

На правах рукописи

Омарова Патимат Хасбулаевна

**ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

01.04.08. – Физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дагестанский государственный университет» на кафедре физической электроники

Научный руководитель:

Омарова Наида Омаровна

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
заведующая кафедрой математических и
естественнонаучных дисциплин ФГБОУ
ВО «Дагестанский государственный
университет»

Официальные оппоненты:

Василяк Леонид Михайлович

Доктор физ.-мат. наук, профессор, главный
научный сотрудник ФГБУН
«Объединенный институт высоких
температур РАН»

Синкевич Олег Арсеньевич

Доктор физ.-мат. наук, профессор,
профессор кафедры инженерной
теплофизики имени В.А. Кириллина
Национального исследовательского
университета «Московский энергетический
институт»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «03» октября 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при Институте общей физики имени А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Автореферат диссертации разослан «...» _____ 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воляк Т.Б.

Тел.: +7(499) 503-81-47

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Внимание специалистов к электрическим разрядам обусловлено их применением в новейших областях науки и техники.

На основе явления пробоя газов работают различные устройства: быстродействующие коммутаторы тока и напряжения, генераторы импульсных напряжений, лазеры и источники излучений. Исследования в области газовых разрядов во внешнем продольном магнитном поле могут быть использованы при создании коммутаторов газовых лазеров, импульсных источников излучения, при оптимизации режимов плазмохимических реакторов. Исследования разряда в смеси аргона с галогеносодержащими соединениями применяются для создания активной среды в эксимерных и эксимерных лазерах.

В настоящее время общеприняты следующие механизмы пробоя газов: таунсендовский, стримерный и механизм пробоя для больших значений отношений напряженности поля к давлению (с убеганием электронов).

В последние годы в связи с усовершенствованием экспериментальной техники значительно расширился диапазон исследований пробоя газов высокого давления во внешнем сильном магнитном поле.

Так как инертные газы широко применяются в качестве буферного газа в активных средах газовых и эксимерных лазеров и в лазерах на пеннинговских смесях инертных газов, исследование формирования импульсного пробоя в этих газах является важной задачей, решить которую возможно, изучая физику электрического пробоя газов высокого давления за счет более детальных экспериментальных результатов об основных параметрах и структуре разряда.

Расширяющийся сильноточный искровой канал давно применяется как импульсный источник излучения в широком диапазоне длин волн. Нарастание проводимости в искровом канале находит практическое применение в решении проблемы коммутации больших токов, формировании и развитии высоковольтных импульсов напряжения, мощных электронных пучков и т.д. В искровом канале за короткое время ($\sim 10^{-7}$ с) выделяется значительная энергия, что и определяет его расширение, а в сильном магнитном поле эти процессы ускоряются. Поэтому интересен вопрос об эффективности использования таких разрядов в качестве интенсивного источника излучения. Особый интерес представляет исследование излучательных характеристик разряда во внешнем магнитном поле, а именно распространение излучения в продольном и поперечном направлениях относительно направления развития разряда.

Характер протекания высокотемпературных газодинамических процессов и связанных с ними оптических явлений позволяет определить роль различных механизмов, участвующих в переносе энергии в радиальном направлении. Учитывая, что сильное продольное магнитное поле создает упорядоченную структуру, как в газе, так и в его ионизованном состоянии можно предположить, что анизотропия приведет к изменению энергетических, излучательных и временных характеристик разряда.

Анализируя проблемы, существующие в данной области физики, не получившие должного объяснения (к моменту начала данной работы), можно выделить:

1. Локальность экспериментальных данных о механизмах пробоя в коротком межэлектродном пространстве при высоком давлении газа во внешнем продольном магнитном поле. Недостаток надежных экспериментальных данных и отсутствие общего мнения о процессе излучения, качественного и количественного его обоснования.
2. Ограниченность научных работ по исследованию теории процессов, приводящих как к возникновению, так и к нарушению устойчивости плазмы катодной области в газах в перенапряженных межэлектродных пространствах.
3. Разнообразие элементарных процессов, протекающих в объемных разрядах, сложность их экспериментального и теоретического изучения, а также исследование спектрального состава излучения из приэлектродной плазмы, формирующегося в режиме распыления материала вещества электродов.
4. Влияние внешнего критического магнитного поля на энергетические характеристики всех стадий развития разряда, особенно канало-дуговых, рассматриваемых как источник когерентного и некогерентного излучения в УФ и видимой области спектра.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование и теоретическое обоснование механизмов формирования и развития газового разряда во внешнем продольном магнитном поле при наличии внешнего ионизатора, создающего концентрацию электронов 10^6 см^{-3} , при давлениях выше атмосферного. Изучение явления образования и прорастания искрового канала в результате формирования на поверхности электрода (катода) источников термоэлектронной эмиссии. Определение макропараметров (тока и напряжения), микропараметров (температуры и концентрации электронов) и излучательных характеристик разряда во внешнем продольном магнитном поле.

