

На правах рукописи

Иминов Кади Османович

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОПЕРЕЧНЫХ
НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ С ПОЛЫМ
КАТОДОМ**

Специальность 01.04.04. – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Махачкала - 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Дагестанский государственный университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Ашурбеков Назир Ашурбекович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Тимофеев Николай Александрович

доктор физико-математических наук, профессор
Василяк Леонид Михайлович

доктор физико-математических наук, член-кор.
РАН **Муртазаев Акай Курбанович**

Ведущая организация: Учреждение российской академии наук
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
РАН»

Защита диссертации состоится «30» марта 2012 г. в 14 час на заседании диссертационного совета Д 212.053.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Дагестанском государственном университете по адресу: 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан « » _____ 2012г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

В. С. Курбанисмаилов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию кинетических свойств и особенностей формирования и развития поперечного наносекундного разряда с протяженным полым катодом при средних давлениях в инертных газах (He, Ne и Ar) – нового вида наносекундного разряда для использования в плазменных технологиях и устройствах.

Актуальность темы диссертации. Свойства плазмы, получаемой с помощью стороннего жесткого ионизатора, исследуются в течение длительного времени. Это связано с широким применением неравновесной плазмы, создаваемой электронными пучками, 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 в других областях. Однако, расширение областей применения электронных пучков сдерживается необходимостью совмещения условий, при которых происходит генерация электронных пучков, с условиями их использования. Эту проблему можно успешно решить, если генерировать пучки быстрых электронов в процессе электрического пробоя непосредственно в самой газовой среде.

В настоящее время пучки ускоренных электронов получены в высоковольтных нс разрядах в коротких межэлектродных промежутках при давлениях газа вплоть до атмосферного. Исследования, выполненные в последние десятилетия различными авторами, также показали, что генерация высокоэнергетических электронов имеет место в открытых разрядах с сетчатым анодом, в нс скользящих по поверхности диэлектрика разрядах в газе и в длинных трубках, где пробой газа происходит в виде ионизирующих волн градиента потенциала.

Научный интерес к исследованиям плазменно-пучковых разрядов связан не только с их широкими практическими применениями, но и с фундаментальными вопросами, связанными с физикой импульсного пробоя газов в условиях интенсивной генерации высокоэнергетических электронов. Кроме того, интерес представляют нелинейные явления, которые имеют место в неравновесной и нестационарной плазме импульсных плазменно-пучковых разрядов наносекундной длительности, приводящие к формированию регулярных плазменных структур.

Обзор научной литературы показывает, что в настоящее время нет единого мнения по вопросам динамики формирования и развития плазменно-пучковых разрядов и механизмам генерации убегающих электронов в таких разрядах. К примеру, последние годы велась научная дискуссия разных групп исследователей о критерии убегания электронов в плотных газах и механизмах генерации пучка убегающих электронов в наносекундных разрядах, по поводу механизма эмиссии и формирования электронных пучков в разряде открытого типа. Нет полного понимания природы формирования упорядоченных плазменных структур в сложных разрядных условиях. Такие ситуации закономерны, поскольку нет достаточно полной экспериментальной базы для формирования достоверных выводов. Поэтому актуальным является вопрос о детальном экспериментальном изучении физических свойств и разработке новых типов плазменно-пучковых разрядов для использования в устройствах сильноточной электроники.

Таким образом, к примерам имеющихся в этой области физики проблем, не получивших к моменту начала настоящей работы должного исследования и объяснения, можно отнести отсутствие единого мнения о механизме эмиссии электронов и о динамике формирования и развития плазменно-пучковых разрядов, недостаточность работ по развитию теории процессов, приводящих к генерации высокоэнергетичных электронов в наносекундных разрядах. Кроме того, практически нет работ по исследованию влияния магнитного поля на электрические, оптические, спектральные характеристики, динамику развития и структуру наносекундных плазменно-пучковых разрядов с полым катодом.

Сказанное позволяет определить предмет диссертации как кинетические процессы в поперечных наносекундных электрических разрядах с полым катодом и заключить, что актуальность работы обусловлена возможностью широкого использования результатов исследования при разработке и применении на практике нового класса электрических разрядов - сильноточных наносекундных плазменно-пучковых разрядов.

Цели работы заключались в следующем:

- экспериментальное исследование электрических, оптических, спектральных и поляризационных характеристик поперечных наносекундных электрических разрядов в инертных газах в зависимости от формы профиля поверхности катода и диэлектрической границы, ограничивающей область разряда в поперечном магнитном поле и без него;
- установление последовательной динамики формирования и развития поперечного наносекундного плазменно-пучкового разряда с полым катодом и исследование влияния формы поверхности катода на динамику развития и основные характеристики разряда;
- установление механизмов эмиссии, оценка значений коэффициента электронной эмиссии, исследование энергетических характеристик ускоренных электронов и влияния характера релаксации энергии ускоренных электронов на динамику развития и оптические свойства плазменно-пучкового разряда;
- исследование механизмов и степени влияния внешнего магнитного поля на пространственную структуру поперечных наносекундных разрядов с катодом с различной кривизной поверхности;
- экспериментальное и теоретическое исследование кинетики возбужденных атомов наносекундного разряда с полым катодом в инертных газах в магнитном поле и без него, а также изучение оптических эффектов, возникающих при взаимодействии широкополосного лазерного излучения с неоднородной и неравновесной плазмой поперечного наносекундного разряда с полым катодом;
- исследование физических процессов на границе диэлектрических материалов стенки, ограничивающей наносекундный плазменно-пучковый разряд.

Объектами исследования явились поперечные наносекундные плазменно-пучковые разряды с протяженными полыми катодами с различной кривизной поверхности в инертных газах в диапазоне давлений газа (1-100) Тор и амплитудах импульсов прикладываемого напряжения 0,1 – 5 кВ в магнитном поле и без него.

Методы исследования.

В соответствии с целями данной работы, были использованы следующие экспериментальные методы:

- динамика развития разряда исследовалась методом скоростной фоторегистрации с использованием фотоэлектрического регистратора типа ФЭР2-1, имеющего субнаносекундное временное разрешение;
- пространственная структура разряда исследовалась с использованием цифровой ПЗС-камеры, подключенной к компьютеру.
- концентрация электронов в разряде измерялась спектроскопическим методом по штарковскому уширению спектральных линий водорода, и оценивалась по проводимости на основе вольтамперных характеристик, измеренных методом осциллографирования;
- характеристики оптического излучения плазмы исследовались методом лучеиспускания;
- концентрации возбужденных, в том числе метастабильных, атомов измерялись методами реабсорбции оптического излучения и лазерной абсорбционной спектроскопии;
- поверхностные явления на стенках разрядной камеры исследовались путем измерения диэлектрической проницаемости и $\operatorname{tg} \delta$ - диэлектрических потерь материала стенки трубки.

Достоверность результатов работы подтверждается систематическим и комплексным характером исследования, позволившим получить экспериментальные данные путем использования различных современных экспериментальных методик исследования плазмы, а также согласованностью результатов численных моделей с экспериментальными результатами и имеющимися данными других авторов. Кроме того, достоверность результатов подтверждается согласием экспериментальных данных с результатами теоретических исследований.

Научная новизна работы определяется тем, что впервые:

- выполнены комплексные экспериментальные исследования основных характеристик и пространственной структуры поперечных наносекундных разрядов в гелии, неоне и аргоне в зависимости от амплитуды прикладываемого напряжения, давления газа, формы профиля полости в катоде и влияния диэлектрической границы, ограничивающей область разряда в магнитном поле и без него. Установлено, что в зависимости от значений параметра E/N и плотности электронов n_e существуют три различные формы функционирования исследованного наносекундного разряда, а именно: стратифицированный разряд, однородный объемный разряд с пучком электронов и сильноточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц;
- исследована динамика формирования наносекундных разрядов при различных профилях поверхности катода и установлено, что процесс формирования разряда с катодом с прямоугольной полостью состоит из двух стадий. На начальной стадии рост проводимости обусловлен лавинным размножением первичных электронов, инициированных с поверхности катода. На второй стадии в результате перераспределения электрического поля между

- электродами за счет пространственного заряда происходит электрический пробой между положительным пространственным зарядом и стенками полости катода, в результате чего разряд проникает внутрь полости, что приводит к росту импульса тока более, чем на порядок, и формированию основного импульса тока и излучения;
- предложен и реализован в разряде с полым катодом метод оценки значения коэффициента эмиссии электронов из катодной плазмы из осциллограмм напряжения горения и разрядного тока;
 - с использованием метода поляризационной спектроскопии установлено, что в исследуемом типе наносекундного разряда формируются пучки ускоренных электронов, и показано, что оптимальным для генерации электронных пучков из исследованных типов разрядов является открытый разряд с катодом с прямоугольной полостью, где величина тока пучка на поверхности анода достигает до 20% от величины разрядного тока;
 - впервые в наносекундных разрядах в инертных газах обнаружено и экспериментально исследовано формирование поперечных периодических плазменных структур. Определены верхние границы области формирования периодической структуры в разряде в гелии, неоне и аргоне по напряжению горения и разрядному току в постоянном магнитном поле и без него. Установлено, что при повышении напряжения из-за появления высокоэнергетических электронов плазменная структура размывается, и разряд переходит к однородной объемной форме;
 - обнаружено, что при высоких значениях прикладываемого напряжения в наносекундном разряде с щелевым катодом у выхода из полости катода формируется область нескомпенсированного положительного заряда, которая играет роль виртуального анода, и путем численного решения теоретической модели показано, что образование локальной области усиленного электрического поля связано с неоднородным характером процессов продольного и поперечного дрейфа электронов и ионов в исследованных условиях;
 - выполнены детальные исследования концентраций возбужденных атомов инертных газов в наносекундных разрядах с полым катодом в магнитном поле и без него. Установлено, что на заднем фронте импульса тока формируется второй максимум заселенностей возбужденных состояний атомов, связанный с быстрой релаксацией средней энергией электронов и, как следствие, перераспределением заселенностей уровней, расположенных в районе «узкого места»
 - впервые установлено, что в процессе взаимодействия широкополосного лазерного излучения с неоднородной плазмой поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом вблизи узкой спектральной линии поглощения неона на длине волны $\lambda = 650,6$ нм формируются контуры поглощения вида аномальной дисперсии;
 - исследованы закономерности изменения диэлектрических свойств материала стенки разрядной камеры при ее взаимодействии с наносекундным плазменно-пучковым разрядом. Установлено, что после взаимодействия с наносекундным плазменно-пучковым разрядом в частотной зависимости $\text{tg } \delta$ -

диэлектрических потерь в стенке разрядной камеры из стеклотекстолита происходят необратимые изменения.

