе III приводятся основные результаты экспериментального исследования.

В ходе работы было проведено комплексное исследование параметров плазмы высоковольтного наносекундного разряда в щелевом катоде в инертных газах, которое включает в себя экспериментальное исследование электрических характеристик: напряжения и тока разряда при различных давлениях газа и перенапряжениях, пространственно-временного распределения интегрального по спектру излучения, динамики спектральных свойств оптического излучения из различных областей полости катода и между электродами, степени поляризации спонтанного излучения в открытой и ограниченной геометрии разряда, плотности метастабильных атомов. Исследования проводились в разрядах в гелии и в аргоне в диапазоне давлений газа 1 – 100 Тор. Амплитуда напряжения на промежутке регулировалась в диапазоне 0,5 – 5 кВ, при этом амплитуда импульса тока менялась в пределах 50 – 500 А.

Экспериментальные исследования показали, что осциллограммы разрядного тока (I_p) и напряжения горения (U_T) для открытого и ограниченного разряда, полученные при одинаковых значениях прикладываемого к электродам внешнего напряжения (U_0) и давлении рабочего газа (p) существенно отличаются по форме, величине и длительности.

На рис. 1. представлены характерное поперечное распределение оптического излучения и осциллограммы электрических характеристик разряда в гелии при давлении газа 10 Тор и напряжении горения 600 В. На рис. 2. приведены характерные картины распределения оптического излучения между электродами в открытой конструкции разрядного промежутка в аргоне.

Систематизация полученных результатов показывает, что в случае разряда в гелии при низких значениях амплитуды подаваемого напряжения (менее 1 кВ) и давления (до 10 Тор) в щели полого катода и у выхода из нее наблюдается светящаяся область с максимальной яркостью излучения у выхода из щели, переходящая далее по направлению к аноду в область темного пространства. При этом у поверхности анода также наблюдается небольшая светящаяся область с пятнами на аноде. С ростом величины напряжения на электродах уменьшается область темного пространства между катодом и анодом за счет увеличения светящейся области со стороны катода и одновременно увеличивается интенсивность оптического излучения во всем промежутке. При высоких напряжениях оптическое излучение заполняет весь промежуток между катодом и анодом, и в этом случае интенсивность излучения имеет максимальное значение у выхода из щели в полости катода.