Основные задачи исследования

- Разработка и развитие методов комплексного экспериментального и теоретического исследования пробоя газов во внешнем магнитном поле.
- Исследование динамики формирования и развития искрового канала газового пробоя при изменении начальных условий.
- Исследование возможности управления характеристиками сильноточного газового разряда высокого давления с помощью внешнего сильного продольного магнитного поля, а именно уменьшение времени формирования и резкого спада напряжения на промежутке.
- Определение влияния анизотропии, вызванной внешним продольным критическим магнитным полем, на характеристики газового разряда.
- Изучение оптических и спектральных характеристик плазмы сильноточного разряда.
- Исследование возможности повышения температуры плазмы, увеличивая скорость ввода энергии в искровой канал с одновременным уменьшением потерь на излучение и на его расширение.

Объектом исследования является газовый разряд высокого давления во внешнем магнитном поле напряженностью от 90 до 400 кЭ, который сопровождается формированием искрового канала в межэлектродном промежутке (0,3–1 см) в инертных газах, в широком диапазоне давлений от 760 до 3000 Торр.

Научная новизна исследования

- На основе выполненных экспериментальных исследований электрических, оптических и спектральных характеристик импульсного сильноточного разряда высокого давления в инертных газах (Ar, He) во внешнем сильном магнитном поле, выявлены следующие стадии: распространение лавино-плазменных стримеров — диффузное свечение (тлеющий объемный разряд); образование катодного пятна с дрейфом электронного пучка в усиленном электрическом поле с последующим образованием узкого искрового канала ($r \sim 0,1$ мм); расширение искрового канала с переходом в квазистационарную дугу (с $r > 1$ мм); деионизация плазмы.
- Выявлены закономерности формирования и развития сильноточного разряда при изменении начальных условий (напряжения пробоя, межэлектродного расстояния, давления газа, концентрации затравочных электронов, создаваемых предварительной фотоионизацией промежутка). Показано, что при наличии предварительной фотоионизации газа рождение

электронов происходит в процессе ступенчатой ионизации, а основным каналом гибели электронов является диссоциативная рекомбинация.

- Впервые исследовано влияние внешнего продольного магнитного поля на динамику плазмы формирующегося катодного пятна и расширяющегося искрового канала. Показано, что степень влияния на поперечный перенос энергии ионизации плазмы искрового канала определяется градиентом магнитного давления на границе плазма – нейтральный газ.
- Обнаружено, что при пробое инертных газов высокого давления во внешнем сильном магнитном поле поперечное излучение из плазмы уменьшается почти в 2 раза, а излучение в продольном направлении увеличивается (анизотропия излучения прозрачной плазмы вдоль и поперек разряда).
- Впервые исследовано влияние внешнего продольного магнитного поля на спектральные характеристики искрового канала. С ростом напряженности магнитного поля максимум спектральной плотности непрерывного излучения перемещается в область спектра коротких длин волн.
- Экспериментально показана возможность управления характеристиками сильноточного газового разряда высокого давления с помощью внешнего сильного продольного магнитного поля, а именно уменьшение времени формирования и резкого спада напряжения на промежутке.
- Показано, что в продольном магнитном поле можно повысить температуру, увеличивая скорость ввода энергии в искровой канал с одновременным уменьшением потерь на излучение и на расширение канала.

Научная и практическая значимость

- Результаты, приведенные в работе, важны для понимания механизмов развития разряда высокого давления и будут способствовать дальнейшему развитию физических представлений о процессах, протекающих в разряде.
- С практической точки зрения, полученные новые закономерности и сделанные выводы интересны тем, что позволяют выявить возможности построения источников излучения в УФ и в видимой областях спектра.
- Результаты по изучению нарастания проводимости в искровом канале могут использоваться в решении проблемы коммутации больших токов, формировании высоковольтных импульсов напряжения и мощных электронных пучков.
- Результаты по формированию сильноточного диффузного разряда могут быть использованы в оптимизации параметров газовых лазеров.

- Результаты по исследованию эффективности фотоионизации и кинетики ионов в фотоплазме могут использоваться для улучшения систем инициирования газовых ОКГ.
- Результаты исследования влияния продольного магнитного поля на спектральные характеристики разряда указывают на возможность создания импульсных источников излучения с регулируемым спектральным составом.