На защиту выносятся:

1. Тип поперечного наносекундного разряда с протяженным полым катодом, позволяющий генерировать пучки ускоренных электронов с энергией несколько кэВ и мощные наносекундные импульсы тока с амплитудой до 1 кА при средних давлениях рабочего газа.
2. Динамика формирования и развития поперечного наносекундного разряда с протяженным полым катодом.
3. Метод оценки значения коэффициента электронной эмиссии из осциллограмм напряжения горения и разрядного тока; механизмы генерации быстрых электронов и энергетические характеристики ускоренных электронов.
4. Кинетика релаксации энергии ускоренных электронов и связь между особенностями релаксации энергии быстрых электронов и формированием структуры поперечного наносекундного плазменно-пучкового разряда с полым катодом.
5. Результаты исследования формирования периодической плазменной структуры в наносекундных разрядах с катодом с различной кривизной поверхности в инертных газах; основные параметры периодической плазменной структуры и верхние границы области их формирования в разряде по напряжению горения и разрядному току в гелии, неоне и аргоне в магнитном поле и без него.
6. Модель формирования виртуального анода у выхода из полости катода и результаты ее решения.
7. Механизмы изменения поперечных размеров, увеличения интенсивности оптического излучения и перераспределения интенсивностей в спектре излучения поперечного наносекундного разряда с полым катодом в поперечном магнитном поле.
8. Результаты исследования концентраций метастабильных атомов инертных газов в нс разрядах с полым катодом в магнитном поле и без него. Механизмы образования и разрушения метастабильных атомов в наносекундном разряде с полым катодом.
9. Закономерности формирования контура поглощения вида аномальной дисперсии на длине волны $\lambda = 650,6$ нм при взаимодействии широкополосного лазерного излучения с неоднородной плазмой поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом в неоне.
10. Результаты исследования общих закономерностей поверхностных явлений на границе наносекундный плазменно-пучковый разряд-диэлектрик.

Научная и практическая значимость работы определяется актуальностью темы и научной новизной проведенных в диссертации исследований. Результаты выполненных комплексных экспериментальных и теоретических исследований будут способствовать дальнейшему развитию физических представлений о наносекундных плазменно-пучковых разрядах, в частности, построению последовательной и непротиворечивой картины формирования и развития

наносекундных плазменно-пучковых разрядов, объяснению наблюдаемых в таких разрядах нелинейных эффектов.

Развитую в работе методику комплексного исследования нестационарной неравновесной плазмы плазменно-пучковых разрядов можно использовать для диагностики активных сред мощных газовых лазеров и других газоразрядных устройств на основе наносекундных разрядов.

Полученные в работе новые сведения о динамике и механизмах формирования оптического излучения в поперечных наносекундных плазменно-пучковых разрядах с полыми катодами использованы при разработке и оптимизации работы рекомбинационных газовых лазеров на пеннинговских смесях инертных газов с легкоионизирующими компонентами.

Результаты исследований влияния поперечного магнитного поля на оптические свойства нс разрядов можно использовать для повышения светоотдачи и управляемого изменения излучательных характеристик источников света наносекундной длительности.

Полученные в диссертации результаты важны для понимания физики процессов, протекающих в микроразрядах в полой катоде для улучшения качества и увеличения срока работы плазменных экранов.

Предложенная и исследованная в работе конструкция разрядной камеры может быть использована для изготовления источников мощных нс импульсов тока при небольших потребляемых значениях напряжения.

Личный вклад автора. Все результаты работы получены автором лично или при его определяющем участии. Анализ всего цикла работ, выводы диссертации и основные положения, выносимые на защиту, также принадлежат автору.

Апробация результатов исследования и публикации. Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены на XX Международной конференции по явлениям в ионизированных газах (Пиза (Италия) 1991), на IV, V, VI, VII, IX, X Всесоюзных конференциях по физике газового разряда (Махачкала, 1988, Омск, 1990, Казань, 1992, Самара, 1994, Рязань, 1998, 2000, 2002), на Всесоюзных конференциях по физике низкотемпературной плазмы (Минск, 1991, Петрозаводск, 1998), на XXXIII, XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII, XXXIX Международных (Звенигородских) конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород 2006, 2008, 2009, 2010, 2011), на V и VI International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology – PPPT (Minsk, 2006 и 2009), на VIII и IX Международных конференциях «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (Томск, 2007 и 2009), на Международных конференциях «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2007, 2009 и 2010); на Международной конференции «Физика высокочастотных разрядов» (Казань, 2011), на Всероссийских научных конференциях по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск, 2004, 2011), на I, II, III, IV, V и VI Всероссийских конференциях по физической электронике (Махачкала, 1999, 2001, 2003, 2006, 2008 и 2010), а также на научных семинарах ДГУ, СПбГУ, ИВТ РАН, ИОФ РАН.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 61 работах, из них 23 в журналах, рекомендованных ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения; содержит 312 страницы, включая 94 рисунков, 16 таблиц и библиографию из 296 наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, представлены предмет, цель и основные задачи исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию нового типа поперечного наносекундного разряда с протяженным полым катодом, изучению влияния профиля поверхности катода (рис. 1а, б, в) и диэлектрической границы (рис. 1г) на динамику формирования, электрические характеристики, пространственное распределение оптического излучения в промежутке и в полости катода и на закономерности изменения тока и напряжения горения наносекундного плазменно-пучкового разряда.

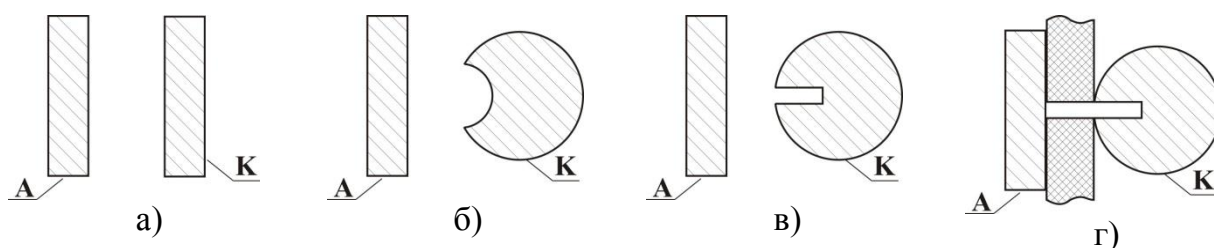


Рис. 1. Схематический вид электродной системы

Разрядная камера представляла собой кварцевую трубку диаметром 5 см и длиной 50 см, внутри которой установлена электродная система из алюминиевых электродов длиной 5 и 40 см. Расстояние между электродами - 0,6 см. Исследования проведены в инертных газах He, Ne и Ar в диапазоне изменения давлений газа 1-100 Тор и амплитуды прикладываемого к электродам напряжения 0,1-5 кВ.

Экспериментально установлено, что в зависимости от значений параметра E/N и плотности электронов n_e существуют три разные формы функционирования исследованного нс разряда, а именно: стратифицированный разряд (рис. 2а), однородный объемный разряд с пучком электронов (рис. 2б) и сильноточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц (рис. 2в). При небольших значениях напряжения горения (U_2), когда длина пробега ускоренных в области катодного падения потенциала (КПП) быстрых электронов меньше характерного размера полости (полуширина), в промежутке между электродами формируется периодическая плазменная структура. При повышении значений U_2 с появлением ускоренных электронов в промежутке плазменная структура исчезает и во всем разрядном промежутке формируется однородный объемный разряд. При повышенных значениях напряжения горения ($U_2 \geq 3$ кВ) в разрядном промежутке за счет нелинейного взаимодействия электрического поля с потоками заряженных частиц формируются области кумуляции электрического поля и заряженных частиц.

В первой главе приводятся результаты исследования однородного объемного разряда. Динамика формирования разряда исследована с помощью электронно-оптического преобразователя (ФЭР2-1) с субнаносекундным временным разрешением. Проведены оценки времени запаздывания разряда и показано, что рост проводимости на стадии формирования разряда обусловлен лавинным размножением эмитированных с поверхности катода первичных электронов. На

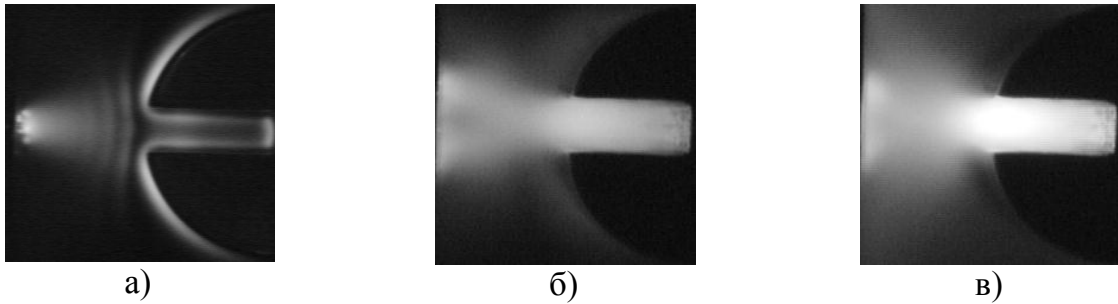


Рис. 2. Картины пространственной структуры разряда в гелии $p = 20$ Тор

основе оценок постоянной времени экранирования приложенного поля показано, что за короткие времена пространственный заряд ионов экранирует внешнее поле в большей части разрядного промежутка, что приводит к формированию катодного слоя и быстрому образованию области КПП, где происходит ускорение электронов. На основе анализа экспериментальных данных и сопоставления с результатами оценок установлены характерные закономерности формирования наносекундного разряда при различных профилях поверхности катода. Показано, что в разряде с плоским катодом идет равномерное инициирование электронов со всей поверхности катода. Эти электроны в дальнейшем за счет лавинного размножения создают ионизационный фронт, который перемещается от катода к аноду и равномерно заполняет разрядный промежуток плазмой и оптическим излучением. После достижения ионизационного фронта до поверхности анода происходит перераспределение поля и формируется структура разряда, которая в основном состоит из катодных частей. В разряде с катодом с полукруглой полостью за счет искажения силовых линий электрического поля внутри полости создается область усиленного поля. Это приводит к преимущественному инициированию электронов с внутренней поверхности полости, в результате чего появляется первое регистрируемое излучение внутри полости и создаются оптимальные условия для возбуждения и ионизации газа в полости катода. В случае щелевого катода механизм лавинного размножения первичных электронов работает только в промежутке между электродами и у выхода из щели в катоде, и первое регистрируемое излучение разряда возникает между анодом и катодом. Затем после перераспределения электрического поля между электродами за счет пространственного заряда на второй стадии наблюдается пробой между положительным пространственным зарядом и стенками полости катода. Проникновение разряда внутрь полости в результате такого механизма приводит к росту импульса тока более, чем на порядок, и при этом формируется основной импульс излучения. При высоких напряжениях на накопительном конденсаторе ГИН на второй стадии пробоя плазма дважды проникает в полость катода, что сопровождается формированием на этой стадии двух максимумов тока и

оптического излучения. Объемный разряд в гелии и неоне формируется при давлениях от 1 до 100 Тор, а в аргоне от 1 до 30 Тор.

