

На правах рукописи

Кобзев Олег Вадимович

**Кинетические процессы формирования
плазменных структур в поперечных
наносекундных разрядах с полым катодом**

Специальность
01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Махачкала – 2011

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,
профессор Бычков В.Л. (МГУ)

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

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Объединенный институт высоких температур
РАН

Защита состоится « 28 » декабря 2011 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.053.02 при Дагестанском государственном университете по адресу: 367025, г. Махачкала, ул. М.Гаджиева, 43а, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан « 28 » ноября 2011 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Курбанисмаилов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Исследование упорядоченных плазменных структур, формирующихся под действием внешнего и внутренних электрических полей, поиск их механизмов и построение теории нелинейных взаимодействий электрического поля с потоками заряженных частиц плазмы является важной, но все еще нерешенной задачей. Несмотря на большое количество работ по слабоионизованной плазме и переносу тока в электрических разрядах, проблема фокусировки тока и электрического поля в плазменные структуры, о чем свидетельствует излучение из высоковольтных наносекундных разрядов, остается все еще малоизученной. Как известно, страты являются ярким примером самоорганизации плазмы газового разряда, поддерживаемой электрическим полем. В результате многолетних исследований в научной литературе накоплен значительный экспериментальный материал о свойствах страт. Хотя считается установленным, что страты представляют собой явление, присущее именно неравновесной газоразрядной плазме, в которой основную роль играют процессы генерации и переноса заряженных частиц, уровень понимания этого интересного явления до сих пор весьма далек от совершенства. Особый интерес представляют исследования условий и механизмов самоорганизации и формирования регулярных периодических плазменных структур во внешнем магнитном поле. Во внешнем магнитном поле меняются как диффузия и подвижность заряженных частиц, так и кинетические коэффициенты электронов. Поскольку страты имеют природу ионизации и переноса заряженных частиц, то наложение внешнего магнитного поля позволяет управляемым образом влиять на формирование страт и получить дополнительные сведения о механизмах стратификации плазменного столба, о свойствах страт и об их неоднозначном поведении.

В связи с вышеуказанными обстоятельствами, особый интерес представляют исследования условий и механизмов самоорганизации и формирования регулярных периодических плазменных структур в более сложных разрядных условиях, например, в высоковольтных импульсных наносекундных разрядах, в которых в процессе электрического пробоя газа формируется пучок быстрых электронов с энергией до нескольких кэВ.

Настоящая диссертация посвящена изучению кинетики формирования плазменных структур в поперечных наносекундных газовых разрядах в инертных газах с различными профилями поверхности полого катода во внешнем магнитном поле и без него.

Объектом исследования являлись поперечные наносекундные разряды плазменно-пучкового типа с полым катодом в инертных газах (гелий, аргон, неон). Исследования проводились в диапазоне давлений рабочего газа 1–100 Тор и напряжениях 0,1–3 кВ.

Целью диссертационной работы являлось комплексное исследование процессов формирования плазменных структур в импульсных наносекундных разрядах плазменно-пучкового типа с полым катодом в инертных газах.

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 полым катодом в инертных газах в диапазоне давлений газа 1–100 Тор;
2. Детальное экспериментальное исследование и анализ механизмов формирования плазменных структур в поперечном наносекундном разряде с различными профилями полого катода в инертных газах при средних давлениях газа;
3. Экспериментальное исследование оптических и спектральных характеристик плазменно-пучкового разряда с прямоугольной и полукруглой полостью катода и разряда с плоскими электродами;
4. Исследование влияния внешнего магнитного поля на динамику развития поперечного наносекундного разряда с различными профилями полого катода в инертных газах;
5. Численное исследование распределения основных параметров между электродами в плазменно-пучковом разряде с полым катодом.

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.
- Плотность метастабильных и возбужденных атомов измерялись методом реабсорбции излучения в разряде и модификацией этого метода – методом одного плоского зеркала за трубкой.
- Для теоретического анализа процессов использовались численные методы исследования.