Основные положения, выносимые на защиту

- Концентрация электронов, скорость прорастания и расширения искрового канала зависят от величины напряженности внешнего магнитного поля.
- Максимум спектральной плотности непрерывного излучения смещается в область коротких длин волн, что соответствует росту температуры плазмы искрового канала во внешнем магнитном поле.
- Температуру плазмы в малых объемах во внешнем сильном магнитном поле можно повысить, увеличивая скорость ввода энергии в искровой канал с одновременным уменьшением скорости его расширения и потерями на излучение.
- Спектральный состав излучения плазмы искрового канала зависит от напряженности внешнего магнитного поля, степень влияния которого определяется скоростью расширения искрового канала, которая в свою очередь является функцией скорости ввода энергии.
- Интегральная интенсивность излучения плазмы импульсного сильноточного разряда в инертных газах растет в продольном направлении относительно оси разряда во внешнем сильном магнитном поле, а излучение поперек разряда уменьшается.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в данной работе, были получены автором лично или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Результаты докладывались на следующих конференциях: Международной конференции (ФИРКС, Украина, г. Николаев, 2009); Всероссийской научной конференции молодых ученых (ВНКСФ, г. Ижевск, 2015); VI International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology” (Minsk, Belarus, 2009); XXXVI, XLI, XLIII Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2009, 2013, 2016); Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности (Тамбов, 2015); Международной научно-практической конференции (Стерлитамак, 2015, 2016), а также на научных семинарах ДГУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 30 работ. Из них 9 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК, тезисов и докладов в материалах конференций 21.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 152 стр., включая 47 рисунков и 11 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, определена научная и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные задачи, цели и методы исследования, а также положения, которые выносятся на защиту, показана научная новизна полученных результатов.

В первой главе приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных описанию развития стадий газового разряда высокого давления во внешнем магнитном поле при различных начальных условиях пробоя. Особое внимание уделяется вопросу формирования и развития искрового канала во внешнем продольном критическом магнитном поле. Приводятся теоретические модели, объясняющие развитие разряда в инертных и молекулярных газах. Содержится критический обзор основных работ по пробоям газов высокого давления во внешнем магнитном поле, при этом основное внимание уделяется сравнительному анализу теоретических подходов, в которых предпринимаются попытки определения основных параметров плазмы газового разряда на начальных стадиях его развития.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, методик исследования пробоя газов в сильном магнитном поле и анализу погрешностей измерений. Экспериментальная установка собрана из двух независимых электрических схем, работающих синхронно при помощи блока синхронизации (ГИН) – генератор импульсных напряжений и генератор импульсных магнитных полей (ГИМП). Подробно описаны основные элементы установки: генератор импульсов напряжения, разрядная камера, соленоид, коммутирующий вакуумный разрядник, система предионизации и синхронизации.

Рассматриваются и обосновываются следующие методы экспериментальных исследований:

- метод исследования регистрации электро-технических параметров разряда;

- метод регистрации оптических картин развития сильноточного разряда при помощи электрооптического затвора Керра (ЭОЗ) и электронно-оптического преобразователя (ЭОП);
- метод регистрации спектров излучения разряда с временным разрешением до 10 нс с использованием спектрографа и ВФУ;
- метод штарковского уширения и относительных интенсивностей спектральных линий для расчета концентрации и температуры электронов в плазме сильноточного разряда;
- методом лучеиспускания исследовались характеристики оптического излучения плазмы.

Учитывая малые времена развития процессов при импульсном искровом разряде, экспериментальная установка удовлетворяет следующим требованиям:

- временное разрешение электрических параметров составляло ~ 5 нс, оптических картин свечения ~ 5 нс и спектральных характеристик - 10 нс;
- используемые импульсы напряжения с регулируемой амплитудой и крутым передним фронтом до 10 нс;
- создание импульсных магнитных полей с длительностью полупериода ~ 300 мкс и напряженностью до 500 кЭ;
- создаваемая начальная концентрация электронов $\sim 10^6$ см⁻³.

Разрядный промежуток облучался дополнительным искровым разрядом УФ-источника, расположенного на расстоянии 5–7 см от оси основного разрядного промежутка. В этом положении подсвечивающая искра дает возможность сформировать равную по оси концентрацию затравочных (начальных) электронов в одном случае, и в другом — одинаковую концентрацию по сечению.

При формировании УФ-ионизации использовалась система на тиратроне типа ТГИ1-400/16. Подсвет или УФ-излучение разряда с энергией $\approx 0,3-0,4$ Дж создает в Ag концентрацию затравочных электронов $n_0 \approx 10^6$ см⁻³, а при таких же условиях в He $n_0 \sim 10^8$ см⁻³.