Исследования осциллограмм разрядного тока (I_p) и U_2 для открытого и ограниченного диэлектрическими стенками разряда с щелевым катодом показали, что при одинаковых внешних условиях они существенно отличаются по форме, величине и длительности (рис.3). На осциллограмме I_p при ограничении области разряда формируется дополнительный максимум, и величина основного максимума I_p увеличивается более чем на один порядок (рис. 3б). Скорость нарастания тока при ограничении разряда достигает величины $3 \cdot 10^{10}$ А/с. Для ограниченного разряда при увеличении значений U_2 первый максимум на I_p смещается в сторону второго максимума и при $U_2 \geq 2$ кВ сливается с ним. При этом одновременно быстро увеличиваются амплитуды второго (I_2) и третьего (I_3) максимумов тока, причем третий максимум на I_p растет быстрее и при $U_2 > 4$ кВ сравнивается по амплитуде со вторым максимумом. Примерно такие же закономерности наблюдаются и в разряде в аргоне.

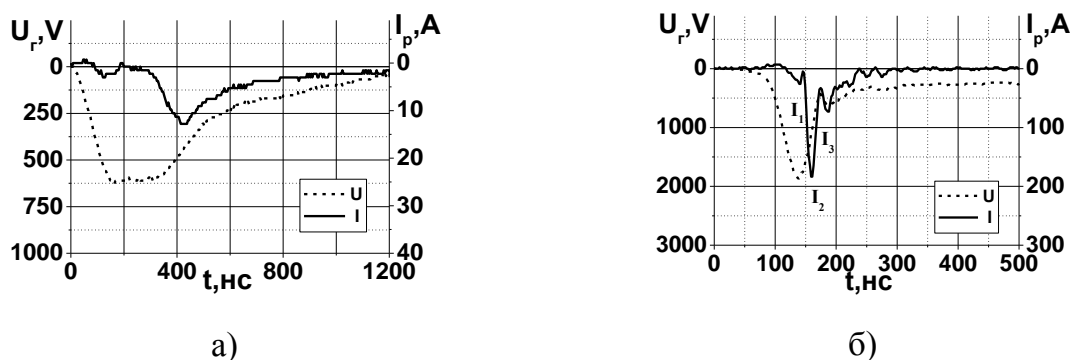


Рис. 3. Осциллограммы напряжения горения и разрядного тока открытого (а) и ограниченного диэлектрическими стенками (б) разряда в гелии $p = 10$ Тор.

На основании полученных экспериментальных результатов сделан сравнительный анализ исследованных поперечных наносекундных разрядов с тремя различными электродными системами на примере гелия с позиций соответствия их известному аномально-глюющему разряду (АТР). Установлено, что для разряда с плоскими электродами значение плотности тока на катоде (j_k) и рассчитанная плотность для эквивалентного АТР (j_a) примерно совпадают, и в этом случае разряд соответствует АТР. В случае разряда с катодом с полукруглой полостью значение j_k до трех раз больше, чем значение j_a , соответственно, и в этом случае разряд близок к АТР. В случае разряда с катодом с прямоугольной полостью значение j_k до 30 раз и в ограниченном разряде до 60 раз больше, чем значение j_a (табл.1) и разряд сильно отличается от АТР. Для этих же условий плотность тока в разрядном промежутке j почти в семь раз больше j_k . Столь существенное отличие j от j_a для разряда с щелевым катодом объясняется геометрией полости катода и связанного с ней эффектом полого катода.

Приведены результаты исследования динамики поверхностных явлений на границе плазма-диэлектрик. Измерялись диэлектрическая проницаемость и $\text{tg } \delta$ – диэлектрических потерь материала стенки разрядной камеры в зависимости от

времени и степени взаимодействия с ППР. На основе анализа экспериментальных результатов показано, что в процессе взаимодействия с электронными

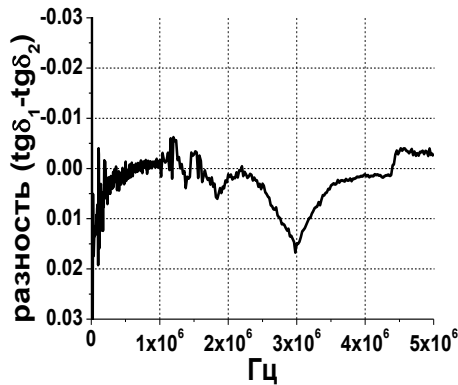


Рис. 4. Разность между значениями $\text{tg } \delta$ до и после взаимодействия образца с нс плазменно-пучковым разрядом

потоками значение $\text{tg } \delta$ сильно растет, а после прекращения воздействия электронных потоков релаксационные процессы длятся несколько десятков минут. После взаимодействия с плазменно-пучковым разрядом в диэлектрике из стеклотекстолита происходят необратимые изменения диэлектрических свойств. Установлена частотная зависимость $\text{tg } \delta$ для образца из стеклотекстолита (рис.4). Из рисунка видно, что в области низких частот и в области 3 МГц $\text{tg } \delta$ испытывает необратимые изменения. Масс-спектрометрическим методом выполнен анализ газовой выделения из стенки разрядной

камеры в результате взаимодействия с наносекундным плазменно-пучковым разрядом.

Во второй главе приведены результаты исследования механизмов эмиссии и генерации ускоренных электронов, их энергетических характеристик, режимов движения ускоренных электронов в разрядной плазме и формирования электронных пучков.

Предложен метод оценки коэффициента эмиссии электронов из катодной плазмы (γ_c) по осциллограммам при достижении импульсом тока разряда своего максимального значения из соотношения

$$\gamma_c = \frac{j_m}{j_i(0)} - 1,$$

где j_m – плотность полного тока разряда в максимуме,

$$j_i(0) = \varepsilon_0 \frac{U_k}{d_k^2} \sqrt{\frac{2e^3 U_k}{\pi m_i \sigma_{rez} d_k N}}$$

- плотность ионного тока на катоде.

В табл. 1. приведены значения γ_c для разряда с катодом с прямоугольной полостью и для сравнения рассчитанные для этих же условий значения обобщенного коэффициента эмиссии электронов с катода в результате бомбардировки катода тяжелыми частицами γ_1 , полученные с учетом зависимости σ_{rez} и сечения упругих столкновений σ_y от энергии и потерь энергии быстрых атомов в упругих столкновениях. Сравнение значений γ_c и γ_1 , показывает, что учет вкладов всех механизмов эмиссии электронов с катода в сумме дает значения γ_1 значительно меньшие, чем значения γ_c . Это указывает на то, что в разряде у выхода из щели катода формируется плотная катодная плазма, которая играет роль плазменного электрода, и полученные нами оценочные значения γ_c относятся к эмиссии электронов из катодной плазмы.

Показано, что при характерных значениях p и U_e в катодном слое исследованного поперечного наносекундного плазменно-пучкового разряда ионы движутся в столкновительном режиме, и преобладающим столкновительным процессом для ионов является резонансная перезарядка, а электроны проходят катодный слой без столкновений. Кроме того, особая конструкция разрядной камеры, использованная в работе, обуславливает и сложный профиль пространственного распределения электрического поля между электродами. Для

Таблица 1. Основные параметры разряда и ускоренных электронов в гелии

U_r , В	j_k , А/см ²	j_a , А/см ²	j_k/j_a	γ_c	γ_1	ε , эВ	Λ , см
620	0,23	0,015	15	1,5	0,7	370	0,60
1100	1,39	0,11	12	3,8	0,9	660	1,15
1400	2,50	0,25	10	4,9	1,0	810	1,40
1700	4,50	0,33	14	8,1	1,1	940	1,63
1850	3,21	0,18	18	9,0	1,1	1120	1,95
2200	7,68	0,38	20	14,1	1,3	1320	2,16
2250	8,93	0,25	36	17,7	1,3	1350	2,30
2300	8,95	0,18	50	20,5	1,4	1380	2,40

таких условий получить простое теоретическое выражение для оценки d_k не удается, поэтому из сопоставления наших экспериментальных результатов с результатами других авторов нами получены простые эмпирические соотношения $pd_k \leq 0,44 \text{ Тор} \cdot \text{см}$ для гелия и $pd_k \leq 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тор} \cdot \text{см}$ для аргона. Путем сопоставления длины свободного пробега электронов по отношению к неупругим процессам для гелия и аргона со значениями d_k показано, что для большинства исследованных условий $\lambda > d_k$, и электроны, эмитируемые с поверхности катода, проходят область КПП без столкновений и приобретают энергию $\varepsilon = eU_k$. Длины пробега этих ускоренных электронов в плазме оценены по формуле $\Lambda = (\varepsilon/\varepsilon_i)\lambda$, где ε – энергия ускоренных электронов, $\varepsilon_i = 46$ и 26 эВ – энергия образования пары ионов для гелия и аргона, соответственно. Полученные значения ε и Λ в разряде в гелии приведены в табл. 1.

Подробно обсуждаются процессы движения заряженных частиц, ионизации и формирования структуры разряда в гелии и аргоне когда $\Lambda > L$, $L > \Lambda > l$ и $\Lambda \ll l$, где $L = 0,6$ см – расстояние между электродами, $l = 0,2$ см – расстояние между боковыми поверхностями щели в катоде. В частности, для условий $\Lambda > L$ показано, что быстрые электроны свободно достигают анода. При этом ионизация происходит во всем промежутке, на катод возвращается до половины ионов, генерируемых в плазме. ФТП отсутствует, и вся светящаяся область между катодом и анодом представляет собой область ОС. В этом случае области ОС у боковых поверхностей щели перекрываются, и в полной мере проявляется эффект полого катода. Установлена связь Λ с длиной области ОС разряда и связь структуры оптического излучения и разряда с особенностями релаксации энергии ускоренных электронов.

Получены значения критерия, определяющего границу перехода от пучкового режима движения электронов к гидродинамическому (μ) на границе

катодного слоя с плазмой и у поверхности анода для различных газов и различных электродных систем. Эти оценки показывают, что для исследуемых разрядов с преобладанием ионизирующих столкновений μ имеет нелокальный характер. Сила ионизационного трения увеличивается в направлении анода, и пучковый режим движения электронов, который имеет место в катодном слое, постепенно переходит в гидродинамический режим. Этот переход в аргоне и неоне наступает раньше, чем в гелии. Пучковый режим движения электронов наиболее характерен для разряда в гелии с катодом с прямоугольной полостью. Сделаны оценки интенсивности пучка быстрых электронов и его ионизирующей способности и показано, что оптимальным для генерации электронных пучков из исследованных разрядов является открытый разряд в гелии с катодом с прямоугольной полостью, где величина тока пучка на поверхности анода достигает до 20% от величины разрядного тока.

Путем совместного численного решения неоднородного нелинейного уравнения Пуассона для распределения потенциала электрического поля с уравнением движения для электронов с учетом и без учета силы сопротивления среды в прямоугольной области $\Pi = \{0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b\}$ (a – глубина щели, b – ее ширина) при соответствующих граничных условиях рассчитаны распределения потенциала электрического поля, распределения плотности заряженных частиц и траектории движения электронов в полости катода при различных концентрациях электронов и их средней энергии. Максимальные значения амплитуды напряжения на аноде задавались исходя из экспериментально измеренных величин.