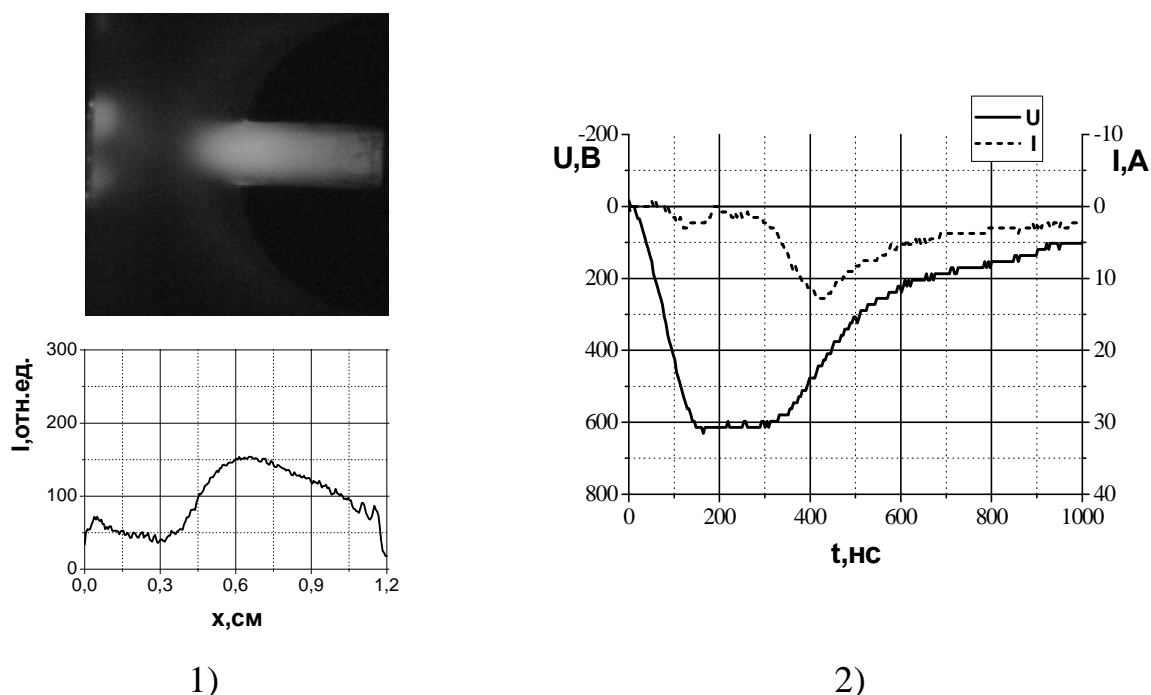


Рис. 1. Поперечное распределение оптического излучения (1) и осциллограммы электрических характеристик (2) открытого разряда в гелии при давлении газа 10 Тор и напряжении горения 600 В.

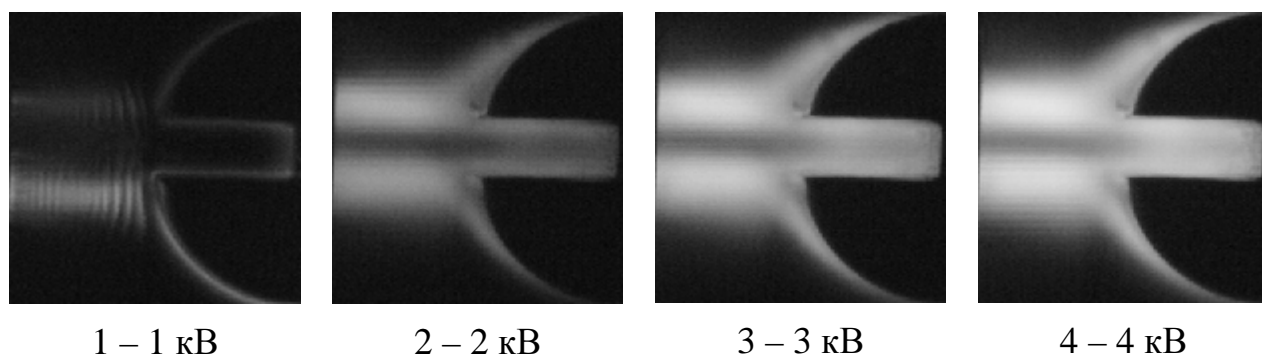


Рис. 2. Оптические картины разряда в аргоне в открытом разряде при $p = 15$ Тор и различных значениях амплитуды подаваемого напряжения.

При давлениях газа от 10 Тор и значениях амплитуды подаваемого напряжения ниже 2,5 кВ разряд в аргоне в открытой конструкции разрядного промежутка идет вдоль стенок щели и в центре щели наблюдается темное пространство, которое иногда доходит до анода. С повышением напряжения на электродах разряд постепенно заполняет всю щель и при $U_0 \sim 2,5$ кВ горит однородный объемный разряд во всем объеме между катодом и анодом.

Экспериментально показано, что в исследованных условиях излучение на всех указанных спектральных линиях частично поляризовано, причем степень линейной поляризации излучения η на разных линиях различна по величине. При этом значение η для линии $\lambda = 396,5$ нм в ограниченном разряде заметно меньше чем в открытом разряде. Исследование зависимости η от величины прикладываемого поля U_0 и давления газа p в разрядной

камере показало, что для линий $\lambda = 396.5$ нм и $\lambda = 492.1$ нм значение η слабо зависит от величины U_0 и p и, примерно, составляет 26 и 4% соответственно. А для линии $\lambda = 501.6$ нм, при $U_0 = 1.5$ кВ значение η уменьшается с 12% до 5% при увеличении величины p от 5 до 60 Тор. При постепенном увеличении величины U_0 значение η для области $p = 5 - 10$ Тор остается практически постоянным, а для области $p = 10 - 60$ Тор постепенно увеличивается и при $U_0 = 3.5$ кВ для $p = 60$ Тор значение η увеличивается до 11% и сравнивается со значением η при $p = 5$ Тор.