Научная новизна. В работе впервые проведено систематическое исследование режимов формирования поперечного наносекундного разряда с различной конфигурацией поверхности катода в широком диапазоне изменения условий в разряде. Впервые экспериментально обнаружено формирование периодической плазменной структуры в наносекундных разрядах с полым катодом при средних давлениях газа. Установлено наличие верхней границы по напряжению, начиная с которой плазменная структура исчезает. Получены экспериментальные данные и общие закономерности

формирования периодической плазменной структуры. Впервые выполнено детальное исследование влияния внешнего магнитного поля на периодические плазменные структуры. Построена численная модель формирования плазменных зарядовых структур в поперечных наносекундных разрядах в инертных газах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные данные об основных электрических и оптических характеристиках поперечных наносекундных разрядов с катодами с различной кривизной поверхности.
2. В наносекундном поперечном разряде с щелевым катодом, полукруглой полостью в катоде и с плоскими электродами в гелии, неоне и аргоне в диапазоне давлений газа 5–60 Тор формируется периодическая плазменная структура.
3. Существует верхняя граница по напряжениям на электродах, начиная с которой периодическая плазменная структура разряда переходит в однородную форму разряда.
4. С наложением внешнего магнитного поля пространственный период плазменных структур уменьшается, а верхняя граница существования плазменной структуры по напряжению горения и по току в гелии растет, а в неоне и аргоне уменьшается;
5. При наличии неоднородного поперечного дрейфа электронов в процессе пробоя газа вблизи щели в катоде формируется плазменная структура высокой плотности зарядов.

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: Международная конференция «Наука и технологии: Шаг в будущее-2006» (Киев, 2006); V и VI International Conference Plasmas' Physics and Plasma Technology – PPPT (Minsk, 2006 и 2009); IV, V и VI Всероссийская конференция «Физическая электроника» (Махачкала, 2006, 2008 и 2010); VIII и IX Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (Томск, 2007 и 2009); Международная конференция «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2007, 2009 и 2010); XXXV, XXXVI, XXXVII и XXXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2008, 2009, 2010 и 2011); 9-е Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике (Москва, 2010); Шестнадцатая Всероссийская научная

конференция студентов-физиков и молодых ученых – ВНКСФ-16 (Волгоград, 2010); Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов» (Казань, 2011).

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы», ГК № 02.740.11.0570 с использованием оборудования ЦКП «Аналитическая спектроскопия», ГК № 16.552.11.7051 по ФЦП «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 – 2012 годы».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 34 работы. Из них статей в журналах, входящих в Перечень ВАК – 10, тезисов докладов в материалах конференций – 24.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации 155 страниц (39 рисунков и 5 таблиц). Список цитируемой литературы содержит 157 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 дан обзор научных работ, посвященных исследованию особенностей электрического пробоя газов в сильных нестационарных электрических полях с генерацией высокоэнергетичных электронов. Рассмотрены результаты исследований кумулятивно-диссипативных процессов, приводящих к формированию плазменных структур (кумуляция, страты, контракция).

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на значительное количество работ по слабоионизованной плазме и переносу тока в электрических разрядах, проблема фокусировки тока и электрического поля в плазменные структуры остается малоизученной. Хотя считается установленным, что страты представляют собой явление, присущее именно неравновесной газоразрядной плазме, в которой основную роль играют процессы генерации и переноса заряженных частиц, уровень понимания этого интересного явления до сих пор весьма далек от совершенства.

В настоящее время ионизационно - диффузная природа страт является твердо установленной и для описания страт развита линейная гидродинамическая теория, позволяющая на основе дисперсионного уравнения объяснить возможность усиления бегущих страт.

Гидродинамическое приближение в теории страт предполагает, что в положительном столбе за счет упругих соударений электронов успевают устанавливаться локальное распределение электронов по энергиям. В

классических обзорах по явлениям переноса (ионизационным волнам) в газоразрядной плазме А.В. Недоспасова и Л. Пекарека сформулирована исходная система гидродинамических уравнений, где основным и единственным процессом переноса плазменных возмущений считают классическую амбиполярную диффузию Шоттки.

Во второй главе описаны экспериментальные установки и методики комплексного исследования плазменно-пучкового поперечного наносекундного разряда с полым катодом с различной конфигурацией поверхности катода при наличии магнитного поля и без него.

В первом параграфе описывается экспериментальная установка для исследования поперечного импульсного наносекундного разряда с полым катодом. Во втором и третьем параграфах описываются методики исследования электрокинетических, оптических и спектральных характеристик исследуемого типа 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, 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 сформировать 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. 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 диаметром 3 см, в которую помещены два алюминиевых электрода, расположенных на расстоянии 0,6 см друг от друга, один из которых (катод) имел сложную геометрию (рис. 1б–1г). На рис. 1 представлены три типа поверхности катода, а именно: катод, вдоль которого прорезана полость полукруглой формы радиусом 0,3 см, в виде щели шириной 0,2 см, глубиной 0,6 см и катод, представляющий собой плоскую пластину. Анод во всех случаях представлял собой плоскую пластину длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0,5 см. В таких разрядных конфигурациях получен объемный разряд в гелии, аргоне и неоне в диапазоне давлений газа 1–100 Тор и диапазоне напряжений 0,1–3 кВ.