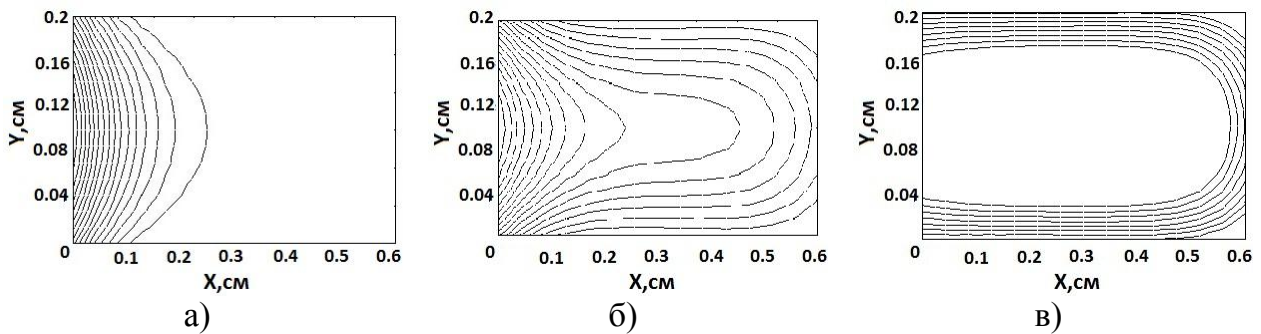


Рис. 5. Характерный вид эквипотенциальных линий в полости катода (а - $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, б - $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, в - $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) $T_e = 10^4 \text{ К}$, $\varphi_0 = 3$ ед. CGSE

Анализ этих результатов показывает, что при малых концентрациях электронов (менее 10^{12} см^{-3}) проникновение потенциала составляет менее 1/3 от глубины щели (рис. 5а). Такой режим характерен для начальных стадий формирования разряда. Далее, по мере увеличения плотности электронов, потенциал проникает вплоть до основания щели за счет распределения пространственного заряда в полости катода (рис. 5б). При плотности электронов выше $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ практически весь потенциал локализуется вдоль внутренних поверхностей полости щелевого катода (рис. 5в). Траектории движения электронов, рассчитанные с учетом силы сопротивления и без нее, существенно отличаются. В случае отсутствия учета силы сопротивления электроны, отражаясь от боковых поверхностей полости катода, совершают колебательные движения и в процессе движения фокусируются по центру полости катода. При учете силы

сопротивления среды траектории движения электронов меняются сильнее, сокращается расстояние, проходимое ими в плазме, и они выносятся полем из щели катода.

В третьей главе приводятся результаты исследования анизотропии процессов электронного возбуждения атомов с использованием методов поляризационной спектроскопии. Приведены зависимости степени линейной поляризации спонтанного излучения на различных спектральных переходах атомов от p , U_0 и времени. Поляризационные измерения спонтанного излучения поперечного наносекундного разряда со щелевым катодом выполнены в тех же условиях, при которых исследованы основные параметры разряда и заряженных частиц. Были подробно исследованы поведение интенсивностей и степени линейной поляризации излучения η спектральных линий HeI, соответствующих спектральным переходам ($4^1P - 2^1S$), ($4^1D - 2^1P$) и ($3^1P - 2^1S$). Верхние уровни выбранных спектральных линий в основном заселяются прямым электронным ударом с основного состояния, имеют заметный эффект Штарка и исследование их позволяет изучить пучковые свойства разрядной плазмы. Исследования показали, что излучение на всех указанных спектральных линиях частично поляризовано, причем степень поляризации излучения на разных линиях различна по величине.

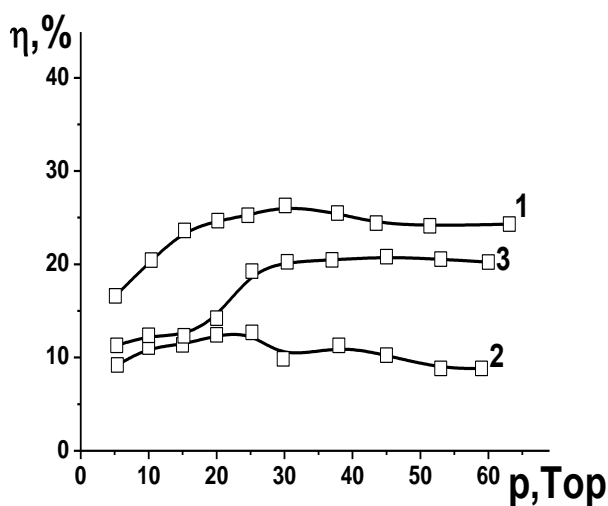


Рис. 6. Зависимости η от p при $U_0 = 3$ кВ (1 – открытый разряд $\lambda = 396,5$ нм; 2 – открытый разряд $\lambda = 501,6$ нм; 3 – ограниченный разряд $\lambda = 396,5$ нм).

На рисунке 6 приведены зависимости степени поляризации излучения от p для линии $\lambda = 501,6$ нм в открытом разряде и $\lambda = 396,5$ нм в открытом и ограниченном разрядах.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что в исследованных условиях значение η спонтанного излучения в открытом разряде на длине волны $\lambda = 396,5$ нм в среднем составляет $20 \div 25\%$, на длине волны $\lambda = 492,1$ нм составляет $2 \div 4\%$ и на длине волны $\lambda = 501,6$ нм $10 \div 12\%$, а в ограниченном разряде на указанных линиях значение η значительно меньше, чем в открытом разряде. Степень

поляризации спонтанного излучения на различных стадиях разряда отличается как по величине, так и по знаку. Кроме того, в начальных стадиях разряда степень поляризации излучения вблизи катода выше, чем вблизи анода. Далее с помощью теоретического анализа и соответствующих оценок показано, что наблюдаемая в эксперименте поляризация излучения исследованных спектральных линий связана с пучковой составляющей электронной компоненты, которая вызывает анизотропию процессов электронного возбуждения атомов в плазме наносекундного разряда с полым катодом. Поляризация излучения спектральных

линий является экспериментальным подтверждением формирования пучков ускоренных электронов в исследуемых разрядах.

В четвертой главе приводится аналитический обзор литературы, показывающий, что механизмы формирования упорядоченных структур в плазме достаточно сложны и многообразны. В этой связи наиболее оптимальным вариантом проведения исследований представляется экспериментальное определение большого количества параметров разряда и упорядоченных плазменных структур и установление, таким образом, общих закономерностей, которые могут служить исходными предпосылками для построения теоретических моделей формирования упорядоченных структур (страт).

Приводятся результаты экспериментального исследования динамики формирования и поведения регулярной периодической плазменной структуры (страт) в диапазоне изменения p (1 – 60 Тор) и амплитуды U_0 (0,1 – 1кВ). Установлены и приведены критические значения напряжения горения и разрядного тока, соответствующие верхним границам областей формирования страт в поперечных наносекундных разрядах с катодом с различной кривизной поверхности в He, Ne и Ar.

Систематизация всех полученных экспериментальных результатов показывает, что:

1. В импульсных разрядах наносекундной длительности в инертных газах при средних давлениях рабочего газа формируется периодическая плазменная структура в виде страт;
2. Слоистая структура плазменного столба во всех исследованных условиях появляется с катодной стороны и затухает к аноду. В щели катода регулярная структура не наблюдается;
3. С увеличением давления газа увеличивается коэффициент пространственного затухания страт, что приводит к уменьшению их длины, а количество страт увеличивается;
4. Периодическая плазменная структура появляется на стадии сформировавшегося разряда. С ростом давления газа в камере, атомного веса рабочего газа и значения прикладываемого к электродам напряжения длительность существования периодической структуры в разряде уменьшается.
5. 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.

Сделан анализ полученных экспериментальных результатов и установлены механизмы, а также общая картина формирования плазменной структуры в исследованных наносекундных разрядах. Из рисунка 7 видно, что в поперечном нс разряде со всеми использованными электродными системами, в том числе и с электродной системой с плоскопараллельными электродами формируется периодическая плазменная структура в виде страт. От геометрической формы поверхности катода в основном зависит форма самих страт и длина области положительного столба, занимаемая периодической структурой. Значения основных параметров разряда и плазменной структуры, соответствующие оптическим картинам (рис. 7), приведены в таблице 2. Размеры страт (l_s) определялись из оптических картин по количеству страт в разрядном промежутке и

длины области плазменного столба, занимаемого ими. Средняя приведенная напряженность электрического поля $(E/N)_p$, оценивалась по значению напряжения горения разряда в момент максимума разрядного тока. Концентрации электронов в разрядном промежутке оценивались по формуле $j/e\nu_{dr}$. Из таблицы видно, что размеры страт и концентрация заряженных частиц в плазме зависят от формы поверхности катода и особенно сильная зависимость указанных параметров наблюдается от рода рабочего газа. В аргоне продольный размер страты примерно в пять раз меньше чем в гелии, а концентрация электронов в разрядной плазме на порядок больше при одних и тех же разрядных условиях.

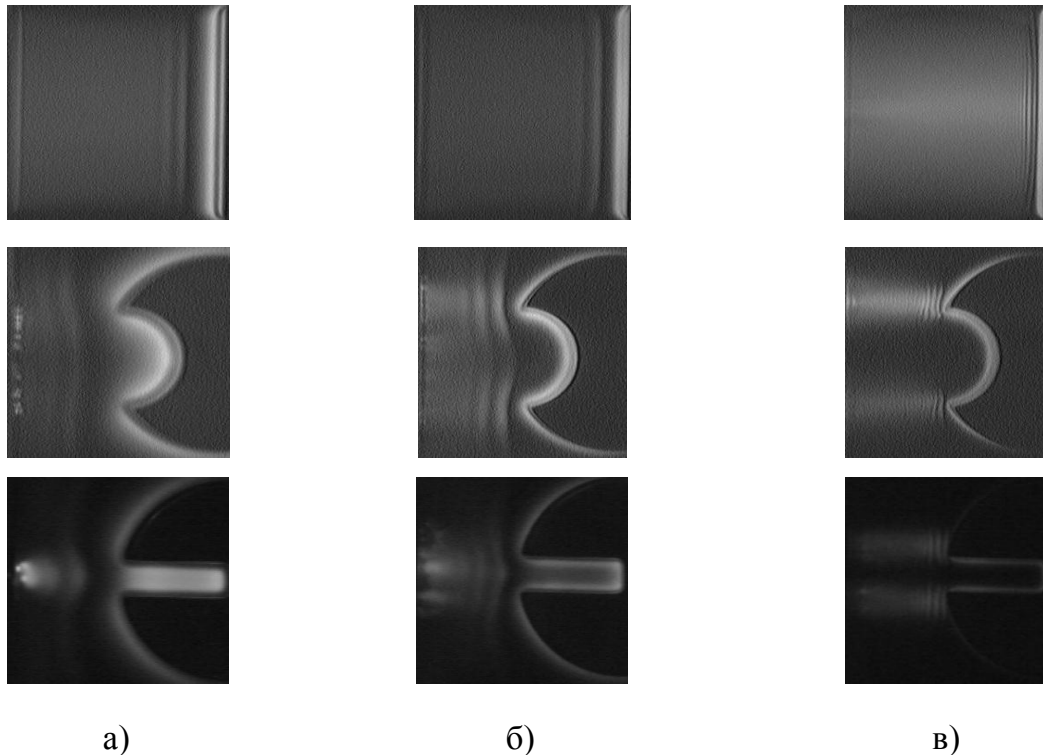


Рис. 7. Картины пространственной структуры разряда $p = 20$ Тор (а – He; б – Ne; в - Ar)

Для определения основных механизмов, участвующих в образовании страт, получены оценки для разряда в гелии, которые показывают, что в наносекундных разрядах в инертных газах с параметрами $(E/N)_p$ порядка 100 Тд и давления газа в несколько десятков Тор можно исключить влияние диффузионных процессов переноса электронов и ионов, конвективных процессов переноса ионов и изменение плотности частиц газа (N) из-за его нагрева в формировании страт. В этих условиях незначительной является роль процессов ступенчатой ионизации, а внутренние поля определяются только ионизацией прямым электронным ударом и дрейфовым переносом электронов в электрическом поле, формируемом объемным зарядом ионов, т.е. исследованные в данной работе стоячие страты являются ионизационно-дрейфовыми волнами. Во всех экспериментах при постепенном увеличении величины U_2 плазменная структура исчезает, и разряд переходит в однородную объемную форму.