Четвертая глава посвящена анализу полученных экспериментальных результатов. Описывается кинетическая модель формирования плазменно-пучковых разрядов с щелевым катодом. Здесь же приводятся результаты численного моделирования.

Были рассчитаны плотности тока j_a для аномального тлеющего разряда в гелии при значениях напряжения на электродах в момент максимума разрядного тока, энергия быстрых электронов ϵ , обобщенный коэффициент ионно-электронной эмиссии γ из экспериментальных данных для разрядного тока и напряжения горения в максимуме тока и суммарный коэффициент эмиссии электронов γ_1 под действием бомбардировки поверхности катода быстрыми тяжелыми частицами (ионами и атомами). Полученные значения j_a и экспериментальные данные плотности тока разряда на катоде j_k приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры заряженных частиц ППР в гелии

	j_k , А/см ²	j_a , А/см ²	j_k/j_a	γ	γ_1	μ	ϵ , эВ	Λ , см
1	0,23	0,015	15	1,54	0,68	0,059-3,54	372	0,59
2	1,39	0,11	12	3,80	0,93	0,049-2,94	660	1,43
3	2,50	0,25	10	4,91	1,03	0,044-2,64	810	1,96
4	4,50	0,33	14	8,12	1,12	0,042-2,52	936	2,45
5	3,21	0,18	18	9,00	1,07 (1,77)	0,040-2,40	1122	3,24
6	7,68	0,38	20	14,14	1,30 (2,38)	0,036-2,16	1320	4,16
7	8,93	0,25	36	17,66	1,34 (2,45)	0,035-2,10	1350	4,30
8	8,95	0,18	50	20,46	1,41 (2,52)	0,035-2,10	1380	4,45

Из табл. 1 видно, что для условий открытого разряда j_k на порядок больше, чем j_a , а для ограниченного разряда это отличие еще больше. Это отличие ВАХ ППР от ВАХ аномального разряда обусловленное эффектом полого катода и геометрией разрядного промежутка указывает, что ППР наносекундной длительности с щелевым катодом сильно отличается от аномального тлеющего разряда и обладает уникальными свойствами. Отметим, что для этих же условий плотность тока в разрядном промежутке почти в семь раз больше j_k . Столь существенное отличие j_k от j_a для поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом можно использовать для получения больших токов при фиксированном значении U_0 . В табл. 2 приведены основные параметры заряженных частиц ППР в аргоне.

Таблица 2. Основные параметры заряженных частиц ППР в аргоне

	j_p , А/см ²	$n_i \cdot 10^{-12}$, см ⁻³	$v_i \cdot 10^{-6}$, см/с	γ	μ	ϵ , эВ	Λ , см
1	3,1	4,15	0,95	3,76	0,28 – 22	420	0,24
2	9,5	6,19	1,18	7,30	0,23 – 18	630	0,36
3	14,2	6,64	1,20	10,24	0,23 – 18	660	0,38
4	18,5	6,78	1,21	12,98	0,22 – 18	690	0,40
5	20,7	6,49	1,19	15,86	0,23 – 18	680	0,38
6	58,8	8,08	1,33	33,35	0,20 – 16	822	0,47
7	65	9,14	1,40	30,55	0,19 – 16	930	0,54
8	65	10	1,48	26,54	0,18 – 15	1020	0,59

В ходе проведенного анализа установлено, что плотность тока на катоде для открытого разряда на порядок больше, чем дает закон подобия для аномально-тлеющего разряда (АТР), а для ограниченного разряда это отличие еще больше. Показано, что поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом является особой формой разряда, отличной от АТР. Для всех исследованных условий коэффициент эмиссии γ имеет высокие значения, и они не могут быть объяснены эмиссией электронов с катода под действием его бомбардировки быстрыми тяжелыми частицами без привлечения дополнительных механизмов эмиссии, в частности фотоэлектронной эмиссии.