В следующих двух параграфах описаны методики и экспериментальные установки исследования электрических, оптических, спектральных характеристик поперечного наносекундного разряда с полым катодом.

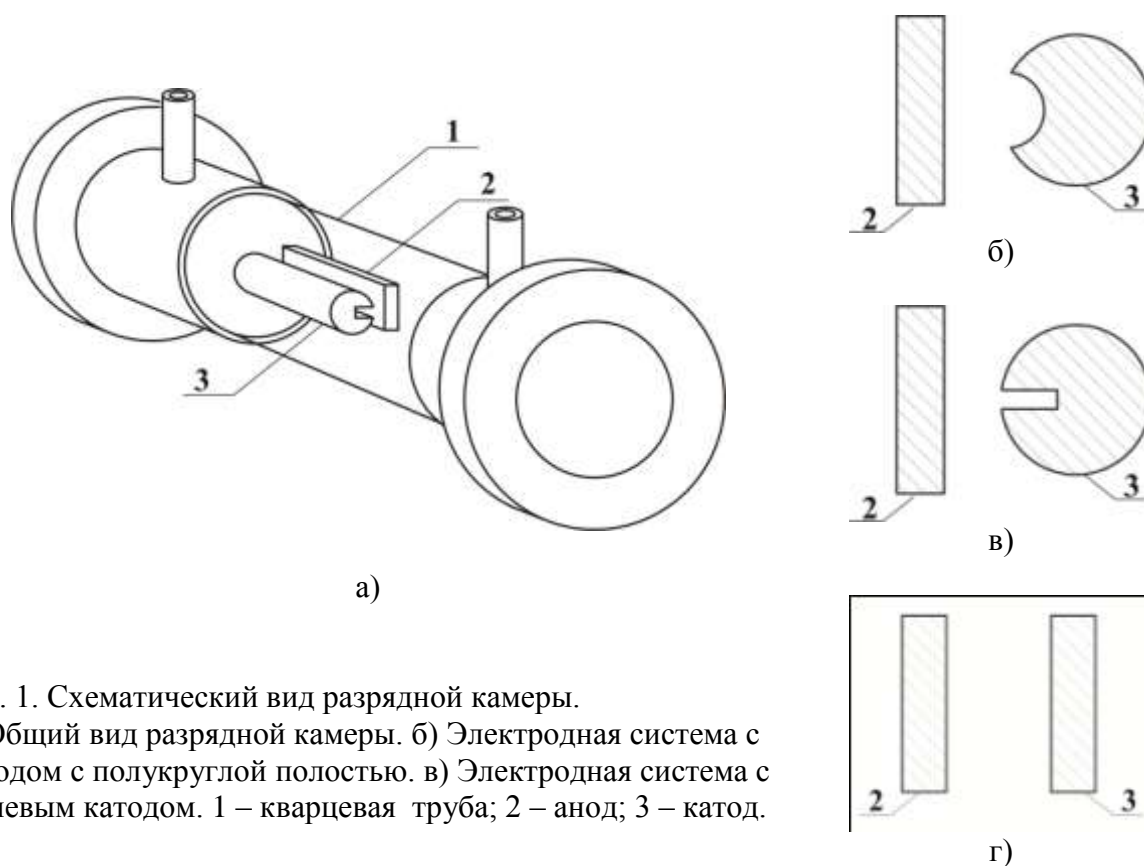


Рис. 1. Схематический вид разрядной камеры.

а) Общий вид разрядной камеры. б) Электродная система с катодом с полукруглой полостью. в) Электродная система с щелевым катодом. 1 – кварцевая труба; 2 – анод; 3 – катод.

В работе использовались следующие экспериментальные методы: метод осциллографирования электрических характеристик 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.

В качестве регистрирующего прибора использовался четырехканальный осциллограф Tektronix TDS 2024B. Аналоговая полоса пропускания осциллографа составляет 200 МГц, расчетное время нарастания сигнала – 2,5 нс. Временная развертка осциллографа составляет величину от 2,5 нс/дел до 50 с/дел, что позволяет регистрировать сигнал с длительностью от 5 нс. Диапазон скоростей выборки для обычного запуска осциллографа от 100 выб/с до 2 Гвыб/с. Погрешность измерений осциллографа по амплитуде составляла не более 3%, по времени – не более 0.005%.

К разрядной камере с торцов пристраивались ПЗС-камера фирмы Sony марки LTV-СМН-400, отделенная от разряда ослабляющим светофильтром, и монохроматор-спектрограф фирмы Solar ТП марки MS7504i, оснащенный камерой марки HS 102H для регистрации панорамных спектров излучения, и ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ марки Н6780-20 – для регистрации отдельных спектральных линий. Монохроматор-спектрограф Solar ТП MS7504i имеет обратную линейную дисперсию 0,9 нм/мм.