При дальнейшем повышении значений напряжения ($U_2 \geq 3$ кВ) в плазменно-пучковом разряде за счет нелинейного взаимодействия электрического поля с потоками заряженных частиц формируются области кумуляции электрического поля и заряженных частиц.

Таблица 2. Параметры разряда и плазменной структуры

газ	U_2 , В	J_p , А/см ²	$(E/N)_p$, Тд	L_s , см	n_e , см ⁻³
с плоским катодом					
He	670	0,04	27	0,10	$3,6 \cdot 10^{10}$
Ne	625	0,08	25	0,08	$5,9 \cdot 10^{10}$
Ar	600	0,24	24	0,02	$6,5 \cdot 10^{11}$
с катодом с полукруглой полостью					
He	460	0,02	70	0,13	$5,9 \cdot 10^9$
Ne	410	0,06	50	0,09	$2,6 \cdot 10^{10}$
Ar	700	0,95	71	0,02	$5,0 \cdot 10^{11}$
с катодом с прямоугольной полостью					
He	580	0,13	88	0,14	$3,4 \cdot 10^{10}$
Ne	610	0,27	74	0,10	$8,1 \cdot 10^{10}$
Ar	650	1,65	66	0,03	$1,1 \cdot 10^{12}$

В качестве иллюстрации на рис. 8 представлена характерная оптическая картина пространственной структуры разряда и соответствующие ей импульсы разрядного тока и оптического излучения в гелии с катодом с прямоугольной полостью. На оптической картине видно, что у выхода из щели катода формируется яркое пятно формы эллипса с максимальной интенсивностью излучения в центре. При этом на импульсах разрядного тока и оптического излучения наблюдаются по два максимума. Максимумы на импульсе тока

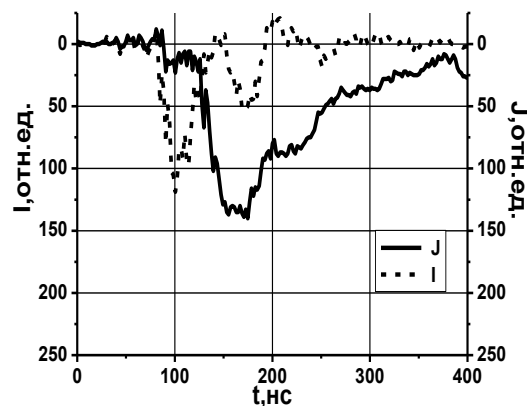
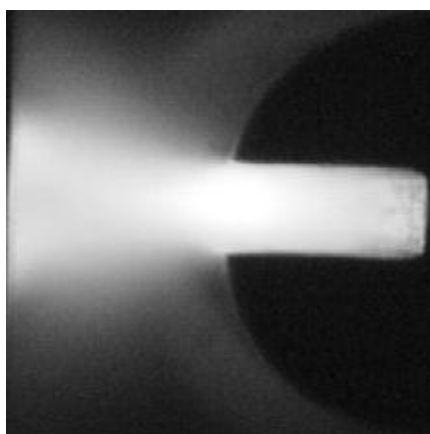


Рис. 8. Пространственное распределение интенсивности оптического излучения и характеристики разряда $p = 10$ Тор, $U_0 = 3$ кВ

полностью разделены, величина первого максимума в два раза больше второго, и при общей длительности импульса тока 100 нс второй максимум формируется примерно через 70 нс после первого максимума. На импульсе излучения второй максимум также образуется через 70 нс после первого максимума, и оба максимума на импульсе излучения с задержкой примерно 50 нс повторяют максимумы тока. Эти закономерности показывают, что максимумы на импульсе излучения разряда связаны с максимумами тока. Сопоставление импульсов тока и излучения с оптической картиной разряда показывает, что длительность и форма импульсов тока и излучения определяются динамикой формирования структуры разряда, которая существенным образом влияет на перенос тока в разрядном промежутке. Из-за вытягивания плазменных электронов внешним полем и дрейфового ухода быстрых электронов в поперечном направлении электроны быстро покидают область повышенной ионизации, что приводит к появлению области нескомпенсированного положительного заряда у выхода из щели катода со стороны разрядного промежутка. В дальнейшем эта область положительного заряда начинает играть роль виртуального анода и замыкает на себя ток свободных электронов, что приводит к ограничению тока между электродами.

Для проверки описанной качественной картины использована система уравнений для начальных стадий развития разряда

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial(n_e v_{ex})}{\partial x} + \frac{\partial(n_e v_{ey})}{\partial y} &= \nu_i(E)n_e \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial(n_i v_{ix})}{\partial x} + \frac{\partial(n_i v_{iy})}{\partial y} &= \nu_i(E)n_e \\ \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} &= 4\pi e(n_i - n_e) \end{aligned}$$

где $v_{ex} = \mu_e E_x$, $v_{ey} = \mu_e E_y$, $v_{ix} = \mu_i E_x$, $v_{iy} = \mu_i E_y$, $E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$, $E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$, μ_e , μ_i – подвижности электронов и ионов, φ – потенциал на аноде, ν_i – частота ионизации атомов электронным ударом.

Решение системы производилось в среде MathCAD Professional для прямоугольной области. Были рассчитаны распределения электронов, ионов и электрического поля в промежутке исследуемого плазменно-пучкового разряда наносекундной длительности при различных начальных и граничных условиях. Характерные результаты расчетов распределения параметров разряда между электродами при начальном потенциале – 0,8 ед. СГСЕ и давлении 10 Тор приведены на рис. 9 и 10. Из расчетов видно, 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.

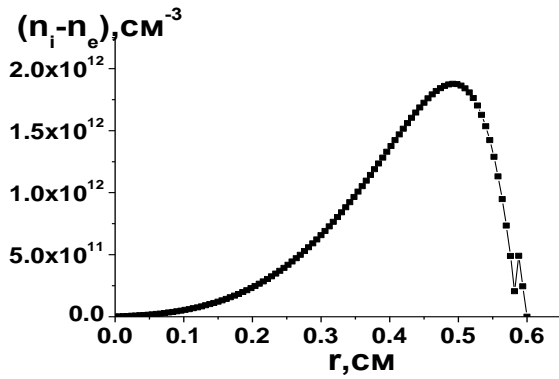


Рис. 9. Характерное распределение плотности заряда ($n_i - n_e$) между электродами

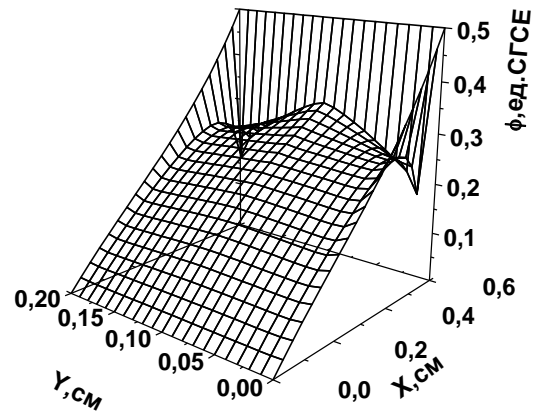


Рис. 10. Распределение потенциала между электродами при начальной концентрации $n_e = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

В пятой главе исследуется влияние внешнего поперечного магнитного поля на электрические, оптические, спектральные характеристики и структуру поперечного наносекундного разряда с полым катодом. В начале главы приведен небольшой обзор работ показывающий, что в литературе практически отсутствуют работы по исследованию влияния внешнего магнитного поля на характеристики наносекундного разряда с полым катодом.

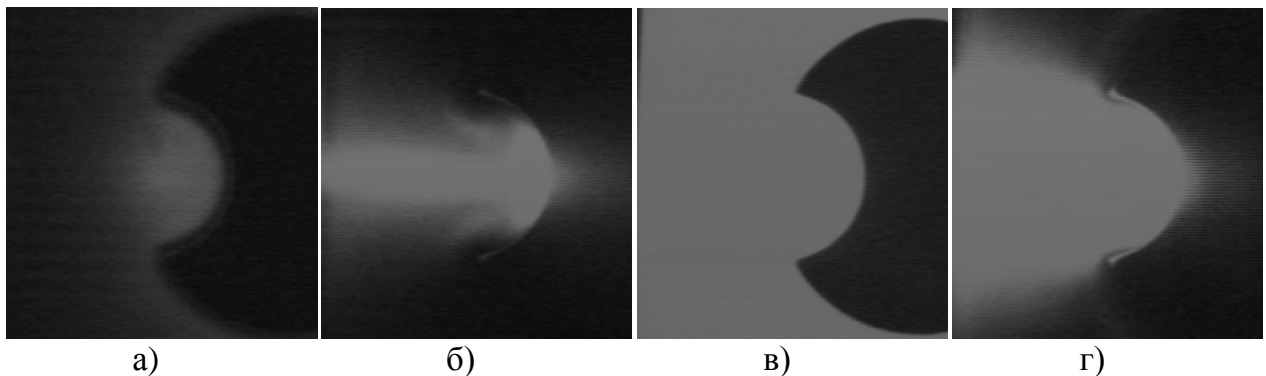


Рис. 11. Пространственная структура разряда
 а - $p = 10 \text{ Тор}$; $U_0 = 1 \text{ кВ}$; $H = 0$; б - $p = 10 \text{ Тор}$; $U_0 = 1 \text{ кВ}$; $H = 1800 \text{ Э}$;
 в - $p = 60 \text{ Тор}$; $U_0 = 3 \text{ кВ}$; $H = 0$; г - $p = 60 \text{ Тор}$; $U_0 = 3 \text{ кВ}$; $H = 1800 \text{ Э}$

Получены экспериментальные результаты, показывающие, что при наложении на разрядный промежуток постоянного поперечного магнитного поля происходит стягивание разрядной области к центру разрядного промежутка и формирование плотного плазменного столба, то есть уменьшение размеров плазменной области вдоль приложенного магнитного поля (рис.11). Причем при постоянном давлении в магнитном поле с увеличением величины U_0 влияние магнитного поля на разряд увеличивается. Наложение магнитного поля приводит к уменьшению напряжения горения и многократному увеличению разрядного тока.