Внешнее магнитное поле создавалось за счет разряда батареи конденсаторов через соленоид, внутри которого и находился изучаемый промежуток. Параметры системы емкостной накопитель–соленоид подбирались по требованиям обеспечения квазистационарности внешнего магнитного поля (период магнитного поля напряженностью до 500 кЭ ≈ 600 мкс, а длительность импульса напряжения электрического поля до 1 мкс). Конструкция соленоида и его тип выбирался, исходя из требуемой величины магнитного поля, механической прочности, простоты конструкции.

Регистрация излучения разряда осуществлялась через боковые отверстия **5** в центральной витке соленоида (толщиной 1 см), который представлял собой цельнометаллическую конструкцию из бериллиевой бронзы с числом витков (**1**) 33, внутренним диаметром 8 мм, индуктивностью $L_0=5 \cdot 10^{-6}$ Гн (рис. 1). Толщина витков 0,2 см, межвитковой текстолитовой изоляции (**2**) 0,15–0,2 см. Соленоид в собранном виде помещался в стальной бандаж **4** с толщиной стенок 0,4 см.

Анализируются погрешности методов измерения основных электротехнических, оптических и спектральных характеристик разряда.

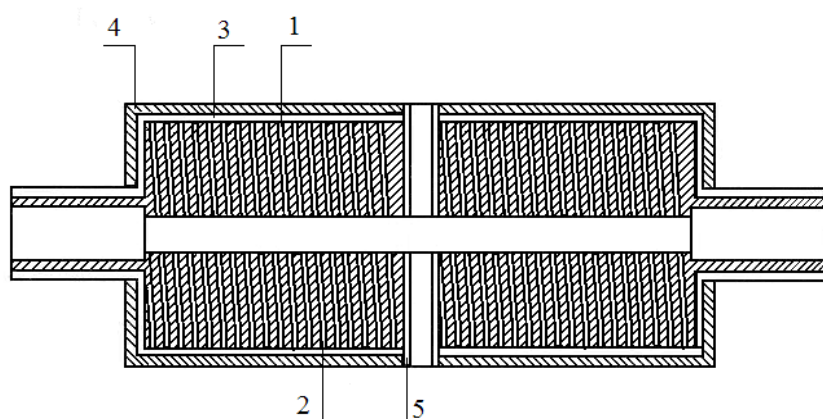


Рис. 1. Соленоид: 1 — витки, 2 — изолирующая текстолитовая прокладка, 3 — изолятор, 4 — стальной корпус, 5 — боковые отверстия.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования электрических характеристик разряда. По измеренным значениям разрядного тока и напряжения оценивалась плотность заряженных частиц на различных стадиях разряда.

Приводятся осциллограммы тока и напряжения и зависимость времени формирования от прикладываемого напряжения. По времени начальный рост тока соответствует появлению свечения у анода, а переход к резкому росту — образованию катодного пятна и диффузного канала.

Показано, что скорость прорастания искрового канала от катодного пятна определяется плотностью тока, с ростом которой скорость возрастает. С началом быстрого спада напряжения плотность тока в образующемся искровом канале через 30–40 нс становится $\sim 10^6$ А/см². При быстром расширении искрового канала спустя 100 нс плотность тока уменьшается на порядок (рис. 2, кривая 1). Для плотности тока канала имеем

$$j(t) = \frac{I(t)}{\pi r^2(t)}. \quad (1)$$

На участке, где $j = \text{const}$, $r(t) \approx M[I(t)]^{1/2}$ (где M — постоянная) или с учетом $I(t) = I_0 \sin \omega t$ и $\omega t \ll 2\pi$, получаем

$$r(t) = M(I_0 \omega t)^{1/2}, \quad I_0 \approx U_{\text{пр}}/z_1. \quad (2)$$

Наблюдаемая экспериментальная зависимость соответствует зависимости (2). Для данной стадии скорость расширения искрового канала равна

$$v \approx 0,5M(U_0/z_1)^{1/2} \left[\omega / (\omega t)^{1/2} \right] \approx 0,5M(U_0/L)^{1/2} t^{1/2}, \quad (3)$$

где $z_1 = \sqrt{\frac{L}{c_1}}$ и $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$.

В продольном магнитном поле плотность тока на всех стадиях возрастает (рис. 2, кривая 2). Например, при $H = 200$ кЭ через 100 нс после начала резкого спада напряжения $j = 3,6 \cdot 10^5$ А/см², а для $H = 0$ $j = 2,2 \cdot 10^5$ А/см².