Измерения плотности метастабильных и возбужденных атомов проводились методом реабсорбции излучения в разряде и модификацией этого метода – методом одного плоского зеркала за трубкой. В качестве

отражающего зеркала использовалось зеркало фирмы Thorlabs марки pf10-03-p01. Средний коэффициент отражения зеркала для диапазона длин волн 400–700 нм составлял не менее 96%.

В главе III представлены результаты комплексного экспериментального исследования поперечного наносекундного разряда с полым катодом в инертных газах. Выполнены детальные экспериментальные исследования влияния профиля поверхности катода и внешнего магнитного поля на характер формирования и основные характеристики разряда.

Исследования проводились в широком диапазоне изменения давления газа в разрядной камере (1–100 Тор) и амплитуды напряжения (0,1–3 кВ) в гелии, неоне и аргоне. Установлены общие закономерности формирования пространственной структуры разряда при различных профилях поверхности катода, зависимости электрических и оптических характеристик от времени, детально изучены условия и динамики формирования регулярной периодической плазменной структуры в разрядном промежутке при наносекундном пробое инертных газов. Исследования проводились как в магнитном поле, так и без него в поперечных наносекундных разрядах с катодом с полостью в виде полукруга и с прямоугольной полостью и плоскими электродами.

В рассматриваемых условиях оптическими методами определены концентрации метастабильных атомов, а также оценены плотности электронов по проводимости разряда. Для условий данной работы концентрация метастабильных атомов составляла в максимуме величину порядка 10^{12} см⁻³. Далее экспериментально и с помощью теоретического анализа и соответствующих оценок показано, что спонтанное излучение разряда имеет частичную линейную поляризацию, обусловленную наличием пучковой составляющей электронной компоненты, которая вызывает анизотропию процессов электронного возбуждения атомов в плазме наносекундного разряда с полым катодом.

При исследовании поперечных высоковольтных наносекундных разрядов с полым катодом впервые были обнаружены и экспериментально исследованы два типа неоднородностей разряда: эффект кумуляции оптического излучения у выхода из полости катода и формирование регулярных периодических плазменных структур в разрядном промежутке. В этих же условиях исследованы вольт-амперные характеристики разряда, закономерности изменения тока разряда в максимуме в зависимости от давления газа и величины прикладываемого напряжения.

На рис. 2 представлены характерные оптические картины пространственной структуры разряда в поперечном сечении и соответствующие этим условиям импульсы тока разряда и напряжения на электродах.

Детальное исследование условий формирования упорядоченных периодических плазменных структур показало, что существует верхняя граница формирования упорядоченных структур по току разряда и напряжению на электродах для всех трех исследованных газов.

Далее были выполнены исследования влияния внешнего постоянного магнитного поля напряженностью 1.8 кЭ на характеристики плазменных структур.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены характерные зависимости верхних границ существования плазменных структур по току и напряжению в зависимости от давления гелия в магнитном поле и без него.