Кроме того, магнитное поле меняет характер поведения зависимостей амплитудных значений напряжения горения (U_m) и разрядного тока (I_m) от давления газа в разряде. Если без магнитного поля в разряде при увеличении p происходит уменьшение значений U_m и увеличение значений I_m , а в разряде в магнитном поле наблюдается обратная картина, увеличение давления приводит к увеличению значений U_m и уменьшению значений I_m . Интересно отметить, что изменение поперечных размеров и электрических характеристик разряда при наложении магнитного поля наблюдается и при $\omega^2 \tau^2 \ll 1$.

На основе анализа решения уравнения движения плазмы в магнитном поле показано, что наблюдаемые на эксперименте в магнитном поле изменения поперечных размеров разряда объясняются соотношением газокINETического и магнитного давления. Многократное увеличение плотности тока в магнитном поле связано с существенным увеличением частоты ионизации за счет замедления движения ускоренных электронов через катодный слой в магнитном поле и возвращением большинства ионов на поверхность катода.

Результаты измерений интенсивности оптического излучения из центра разрядного промежутка показывают, что с ростом величины p влияние магнитного поля на интенсивность оптического излучения падает (рис. 12).

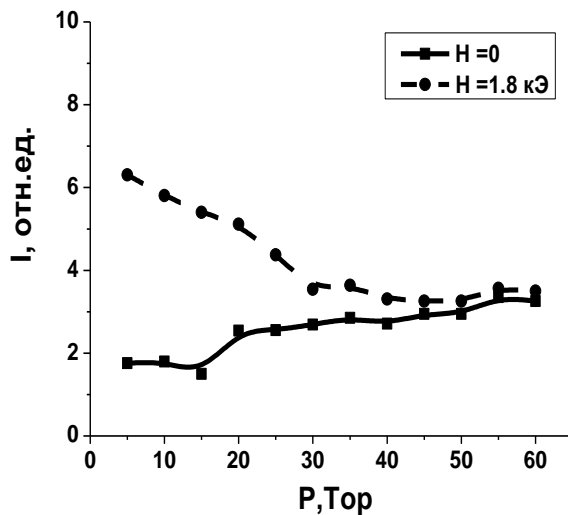


Рис. 12. Зависимости интегральной по спектру интенсивности излучения разряда от давления при $U_0 = 1$ кВ

поле и без него показывает, что наложение магнитного поля приводит к увеличению интенсивности излучения спектральных линий, расположенных в коротковолновой области спектра, примерно в пять раз и, наоборот, к уменьшению в два раза интенсивности излучения спектральных линий, расположенных в длинноволновой области (рис.13). Таким образом, наложение магнитного поля на разряд приводит к смещению максимума излучения в коротковолновую область спектра излучения разряда. При увеличении значений p влияние магнитного поля на интенсивности излучения спектральных линий заметно уменьшается. Уже при $p \geq 50$ Тор магнитное поле практически не влияет

Подробное исследование интенсивностей излучения спектральных линий HeI в магнитном поле и без него показало, что величины амплитуд максимумов импульсов излучения на разных спектральных линиях при наложении магнитного поля ведут себя по-разному. Во всех исследованных условиях наложение магнитного поля приводило к росту интенсивности излучения в поздних стадиях разряда. Сопоставление панорамных спектров излучения атомов гелия в разряде в магнитном

на распределение интенсивностей в панорамном спектре излучения разрядной плазмы.

Далее показано, что поперечное магнитное поле уменьшает дрейфовую скорость электронов, что приводит к увеличению времени пребывания электронов в полости катода в области усиленного электрического поля, росту числа ионизаций и излучательной способности плазмы.

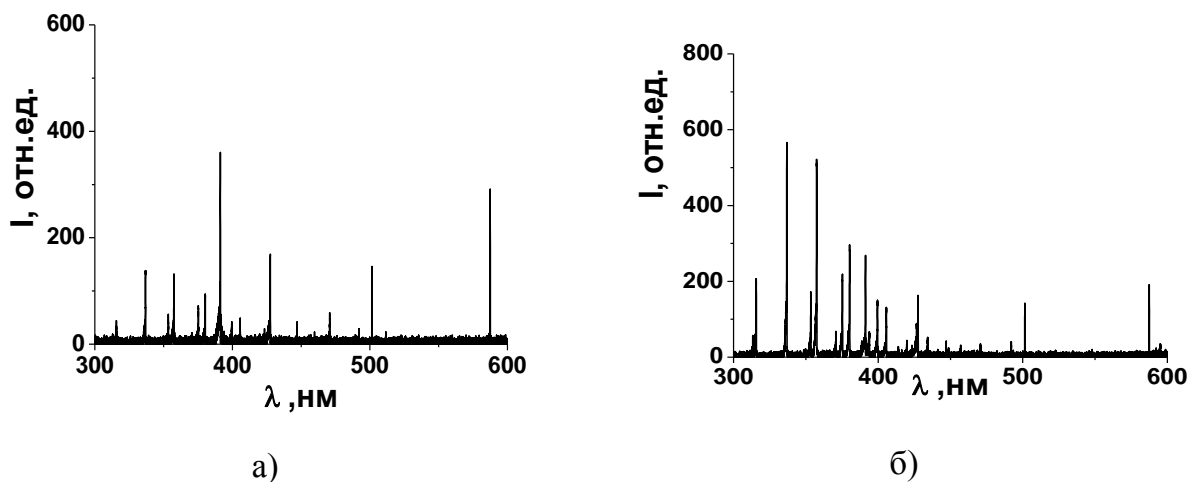


Рис. 13. Панорамный спектр излучения разряда в гелии. $p = 10 \text{ Тор}$, $U_0 = 2 \text{ кВ}$ (а – $H = 0$; б – $H = 1,8 \text{ кЭ}$)

Детально исследовано влияние магнитного поля на процесс формирования упорядоченных плазменных структур в поперечных нс разрядах с полым катодом в He, Ne и Ar. Систематизация экспериментальных результатов показывает, что при всех исследованных условиях наложение поперечного магнитного поля приводит к уменьшению длины страт, одновременному увеличению области, занимаемой плазменной структурой, и увеличению количества страт в промежутке, увеличению длительности существования плазменной структуры в разряде и расширению границ формирования плазменной структуры по давлению газа.

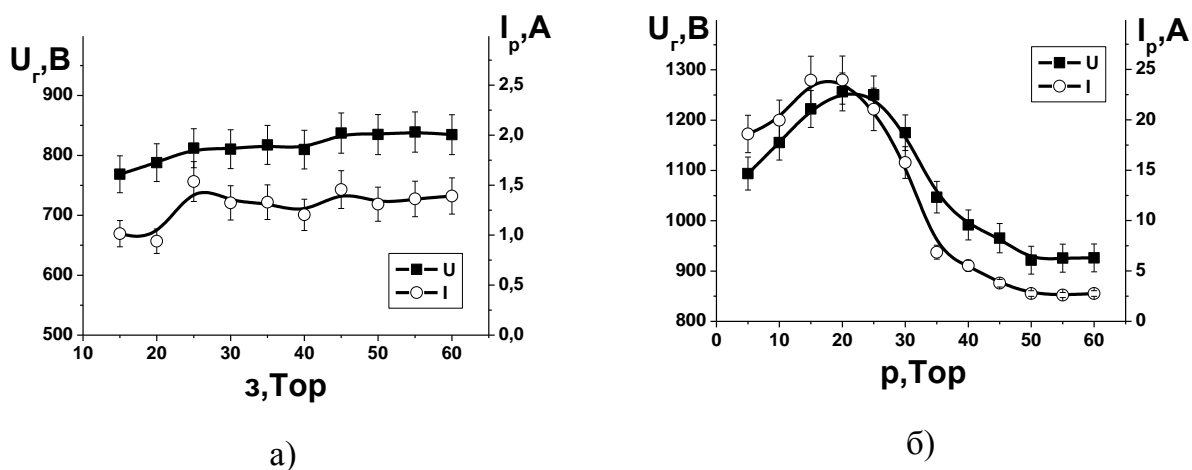


Рис. 14. Критические значения напряжения горения и тока разряда, при которых исчезает плазменная структура в разряде в He: а – $H = 0$; в - $H = 1,8 \text{ кЭ}$

Исследование зависимости критических значений напряжения горения и тока разряда, соответствующих верхней границе существования плазменной структуры, от давления газа в разрядной камере показало, что наложение постоянного магнитного поля на разряд с катодом с прямоугольной полостью в гелии приводит к расширению верхней границы области формирования периодической плазменной структуры по напряжению горения и, особенно по току разряда и существенному изменению характера поведения критических значений в исследованном диапазоне давлений газа (рис.14).

Шестая глава посвящена исследованию концентраций метастабильных атомов гелия и неона в разрядной плазме в магнитном поле и без него, анализу кинетики возбужденных атомов в нс разрядах с полым катодом и обсуждению результатов исследования оптических эффектов с участием метастабильных атомов в этих разрядах.

Описаны использованные в работе экспериментальная установка и метод лазерной абсорбционной спектроскопии с наносекундным временным разрешением. Приведены результаты расчетов зависимости полного поглощения A от оптической толщины $\chi_0 l$ без магнитного поля и в магнитном поле с учетом тонкой структуры и эффекта Зеемана для спектральных переходов $\text{HeI}(3^3\text{P} - 2^3\text{S})$ и $\text{HeI}(3^1\text{P} - 2^1\text{S})$. Далее приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие, что концентрация возбужденных атомов на уровне 2^3S атомов гелия в магнитном поле и без него на порядок больше, чем на уровне 2^1S . Наложение поперечного магнитного поля $H = 1,8$ кЭ приводит к одновременному уменьшению концентрации возбужденных атомов на уровнях 2^1S и 2^3S . Также полученные результаты показывают, что максимумы концентрации возбужденных атомов $\text{He}(2^3\text{S})$ и $\text{Ne}(3s^3\text{P}_1)$ достигаются примерно при одинаковых разрядных условиях и составляют в максимуме величину порядка $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что сопоставимо с плотностью электронов в разряде.

Рассмотрена кинетика заселения возбужденных состояний атомов на примере наносекундного разряда в смеси гелия и при этом учтено большое число элементарных процессов с участием как заряженных, так и нейтральных частиц и фотонов. С учетом перечисленных процессов получена система уравнений для плотности электронов N_e , плотности возбужденных атомов гелия N_1 с $n = 2$, плотности возбужденных атомов гелия N_2 с $n = 3,4$ и средней энергии электронов T_e . Полученная система из дифференциальных уравнений баланса решена методом Рунге-Кутты 4-го порядка, и рассчитаны заселенности N_k и времена релаксации средней энергии электронов T_e при различных начальных условиях. Результаты расчетов показали, что на заднем фронте импульса тока нс разряда с полым катодом формируется второй максимум заселенностей возбужденных состояний атомов HeI с $n = 3,4$, связанный с быстрой релаксацией средней энергии электронов и, как следствие, перераспределением заселенностей уровней, расположенных в районе «узкого места». В последующем, в раннем послесвечении, основным механизмом заселения возбужденных состояний HeI с $n = 3,4$ является диссоциативная рекомбинация ионов He_2^+ с электронами.