Далее исследован характер движения ускоренных электронов в разрядном промежутке и показано, что критерий μ , определяющий границу перехода к пучковому режиму движения электронов от гидродинамического, является нелокальным и при движении в направлении анода пучковый режим движения электронов постепенно переходит в гидродинамический. Электроны, ускоренные в области КПП, достигают анода и оказывают существенное влияние на динамику развития и структуру оптического излучения. Показано, что наличие пучковой составляющей электронной компоненты приводит к поляризации атомных состояний и как следствие – частичную линейную поляризацию спонтанного излучения разряда.

Установлено, что наблюдаемые в эксперименте для ограниченного разряда два характерных времени релаксации оптического излучения связаны со сменой локального режима релаксации высокоэнергетичных электронов на нелокальный в результате скачкообразного изменения пристеночного потенциала. Наличие пучковой составляющей электронной компоненты приводит к поляризации атомных состояний.

Анализ физических процессов в щелевом катоде показывает, что наблюдаемые в эксперименте особенности распределения интенсивности оптического излучения в полости катода и распределения основных параметров ионизованного газа (n_e , T_e , J) связаны с распределением электрического потенциала в полости катода и характером движения электронов в ней. Численно рассчитаны распределение потенциала

электрического поля и траектории движения электронов в полости щелевого катода и определено влияние пространственного заряда и сопротивления газовой среды на распределение электрического потенциала и траектории движения электронов в полости катода.

В качестве исходного уравнения рассмотрено уравнение Лапласа для двумерного случая, поскольку вдоль катода (координаты z) условия не меняются:

$$\frac{\partial^2 j(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j(x, y)}{\partial y^2} = e[n_e(x, y) - n_i(x, y)]$$

Здесь e – заряд электрона; $n_e(x, y)$ и $n_i(x, y)$ – плотности электронов и ионов соответственно. Распределение зарядов $n_e(x, y)$ и $n_i(x, y)$ в полости катода выбирались из следующих соображений.

Предполагалось, что ионы создаются в основном в объеме плазмы посредством ионизации и попадают из него в катодный слой, имея направленную скорость u_0 . Такое движение ионов должно компенсировать их потери из-за рекомбинации на стенке. Для простоты вначале рассмотрена задача о стационарном слое без учета столкновений в катодном слое, затем учтено влияние столкновений.

Тогда из закона сохранения энергии мы имеем:

$$\frac{1}{2} M J^2 = \frac{1}{2} M J_0^2 - e j(x, y)$$

$$J = \left(J_0^2 - \frac{2e j(x, y)}{M} \right)^{1/2},$$

где M – масса ионов; $j(x, y)$ – распределение потенциала внутри полости катода в двумерном случае; $J(x, y)$ – скорость ионов. Из уравнения непрерывности для ионов плотность ионов можно выразить через плотность фоновой (квазистационарной) плазмы n_0 :

$$n_0 J_0 = n_i(x, y) \cdot J(x, y),$$

отсюда

$$n_i(x, y) = n_0 \left(1 - \frac{2e j(x, y)}{M J_0^2} \right)^{-1/2}.$$

Плотность же электронов в стационарном случае будет подчиняться распределению Больцмана:

$$n_e(x, y) = n_0 \cdot \exp\left(\frac{e j(x, y)}{k T_e} \right)$$

где $k T_e$ – средняя энергия электронов.