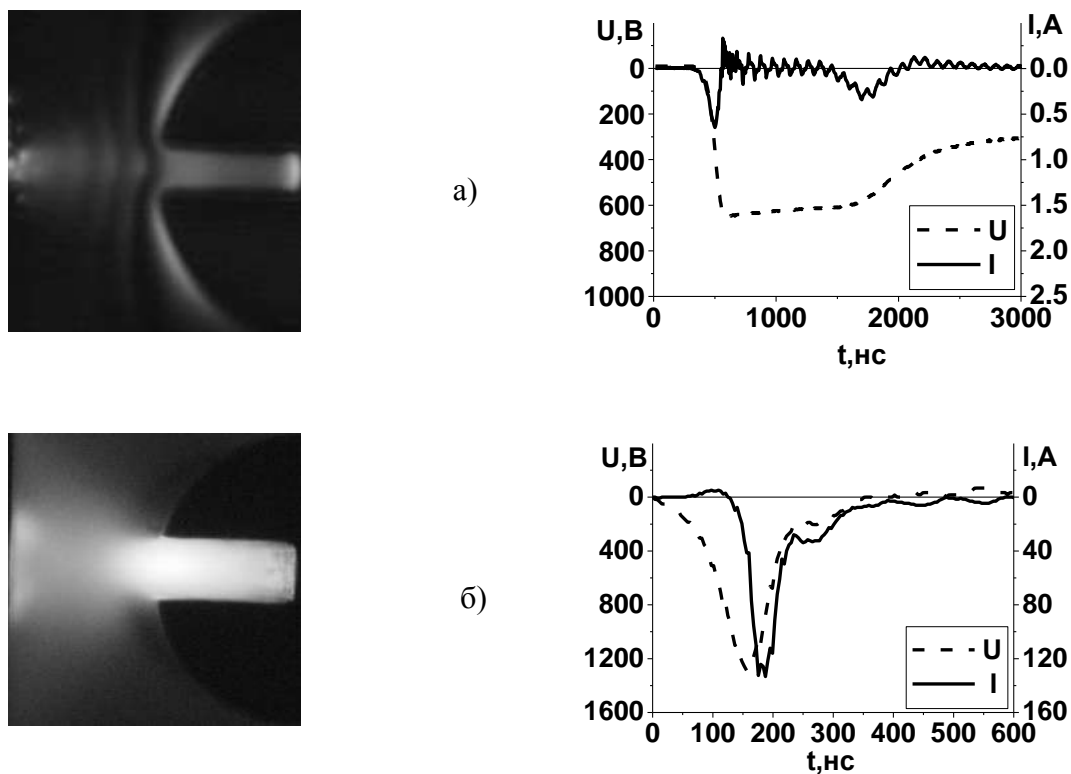


Рис. 2. Характерные оптические картины и осциллограммы упорядоченной структуры и кумуляции разряда в гелии, $p = 10$ Тор. а) – $U = 0.65$ кВ, б) – $U = 1,3$ кВ.

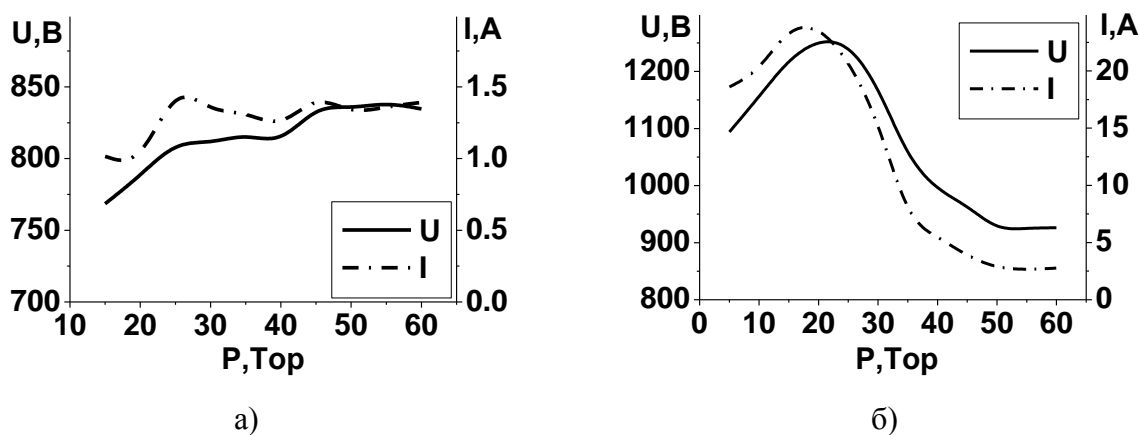


Рис. 3. Характерные графики зависимости верхних границ по току и напряжению в гелии в зависимости от давления в присутствии магнитного поля (б) и без него (а).

Систематизация и обобщение всех полученных экспериментальных результатов показывает следующие общие закономерности:

1. В импульсных наносекундных разрядах в инертных газах при средних давлениях рабочего газа в ограниченном диапазоне токов разряда и амплитуд напряжения формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт;
2. Слоистая структура плазменного столба во всех исследованных условиях появляется с катодной стороны и затухает к аноду. Внутри щели катода регулярная структура не наблюдается;
3. С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания страт, что приводит к уменьшению их длины при одновременном росте количества страт;
4. При наложении внешнего поперечного магнитного поля длина страт уменьшается, одновременно увеличивается область, занимаемая плазменной структурой, и расширяются границы формирования плазменной структуры по давлению;
5. Наложение магнитного поля приводит к существенному расширению верхней границы существования плазменной структуры по напряжению горения и особенно по току в гелии и, наоборот, к сужению этой границы в неоне и аргоне;
6. Использование катода с прямоугольной полостью приводит к расширению границы существования плазменной структуры по напряжению горения и по разрядному току.
7. Верхние границы формирования плазменной структуры по напряжению горения и, в особенности, по разрядному току в неоне намного выше, чем в аргоне, а в аргоне выше, чем в гелии.