Представлены результаты экспериментального исследования эффектов взаимодействия излучения широкополосного лазера на красителе со структурой

поперечного нс разряда и дан анализ возможных механизмов искажение контура спектральной линии поглощения на длине волны 650,6 нм атома неона.

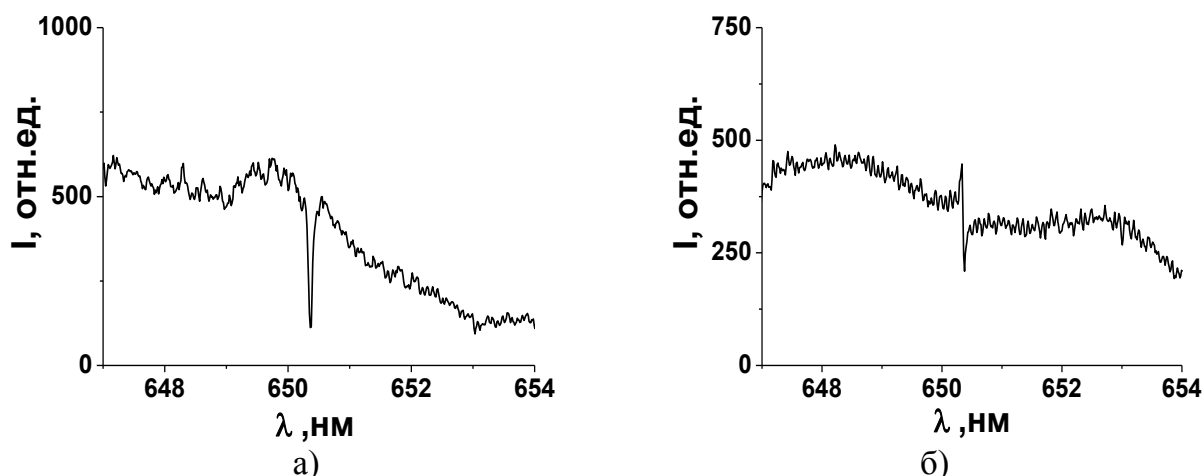


Рис. 15. Спектр поглощения в разряде в неоне при $p = 10$ Тор, $U_0 = 1,5$ кВ, $t = 220$ нс (а - лазерное излучение распространяется параллельно поверхности полости, б - лазерное излучение распространяется под углом к внутренней поверхности полости)

Экспериментально показано, что при распространении широкополосного лазерного излучения в неоднородной плазме внутри прямоугольной полости катода наблюдается контур спектральной линии поглощения вида кривой аномальной дисперсии (рис. 14б). Выполнены детальные исследования данного эффекта в зависимости от условий в разряде. Систематизация результатов этих экспериментов позволила установить, что данный эффект наблюдается при превышении плотности поглощающих атомов определенной критической величины, причем максимум эффекта искажения контура спектральной линии поглощения приходится на максимум плотности поглощающих атомов. Проанализированы механизмы появления данного эффекта в неоднородной плазме вблизи узкой спектральной линии поглощения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обобщены результаты многолетних исследований предложенного в данной работе нового типа поперечного наносекундного разряда с протяженным полым катодом, позволяющего генерировать ленточные пучки ускоренных электронов с энергией в несколько кэВ и мощные наносекундные импульсы тока с амплитудой до 1 кА при относительно небольших значениях прикладываемых к электродам напряжений. В процессе работы над темой впервые в единых условиях эксперимента исследованы вопросы общего характера (формирование электрических, оптических, спектральных, поляризационных характеристик и пространственной структуры разряда), специфические эффекты (формирование упорядоченных плазменных структур, пучков ускоренных электронов, областей кумуляции электрического поля и заряженных частиц) и лазерно-индуцированные эффекты с участием метастабильных атомов.

При этом получены следующие основные результаты:

1. Впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования основных характеристик и пространственной структуры поперечных нс разрядов в гелии, неоне и аргоне в зависимости от амплитуды прикладываемого напряжения, давления газа, формы профиля полости в катоде и диэлектрической границы, ограничивающей область разряда в магнитном поле и без него. Установлено, что в зависимости от значений параметра E/N и плотности электронов n_e существуют три разные формы функционирования исследованного наносекундного разряда, а именно: стратифицированный разряд, однородный объемный разряд с пучком электронов и сильноточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц.
2. Впервые исследовано влияние формы поверхности катода на динамику развития и основные характеристики разряда и установлено, что разряд с катодом с прямоугольной полостью по своим характеристикам сильно отличается от аномально тлеющего разряда, и что это отличие обусловлено геометрией разрядного промежутка и связанного с ней эффектом полого катода. Установлено, что при ограничении разряда диэлектрическими стенками скорость нарастания тока достигает $3 \cdot 10^{10}$ А/с, и величина импульса тока возрастает более чем на порядок.
3. Предложен и реализован метод оценки значения коэффициента электронной эмиссии γ_c по осциллограммам напряжения горения и разрядного тока. Получены высокие значения γ_c показывающие, что в разряде с полым катодом эмиссия электронов происходит из плотной катодной плазмы, которая играет роль плазменного электрода. Установлено, что в гелии и аргоне γ_c имеет максимальные значения для разряда с прямоугольной полостью, ограниченного диэлектрическими стенками.
4. Методами поляризационной спектроскопии экспериментально установлено, что в исследуемом разрядном устройстве формируются пучки ускоренных электронов. Показано, что оптимальным для генерации электронных пучков является открытый разряд с катодом с прямоугольной щелевой полостью, где величина тока пучка на поверхности анода достигает до 20% от величины разрядного тока.
5. Исследована кинетика процессов релаксации энергии ускоренных электронов и показано, что характер релаксации их энергии существенно влияет на динамику развития, структуру и оптические свойства плазменно-пучкового разряда.
6. Рассчитаны распределения потенциала электрического поля в полости катода с учетом пространственного заряда. Показано, что проникновение электрического потенциала вглубь полости катода обусловлено исключительно накоплением пространственного заряда. Электроны, эмитированные с поверхности катода, при прохождении катодного слоя ускоряются и совершают колебательные движения внутри полости катода, и при определенных условиях возможна фокусировка части ускоренных электронов по центру полости щелевого катода.
7. Впервые обнаружено и экспериментально исследовано формирование периодической плазменной структуры в наносекундных разрядах в инертных

газах с катодами с различной кривизной поверхности. Определены основные параметры страт и верхние границы области формирования страт по напряжению горения и разрядному току. Установлено, что плазменная структура образуется на стадии сформировавшегося разряда; длительность ее существования составляет от 50 нс до 1 мкс и зависит от давления газа в разрядной камере и величины прикладываемого напряжения. Показано, что в исследованных условиях механизм формирования наблюдаемой периодической плазменной структуры имеет ионизационно-дрейфовую природу.

8. Обнаружено, что при высоких значениях прикладываемого напряжения при наносекундном пробое газа у выхода из полости катода формируется область нескомпенсированного положительного заряда, которая играет роль виртуального анода и замыкает на себя ток свободных электронов. Путем численного моделирования показано, что образование локальной области усиленного электрического поля наблюдается при неоднородном характере процессов продольного и поперечного дрейфа электронов и ионов из-за различных инерционных свойств заряженных частиц.
9. Впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования влияния внешнего поперечного магнитного поля на электрокинетические, оптические, спектральные характеристики и структуру поперечных наносекундных разрядов с различными профилями поверхности катода в диапазоне давлений газа 1- 60 Тор. Установлено, что наложение постоянного магнитного поля на разряд приводит к уменьшению длины страт, увеличению их количества в промежутке, существенному расширению верхней границы области формирования периодической структуры по напряжению горения и, особенно, по току разряда и увеличению длительности существования структуры в разряде.
10. Впервые выполнены детальные исследования концентраций возбужденных атомов инертных газов в наносекундных разрядах с полым катодом в магнитном поле и без него. Показано, что в процессе наносекундного пробоя газа формирование группы высокоэнергетичных электронов приводит к образованию возбужденных, в том числе метастабильных, атомов, по плотности сопоставимых с плотностью свободных электронов разряда. При этом основным механизмом образования и разрушения метастабильных атомов в начальных стадиях наносекундного разряда с полым катодом является конкуренция между процессами прямого возбуждения атомов электронным ударом и ступенчатой ионизацией с этих уровней. Установлено, что на заднем фронте импульса тока формируется второй максимум заселенностей возбужденных состояний атомов, связанный с быстрой релаксацией средней энергией электронов и, как следствие, перераспределением заселенностей уровней, расположенных в районе «узкого места».
11. Впервые при исследовании процессов взаимодействия широкополосного лазерного излучения с плазмой поперечного нс разряда со щелевым катодом в неоне обнаружено и исследовано формирование контура поглощения вида аномальной дисперсии вблизи длины волны $\lambda = 650,6$ нм. Установлено, что

максимум эффекта искажения контура спектральной линии поглощения во времени приходится на максимум плотности поглощающих атомов.

12. Исследована динамика изменения диэлектрических свойств материала стенки разрядной камеры в зависимости от времени нахождения образца в вакууме, температуры, дозы УФ облучения, электронного потока и комбинированного воздействия всех указанных факторов. Установлена частотная зависимость $\text{tg } \delta$ - диэлектрических потерь для образца из стеклотекстолита. Установлено, что в области низких частот и при частотах вблизи 3 МГц $\text{tg } \delta$ - диэлектрических потерь испытывает необратимые изменения.

Список основных публикаций по теме диссертации (Издания из списка ВАК выделены жирным шрифтом)

1. Исследование импульсного поперечного разряда не длительности в полом катоде в He и в смеси He – Ar / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О. А. Омаров // В сб.: Материалы 4 Всесоюзной конференции по ФГР. Махачкала, 1988. Ч. 2. С. 75 – 76.
2. Формирование нелокальной ФРЭЭ в разрядной плазме молекулярных газов / Н.А. Горбунов, А.А. Кудрявцев, К.О. Иминов // **ЖТФ**. 1988. Т. 58. № 12. С. 2301 – 2309.
3. Усиление света на $3^3\text{D}-2^3\text{P}$ переходе атома гелия в разряде смеси гелий-аргон / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов // **Оптика и спектр**. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 48 – 51.
4. Development kinetics of ions fronts and their impact on ns discharge optic characteristics / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, O.A. Omarov, N.O. Omarova, K.T. Taibov // In: Prosp. 20 Int. Conf. on Phen. In Ionis. Gases. Pisa, Italy, 1991. P. 540 – 541.
5. Релаксация возбуждения в ns разряде в гелии в условиях волнового пробоя / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Н.О. Омарова, К.Т. Таилов // В кн.: Материалы 8 Всесоюзной конференции по ФНП. Минск, 1991. С. 56 – 57.
6. Влияние быстрых электронов на релаксацию возбуждения в продольном ns разряде в гелии / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Н.О. Омарова // В кн.: Материалы 6 Всесоюзной конференции по ФГР. Казань, 1992. С. 112 – 113.
7. Разработка лазерно-спектроскопических методов диагностики пробойной стадии развития плазмы импульсных сильноточных разрядов / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов // В сб.: Лазерная физика. Санкт – Петербург, 1994. Вып. 9. С. 35.
8. Кинетика продольных газовых разрядов с жесткой составляющей электронной компоненты / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таилов // Вестник ДГУ. 1995. № 1. С. 112 – 126.
9. Динамика развития поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров // Вестник ДГУ. 1996. Вып. 1. С. 7 – 13.
10. Динамика формирования оптического излучения наносекундного разряда / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Н.О. Омарова // В сб.: Материалы II Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям. Минск, 1997. С. 32 – 35.