В ходе анализа показано, что образование катодного слоя происходит в начальной фазе разряда, и электроны, эмитируемые с катода, при прохождении катодного слоя, где сосредоточена основная часть приложенного поля, ускоряются, совершают колебательные движения внутри полости катода и одновременно смещаются в сторону анода. При определенных условиях возможна фокусировка части электронов вблизи основания щели. Проникновение электрического потенциала вглубь полости катода обусловлено исключительно накоплением пространственного заряда. Далее проведено сопоставление результатов численного моделирования с кинетическими эффектами, наблюдаемыми экспериментально.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Развита методика комплексного исследования динамики развития и релаксации поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом, включающая в себя методы исследования вольтамперных характеристик, пространственно-временного распределения оптического излучения, плотности возбужденных, в том числе метастабильных атомов и анизотропных процессов электронного возбуждения атомов. Создана система автоматизированного измерения оптических и электрических характеристик поперечных наносекундных разрядов.
2. Выполнены систематические экспериментальные исследования электрических характеристик и пространственного распределения оптического излучения поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом в зависимости от амплитуды напряжения пробоя, давления газа и наличия диэлектрических стенок, ограничивающих область разряда. Экспериментально установлено, что ВАХ открытого и ограниченного наносекундного разряда с щелевым катодом во всех исследованных режимах горения сильно отличаются. При высоких значениях амплитуд напряжения на осциллограмме разрядного тока ограниченного разряда формируется дополнительный максимум тока, и различие в плотности тока по сравнению с открытым разрядом достигает более одного порядка величины.
3. Установлено, что плотность тока на катоде для открытого разряда на порядок больше, чем дает закон подобия для аномально-тлеющего разряда (АТР), а для ограниченного разряда это отличие еще больше. Показано, что поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом является особой формой разряда, отличной от АТР.
4. Показано, что для всех исследованных условий коэффициент эмиссии γ имеет высокие значения, и они не могут быть объяснены эмиссией электронов с катода под действием его бомбардировки быстрыми тяжелыми частицами без привлечения дополнительных механизмов эмиссии, в частности фотоэлектронной эмиссии.

5. Показано, что образование катодного слоя происходит в начальной фазе разряда, и электроны, эмитируемые с катода, при прохождении катодного слоя, где сосредоточена основная часть приложенного поля, ускоряются, совершают колебательные движения внутри полости катода и одновременно смещаются в сторону анода. При определенных условиях возможна фокусировка части электронов вблизи основания щели. Проникновение электрического потенциала вглубь полости катода обусловлено исключительно накоплением пространственного заряда.
6. Показано, что критерий μ , определяющий границу перехода к пучковому режиму движения электронов от гидродинамического, является нелокальным и при движении в направлении анода пучковый режим движения электронов постепенно переходит в гидродинамический. Электроны, ускоренные в области КПП, достигают анода и оказывают существенное влияние на динамику развития и структуру оптического излучения. Наличие пучковой составляющей электронной компоненты приводит к поляризации атомных состояний.
7. Установлено, что наблюдаемые в эксперименте для ограниченного разряда два характерных времени релаксации оптического излучения связаны со сменой локального режима релаксации высокоэнергетичных электронов на нелокальный в результате скачкообразного изменения пристеночного потенциала.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах (примечание: автор и соавтор Виричуева В.С. в последствии Кобзева В.С.):

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК

1. Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А. Пространственное распределение параметров плазмы внутри полости катода в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом // Известия РАН. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 9. С. 1307 – 1311.
2. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В., Омаров О.А. Роль быстрых электронов в кинетике оптического излучения в плазменно-пучковом разряде с щелевым катодом // Известия ВУЗов Сев.-Кав. региона. Естественные науки. № 3. 2006. С. 16 – 19.
3. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Формирование ускоренных электронов и их влияние на структуру наносекундного разряда с щелевым катодом // ТВТ. 2007. Т. 45. № 3. С. 1 – 7.
4. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. О роли высокоэнергетичных электронов в формировании структуры плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 12. С. 47 – 54.

5. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с щелевым катодом, ограниченного диэлектрическими стенками. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 1. С. 17-25.

Другие публикации

1. Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А. Численное моделирование распределения электрического потенциала в газовом разряде с щелевым катодом // Вестник ДГУ. Естественные науки. Махачкала. 2001. Вып. 1. С. 5 – 9.
2. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Омаров О.А. Динамика развития поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом // Вестник ДГУ. Естественные науки. Спец. выпуск, посвященный 60-летию кафедры общей физики. Махачкала. 2005. С. 97 – 101.
3. Виричуева В.С. Кинетика электронов в щелевом катоде при высоковольтном наносекундном пробое аргона // В сб.: Тезисы VIII Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2001». Секция Физика. М. 2001. С. 165 – 166.
4. Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А. Пространственное распределение параметров плазмы в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом // В сб.: Материалы II Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2001. С. 18 – 23.
5. Виричуева В.С. Катодные процессы в активной среде пеннинговского плазменного лазера на смесях инертных газов // В сб.: Тезисы Второго Международного конгресса студентов, молодых ученых и специалистов «Молодежь и наука – третье тысячелетие»/YSTM'02. М. Часть I. 2002. С. 69.
6. Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А. Численное моделирование распределения электрического потенциала в поперечном газовом разряде с щелевым катодом // В сб.: Материалы XI Всероссийской конференции по физике газового разряда ФГР-2002. Рязань. 2002. С. 54 – 55.
7. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Виричуева В.С. Численное моделирование распределения параметров плазмы в полном катоде с использованием пакета MathCAD Professional // В сб.: Материалы третьей региональной научно-практической конференции «Компьютерные технологии в науке, экономике и образовании» СТ+SEE 2002. Махачкала. 2002. С. 17 – 19.
8. Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А. Исследование механизмов формирования плазмы внутри полости катода в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом // В сб.: Материалы III Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2003. С. 106 – 113.

9. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С. Расчет пространственной зависимости коэффициента ионизации для гелия в полости щелевого катода // В сб.: Материалы шестой региональной научно-практической конференции «Компьютерные технологии в науке, экономике и образовании» СТ+SEE 2005. Махачкала. 2005. С. 27 – 30.
10. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С. Динамика формирования поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом в инертных газах // В сб.: Материалы XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. 2006.
<http://plasma.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIII/T.html#Sekcija T>
11. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. О роли высокоэнергетичных электронов в формировании структуры плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом // В сб.: Тезисы Международной конференции «Наука и технологии: Шаг в будущее-2006». Киев. 2006.
http://www.rusnauka.com/NTSB_2006/Phisica/3_ashurbekov%20n.a..doc.htm
12. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Kobzeva V.S., Kobzev O.V. On the mechanism of development of plasma-beam discharge with the slot-hole cathode // V International Conference Plasms Physics and Plasma Technology – PPPT-5. Minsk, Belarus. 2006. V. 1. P. 128 – 131.
13. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В., Омаров О.А. Свойства наносекундного разряда среднего давления с щелевым катодом в аргоне // В сб.: Материалы IV Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2006. С. 115 – 119.
14. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Электрические характеристики ограниченного наносекундного разряда с щелевым катодом // В сб.: Материалы IV Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2006. С. 120 – 121.
15. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Выстраивание атомных состояний в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом в гелии. // В сб.: «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2007. С. 545-548.
16. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Эмиссия электронов с поверхности щелевого катода в поперечном наносекундном разряде гелии. // В сб.: «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2007. С. 549-552.
17. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Режимы формирования оптического излучения наносекундного плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом. // VIII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул». Томск. 10-14 сентября 2007. <http://symp.iao.ru/ru/ampl/08/sess/>
18. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Поляризация состояний атомов гелия в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом. // В сб.: Тезисы докладов XXXV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород. 2008.
<http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXV/L.html#Sekcija P>