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

Известно, что наблюдаемая слоистая структура положительного столба в любых газах является отражением электродинамических и кинетических процессов, происходящих в объеме плазмы, и формирование плазменных структур и скачков параметров плазмы зависит, в основном, от значений приведенного поля (E/N) и концентрации электронов (n_e). Поэтому в данной работе были проведены оценки этих величин. Размеры страт (L_s) определялись из оптических картин по количеству страт в разрядном промежутке и длине области положительного столба, занимаемого ими.

В табл. 1 приведены характерные количественные параметры упорядоченных плазменных структур для разряда с катодом с прямоугольной полостью.

Средняя приведенная напряженность электрического поля $(E/N)_p$, оценивалась по значению напряжения горения разряда в момент максимума разрядного тока. При оценке значений $(E/N)_p$ обосновывается, как и для аномального разряда, когда длина области КПП мала, возможность

определения величины падения напряжения на плазменном столбе как $U_{ps} = 2 \cdot U_r / 5$, где U_r – падение напряжения на разрядном промежутке. Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались из плотности тока разряда.

Таблица 1. Параметры разряда и плазменной структуры

газ	U_r , В	J_p , А/см ²	$(E/N)_p$, Тд	L_s , см	n_e , см ⁻³
He	580	0.13	88	0.14	$3.4 \cdot 10^{10}$
Ne	610	0.27	74	0.1	$8.1 \cdot 10^{10}$
Ar	650	1.65	66	0.03	$2.1 \cdot 10^{12}$

Аналогичный анализ выполнен и для развития разряда во внешнем магнитном поле. В наносекундных разрядах на стадии ионизационной релаксации средняя энергия электронов $\varepsilon > 4$ эВ, поэтому можно считать, что при фиксированном давлении газа частота упругих соударений является константой и частота ионизации в магнитном поле будет зависеть только от эффективного электрического поля. При этих предположениях процесс ионизационной релаксации в постоянном 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 $E_{эф}$. Исходя из этого, при оценках основных параметров в магнитном поле вместо величины E использовалось $E_{эф}$.

Полученные оценки показывают, что в наносекундных разрядах в инертных газах с параметрами $(E/N)_p$ порядка 100 Тд и давлении газа в несколько десятков Тор влияние диффузионных процессов переноса электронов и ионов, конвективных процессов переноса ионов и изменение плотности частиц газа (N) из-за его нагрева при формировании страт является незначительным. В этих условиях незначительна также роль процессов ступенчатой ионизации. Таким образом, можно предположить, что внутренние поля определяются только ионизацией атомов прямым электронным ударом и дрейфовым переносом электронов в электрическом поле, формируемом объемным зарядом ионов, т.е. исследованные в данной работе стоячие страты скорее являются ионизационно-дрейфовыми волнами, а не ионизационно-диффузионными.

Анализ зависимости длины страты от основных параметров разряда в He, Ne и Ar показывает, что с ростом атомного веса рабочего газа длина страты уменьшается.

Для количественной оценки вышеописанных экспериментальных данных по формированию плазменных структур у выхода из щели в катоде в исследуемом наносекундном разряде нами, при соответствующих упрощениях, была получена система дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнений для изменения концентраций электронов и ионов, а также напряженности электрического поля в разрядном промежутке:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial(n_e v_{ex})}{\partial x} + \frac{\partial(n_e v_{ey})}{\partial y} = \nu_i n_e,$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(n_i \mu_i E - D_i \frac{\partial n_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(n_i \mu_i E - D_i \frac{\partial n_i}{\partial y} \right) = \nu_i n_e,$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 4\pi\rho = 4\pi e(n_i - n_e),$$

где $v_{ex} = \mu_e E_x$, $v_{ey} = \mu_e E_y$, $E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$, $E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$, φ – потенциал на аноде, μ_e , μ_i – подвижность электронов и ионов, D_i – коэффициент диффузии ионов, ν_i – частота ионизации атомов электронным ударом, v_e – скорость электронов, E – напряженность электрического поля, $e = 4.803 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ.

Начальные и граничные условия выбирались исходя из условий эксперимента.

$$\varphi(t=0, x, y) = \varphi_0 \cdot \psi(y) \text{ ед. СГСЭ, } \varphi_0 = 0.5 - 3 \text{ ед. СГСЭ,}$$

$$n_e(t=0, x, y) = n_i(t=0, x, y) = n_{e_0} \cdot \psi(y) \text{ см}^{-3}, n_{e_0} = 10^{11} \text{ см}^{-3}, \varphi(t, x=0, y) = 0,$$

$$\varphi(t, x=L, y) = \varphi_0, n_e(t, x=0, y) = n_i(t, x=0, y) = 0, n_e(t, x=L, y) = n_{e_0},$$

$$n_i(t, x=L, y) = n_{e_0} + \frac{\varphi_0}{L \cdot e},$$

$$n_e(t, x, y=-y_1) = n_i(t, x, y=-y_1) = n_{e_0} \cdot \psi(y=-y_1),$$

$$n_e(t, x, y=y_1) = n_i(t, x, y=y_1) = n_{e_0} \cdot \psi(y=y_1),$$

$$\psi(x, y) = \psi_0 \cdot x \cdot \exp\left(-\frac{y}{0.2}(x \cdot (L-x))\right),$$

где $L = 0.6$ см – длина разрядного промежутка, $y_1 = 0.1$ см – полуширина разрядного промежутка.