11. Роль поверхностных явлений в процессе формирования ускоренных электронов в объемном разряде в коротких межэлектродных промежутках / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов// В сб.: Материалы II Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям. Минск, 1997, с. 52 – 54.
12. Влияние поперечного магнитного поля на кинетические коэффициенты в плазме нс разряда в гелии / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов // Вестник ДГУ. 1997. Вып. 1. С. 5 – 9.
13. Ионизационная релаксация поперечного нс разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3. С. 368 – 373.
14. Динамика оптического излучения поперечного нс разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров // Оптика и спектр. 1998. Т. 84. № 4. С. 556 – 562.
15. Кинетика возбужденных атомов в плазме поперечного нс разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов // Вестник ДГУ. 1998. С. 49 – 54.
16. Кинетика возбуждения атомов в нс разряде в поперечном магнитном поле / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов // В сб.: Плазма XX век. Петрозаводск. 1998. С. 139 – 141.
17. Влияние поперечного магнитного поля на заселенности метастабильных состояний атомов гелия в нс разряде / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов// В сб.: Материалы IX конференции по ФГР. Рязань. 1998. С. 36 – 37.
18. Population mechanism of the excited states of helium atoms at a hollow cathode in He-Ar mixture nanosecond discharge / El-Koramy, N.A. Ashurbecov, K.O. Iminov // **Jap. J. Appl. Phys. Pt.1.** 1998. V. 37. № 6A. P. 3546 – 3549.
19. Влияние поперечного магнитного поля на заселенности метастабильных состояний атомов гелия в наносекундном разряде / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров, К.Т. Таибов // **Известия РАН. Сер. физ.** 2000. Т. 64. № 7. С.1355 – 1362.
20. Численное моделирование распределения электрического потенциала в газовом разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, В.С. Виричуева, К.О. Иминов, О.А. Омаров// Вестник ДГУ. Махачкала, 2001. Вып.1. С. 5 – 9.
21. The Excited Atom's Kinetics in the Plasma of Transversal Nanosecond Discharge with Slot-hole Cathode / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov // **Int. J. Modern Phys. B.** 2002. Vol. 16. № 26. P. 3993 – 4001.
22. Режимы формирования поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом/ Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А. Омаров// Вестник ДГУ. 2002. Вып.1. С. 14 – 20.
23. Численное моделирование распределения электрического потенциала в поперечном газовом разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, В.С. Виричуева, К.О. Иминов, О.А. Омаров//В сб.: Материалы XI конференции по ФГР. Рязань, 2002. С.54–55.

24. Пространственное распределение параметров плазмы внутри полости катода в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, В.С. Виричуева, К.О. Иминов, О.А. Омаров // **Известия РАН, серия физическая**. 2003. Т. 67. № 9. С. 1307 – 1311.
25. Динамика развития поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.А. Омаров // Вестник ДГУ. Естественные науки. Спец. выпуск, посвященный 60-летию кафедры общей физики. Махачкала. 2005. С.97–101.
26. Динамика формирования поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом в инертных газах / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С.Кобзева // В сб: Материалы XXXIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. 2006. <http://plasma.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIII/T.html#SekcijaT>
27. Роль быстрых электронов в кинетике оптического излучения в плазменно-пучковом разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев, О.А. Омаров // **Известия ВУЗов Сев.-Кав. Региона**. Естественные науки. № 3. 2006. С. 16 – 19.
28. On the mechanism of development of plasma-beam discharge with the slot-hole cathode / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, V.S. Kobzeva, O.V. Kobzev //V International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology”. Minsk, Belarus. 2006. Vol. 1. P. 128 – 131.
29. Оптические свойства импульсно-периодических высоковольтных наносекундных разрядов плазменно-пучкового типа / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.А.Омаров, Н.О. Омарова // В сб.: Материалы IV Всероссийской конференции по физической электронике ФЭ-2006. Махачкала. 2006. С.8–9.
30. Формирование ускоренных электронов и их влияние на структуру наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **ТВТ**. 2007. Т. 45. № 3. С. 485 – 491.
31. О роли высокоэнергетичных электронов в формировании структуры плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **Письма в ЖТФ**. 2007. Т. 33. Вып. 12. С. 47 – 54.
32. Режимы формирования оптического излучения наносекундного плазменно-пучкового разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // VIII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул». Томск. 10-14 сентября 2007. <http://symp.iao.ru/ru/ampl/08/sess/>
33. Эмиссия электронов с поверхности щелевого катода в поперечном наносекундном разряде гелии / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // В сб.: «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2007. С. 549 – 552.
34. Электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с щелевым катодом, ограниченного диэлектрическими стенками / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **Письма в ЖТФ**. 2008. Т. 34. Вып. 1. С. 17 – 25.

35. Поляризация состояний атомов гелия в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // 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>
36. Особенности пространственно-временного формирования наносекундного разряда с щелевым катодом в аргоне / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // В сб.: Материалы V Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2008. С. 77 – 81.
37. Роль поверхностных явлений при формировании наносекундных высоковольтных разрядов / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, К.Т. Таилов // **Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки.** 2009. № 2. С. 29 – 31.
38. Режимы формирования оптических свойств наносекундного разряда среднего давления с щелевым катодом в аргоне / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **Известия вузов. Физика.** Томск. 2009. № 4. С. 89 – 94.
39. Особенности механизмов формирования открытого и ограниченного поперечного наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **ТВТ.** 2009. Т. 47. № 3. С. 338 – 343.
40. Исследование структуры плазмы в щели катода поперечного наносекундного разряда в аргоне / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // 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>
41. Поперечный наносекундный разряд с щелевым катодом при средних давлениях рабочего газа / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // IX Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» AMPL-2009. (14-18 сентября) Томск. 2009. <http://symp.iao.ru/ru/ampl/09/auxinfo>
42. The Impact of Transversal Magnetic Field On the Spatial Structure of Nanosecond Discharge With Slot Cathode / N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, O.V. Kobzev, V.S. Kobzeva // VI International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT – 6) September 28 – October 2, 2009. Minsk, Belarus. Vol. 1. P. 241 – 244.
43. Исследование влияния поперечного магнитного поля на спектральные характеристики наносекундного разряда / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Курбанисмаилов, К.Т. Таилов // В сб.: «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2009. С. 518 – 521.
44. Поляризация состояний атомов гелия в наносекундном разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **ТВТ.** 2010. Т. 48. № 2. С. 163 – 168.
45. Формирование высокоэнергетичных электронов в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом при средних давлениях

- рабочего газа / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева // **ЖТФ**. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63 – 70.
46. Периодические плазменные структуры в наносекундном разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева // **Письма в ЖТФ**. 2010. Т. 36. Вып. 16. С. 62 – 69.
47. Исследование влияния поперечного магнитного поля на интенсивности излучения спектральных линий атомов гелия в плазме наносекундного разряда / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, К.Т. Таибов // **Вестник ДГУ. Естественные науки**. 2010. Вып. 6. С. 42 – 50.
48. Исследование структуры наносекундного разряда с щелевым катодом в гелии / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев // 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#SekcijaP>
49. Оптика высоковольтных наносекундных электрических разрядов в инертных газах / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев, Г.Ш. Шахсинов, А.Р. Рамазанов // В сб.: Материалы VI Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2010. С. 37 – 39.
50. Влияние поперечного магнитного поля на электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с полым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева, Р.Г. Турциев // В сб.: Материалы VI Всероссийской конференции «Физическая электроника». Махачкала. 2010. С. 85 – 87.
51. Страты в плазме наносекундного разряда с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева // В сб.: Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2010. С.563 - 566.
52. Влияние профиля поверхности катода на электрические характеристики высоковольтных наносекундных разрядов / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева // В сб.: Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Махачкала. 2010. С. 560 – 562.
53. Исследование влияния профиля поверхности катода на электрокинетические и оптические характеристики высоковольтного наносекундного разряда / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева, Г.Ш. Шахсинов // **Вестник ДГУ. Естественные науки**. 2011. Вып. 1. С. 5 – 13.
54. Экспериментальное исследование влияния поперечного магнитного поля на электрические и оптические характеристики наносекундного разряда с полым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, Г.Ш. Шахсинов // **Изв. Вузов. Северо-Кавказский регион**. Естественные науки. 2011. № 6.
55. Влияние профиля поверхности катода на электрические и оптические характеристики высоковольтного наносекундного разряда / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев, В.С. Кобзева // 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#Sekcija P>

56. Исследование формирования слоев пространственного заряда в наносекундных разрядах / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, О.В. Кобзев. // В сб.: Материалы Международной конференции «Физика высокочастотных разрядов» 5 – 8 апреля 2011 года. Казань, КГТУ. 2011. С. 130.
57. Взаимодействие широкополосного лазерного излучения с неоднородной плазмой наносекундного разряда в плазменном волноводе вблизи спектральной линии поглощения / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, А.Р. Рамазанов // В сб.: Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП – 2011. (21 – 27 июня 2011 г.). Петрозаводск.
58. Особенности структуры и переноса тока в наносекундных разрядах с щелевым катодом при повышенных напряжениях / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // В сб.: Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП – 2011. (21 – 27 июня 2011 г.). Петрозаводск.
59. Эффекты взаимодействия наносекундного плазменно-пучкового разряда с диэлектрическими стенками разрядной камеры / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, А.Р. Рамазанов // **Вестник ДГУ. Естественные науки.** 2011. Вып. 6. С. 5-10.
60. Особенности распространения широкополосного лазерного излучения в неоднородной плазме вблизи узкой спектральной линии поглощения / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, Г.Ш. Шахсинов, А.Р. Рамазанов // **Вестник ДГУ. Естественные науки.** 2011. Вып. 6. С.11-15.
61. Исследование процессов формирования периодической плазменной структуры в поперечном наносекундном разряде с щелевым катодом / Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, В.С. Кобзева, О.В. Кобзев // **ТВТ.** 2012. Т. 50. № 2. С. 1 – 7.