Следует отметить, что при определении начальных и граничных условий распределение концентрации электронов и ионов считалось неоднородным. Специфика моделирования состоит в неравномерном боковом дрейфе частиц вблизи выхода из щели в катоде, который в итоге и приводит к образованию локальной области усиленного электрического поля.

Решение поставленной задачи производилось методом конечных разностей. Третье уравнение системы решалось с применением итерационного метода Либмана. Были рассчитаны распределения электронов, ионов и электрического поля в промежутке исследуемого импульсного плазменно-пучкового разряда наносекундной длительности при различных начальных и граничных условиях. Расчеты показали, что, действительно, при неоднородном характере процессов продольного и поперечного дрейфа электронов и ионов формируется нескомпенсированный

заряд и обусловленный им профиль электрического поля, который приводит к образованию локальной области усиленного электрического поля.

Таким образом, проявление инерционных свойств заряженных частиц при их взаимодействии с внешними электрическими полями может привести к формированию областей с усиленным электрическим полем, в которых интенсивно протекают процессы электронного возбуждения и ионизации атомов, формируя тем самым плазменные структуры непосредственно у выхода из щели в катоде (рис. 2б). Эта область в определенных условиях может играть роль виртуального плазменного анода.

Сопоставление и анализ оцененных параметров показывает, что пучковый режим движения в разрядном промежутке ускоренных в области катодного падения потенциала первичных электронов более характерен для разрядов в гелии, где до середины разрядного промежутка число первичных ускоренных электронов больше, чем число плазменных электронов. Оптимальным для генерации электронных пучков из исследованных разрядов является разряд в гелии с катодом с прямоугольной полостью.

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

1. Выполнены детальные исследования процессов формирования поперечного наносекундного разряда с различными профилями поверхности катодов с отрицательной кривизной. Установлены общие закономерности пространственного распределения параметров разряда в диапазоне давлений газа 1–100 Тор в зависимости от профиля поверхности катода
2. Экспериментально установлено, что в импульсных поперечных наносекундных разрядах в инертных газах при средних давлениях рабочего газа в ограниченном диапазоне малых токов разряда и амплитуд напряжения формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. Наоборот, при повышенных значениях тока разряда и амплитуд напряжения формируется область усиленной ионизации непосредственно у выхода из полости в щелевом катоде.
3. Определены закономерности изменения пространственного периода и коэффициента затухания плазменных структур в зависимости от давления газа, величины тока разряда и амплитуды импульсов напряжения. Установлено наличие верхней границы амплитуд тока разряда и напряжения на электродах, при которых формируется периодическая плазменная структура.
4. Установлены общие закономерности формирования упорядоченных плазменных структур в изучаемом типе разряда. Показано, что слоистая структура плазменного столба во всех исследованных условиях появляется с катодной стороны и затухает к аноду. Внутри щели катода регулярная структура не наблюдается. С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания страт, что

приводит к уменьшению их длины при одновременном росте количества страт.

5. Показано, что при наложении внешнего поперечного магнитного поля длина страт уменьшается, одновременно увеличивается область, занимаемая плазменной структурой, и расширяются границы формирования плазменной структуры по давлению. Наложение магнитного поля приводит к существенному расширению верхней границы существования плазменной структуры по напряжению горения и особенно по току в гелии и, наоборот, к сужению этой границы в неоне и аргоне. Использование катода с прямоугольной полостью приводит к расширению границы существования плазменной структуры по напряжению горения и по разрядному току.
6. Установлено, что в плазменно-пучковых наносекундных разрядах с щелевым катодом вблизи выхода из щели формируется плазменная структура с повышенной яркостью излучения, вызванная проявлением инерционных свойств заряженных частиц при их взаимодействии с внешними электрическими полями.
7. Аналитическими оценками и численным моделированием показано, что наблюдаемые в процессе наносекундного пробоя газа в сильных электрических полях плазменные структуры связаны с процессами ионизации атомов электронным ударом в сильном электрическом поле и их неоднородным дрейфом, как в продольном, так и поперечном направлениях.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК

1. 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. 2006. № 3. С.16 – 19.
2. 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. 485 – 491.
3. 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.
4. 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.
5. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Режимы формирования оптических свойств наносекундного разряда среднего

- давления с щелевым катодом в аргоне // Известия вузов. Физика. Томск. 2009. № 4. С. 89 – 94.
6. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Особенности механизмов формирования открытого и ограниченного поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом // ТВТ. 2009. Т. 47. № 3. С. 338 – 343.
 7. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Поляризация состояний атомов гелия в наносекундном разряде с щелевым катодом // ТВТ. 2010. Т. 48. № 2. С. 163 – 168.
 8. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Формирование высокоэнергетичных электронов в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом при средних давлениях рабочего газа // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63 – 70.
 9. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Периодические плазменные структуры в наносекундном разряде с щелевым катодом // ПЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 16. С. 62 – 69.
 10. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С., Шахсинов Г.Ш. Исследование влияния профиля поверхности катода на электрокинетические и оптические характеристики высоковольтного наносекундного разряда. // Вестник ДГУ. 2011. Вып. 1. С. 5 – 13.

Другие публикации

1. 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
2. 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 “Plasma Physics and Plasma Technology”. Minsk. Belarus. Vol. 1. P. 128 – 131.
3. 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 по физической электронике ФЭ-2006. Махачкала. 2006. С. 115 – 119.
4. 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 по физической электронике ФЭ-2006. Махачкала. 2006. С. 120 – 121.
5. 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/>

6. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В., Шахсинов Г.Ш. 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.
7. 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.
8. 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>
9. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Особенности пространственно-временного формирования наносекундного разряда с щелевым катодом в аргоне // В сб.: Материалы V Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2008. С. 77 – 81.
10. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Моделирование движения электронов в полости щелевого катода // В сб.: Материалы V Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2008. С. 82 – 86.
11. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Исследование структуры плазмы в щели катода поперечного наносекундного разряда в аргоне // В сб.: Тезисы докладов XXXVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород. 2009. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/L.html#Sekcija P>
12. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. Поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом при средних давлениях рабочего газа // IX Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» AMPL-2009. (14-18 сентября) Томск. 2009.
13. Ashurbekov N.A., Iminov K.O., Kobzev O.V., Kobzeva V.S. The Impact of Transversal Magnetic Field On the Spatial Structure of Nanosecond Discharge With Slot Cathode // VI International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT – 6) September 28 – October 2, 2009. Minsk, Belarus. Vol. 1. P. 241 – 244.
14. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Исследование влияния магнитного поля на границы существования регулярной структуры в наносекундном разряде с щелевым катодом в гелии // В сб.: «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2009. С. 522 – 525.
15. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В. Исследование структуры наносекундного разряда с щелевым катодом в гелии. // В сб.: Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по

физике плазмы и УТС, 8 – 12 февраля 2010 г.
<http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVII/L.html#Seksija P>

16. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Формирование положительно заряженной плазменной структуры в наносекундном разряде с щелевым катодом // 9-ое Международное Совещание по Магнитоплазменной Аэродинамике, Москва. (13-15 апреля 2010г).
17. Кобзев О.В. Исследование влияния поперечного магнитного поля на оптические свойства наносекундного разряда с щелевым катодом // В сб.: Материалы Шестнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-16, г. Волгоград, 22 – 29 апреля 2010 г.). С. 262.
18. Ашурбеков Н.А., Высикайло Ф.И., Иминов К.О., Кобзев О.В. Определение катодного падения в наносекундных разрядах по количеству визуализирующихся плазменных структур. // В сб.: Материалы VI Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2010. С. 64 – 67.
19. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С., Турциев Р.Г. Влияние поперечного магнитного поля на электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с полым катодом. // В сб.: Материалы VI Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2010. С. 85 – 87.
20. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С., Юсупова Г.М. Страты в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом в магнитном поле // В сб.: Материалы VI Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2010. С. 90 – 92.
21. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Страты в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом // В сб.: Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2010. С. 563 – 566.
22. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Влияние профиля поверхности катода на электрические характеристики высоковольтных наносекундных разрядов // В сб.: Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2010. С. 560 – 562.
23. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. Влияние профиля поверхности катода на электрические и оптические характеристики высоковольтного наносекундного разряда. // В сб.: Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 14-18 февраля 2011 г. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVIII/L.html#Seksija P>
24. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В. Исследование формирования слоев пространственного заряда в наносекундных разрядах // В сб.: Материалы Международной конференции «Физика высокочастотных разрядов» 5 – 8 апреля 2011 года. Казань, КГТУ. 2011. С. 130.