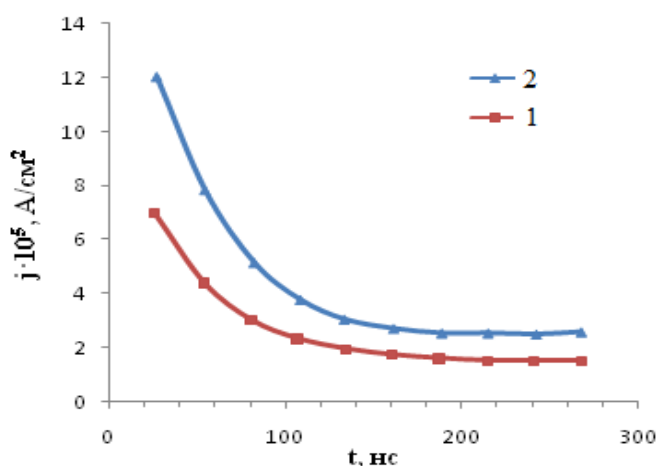


Рис. 2. Зависимость плотности тока в разряде от времени ($E/P=10$ В/см Торр): 1) $H = 0$; 2) $H = 200$ кЭ.

В течение 100 нс проводимость плазмы искрового канала увеличивается до 81 (Ом·см)⁻¹ и затем почти не меняется (рис. 3). Для одиночного однородного искрового канала проводимость плазмы не зависит от внешнего поля. А во внешнем продольном магнитном поле проводимость σ растет ($H = 200$ кЭ, $\sigma = 100$ Ом⁻¹см⁻¹). При $H = 0$ проводимость σ фактически не изменяется спустя 150 нс, а при напряженности магнитного поля $H = 140$ кЭ - спустя 200 нс. Начальный резкий рост проводимости плазмы искрового канала указывает на увеличение степени ионизации поскольку, затем σ фактически не изменяется и незначительно зависит от внешнего поля; тогда предположим, что при достижении наивысшего значения проводимости степень ионизации в канале близка к 100%.

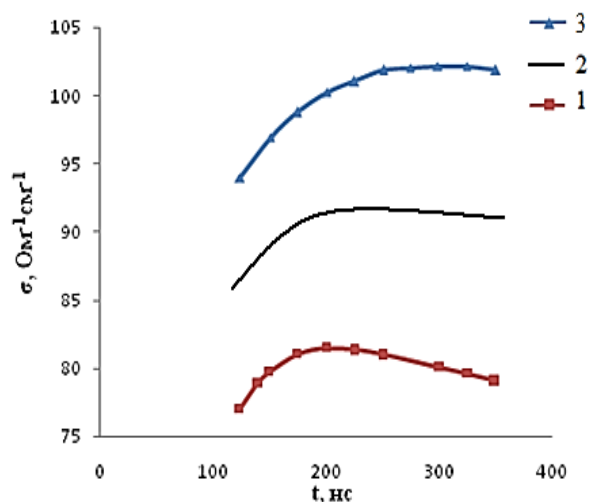


Рис. 3. Зависимость проводимости плазмы искрового канала Ag от времени ($E/p=10$ В/см Торр): 1) $H = 0$; 2) $H = 90$ кЭ; 3) $H = 140$ кЭ.

При значениях перенапряжения $W \geq 75\%$ развитие разряда затормаживается на промежуточной стадии — сильноточный диффузный разряд (СДР). На основе экспериментальных исследований сделаны следующие оценки. Плотность тока в СДР (10^4 А/см²) на порядок меньше чем в искровом канале. Проводимость плазмы СДР составляет $30-40$ Ом⁻¹см⁻¹, а соответствующая температура электронов 10^4 К. Длительность горения СДР с удельной мощностью 10^7 Вт/см³ составляет 10^{-6} с, соответственно максимальный энерговыдел 10 Дж/см³·атм. Концентрация заряженных частиц, соответствующая температуре электронов 10^4 К, равна 10^{17} см⁻³. В таких условиях рождение электронов происходит в процессе ступенчатой ионизации, а основным каналом гибели электронов является диссоциативная рекомбинация.

Четвертая глава посвящена исследованию пространственно-временного развития разряда различными методами регистрации оптических характеристик разряда. Показано, что первое регистрируемое свечение в промежутке появляется на аноде при таунсендовском разряде, которое со скоростью 10^7 см/с замыкает разрядный промежуток, причем, диаметр свечения существенно зависит от формы электродов (степени однородности поля) (рис. 4). Канал инициируется ярким катодным пятном, появление которого по времени соответствует началу резкого роста тока и спаду напряжения. Скорость прорастания яркого искрового канала по диффузному столбу оказалась равной $\sim 10^7$ см/с.

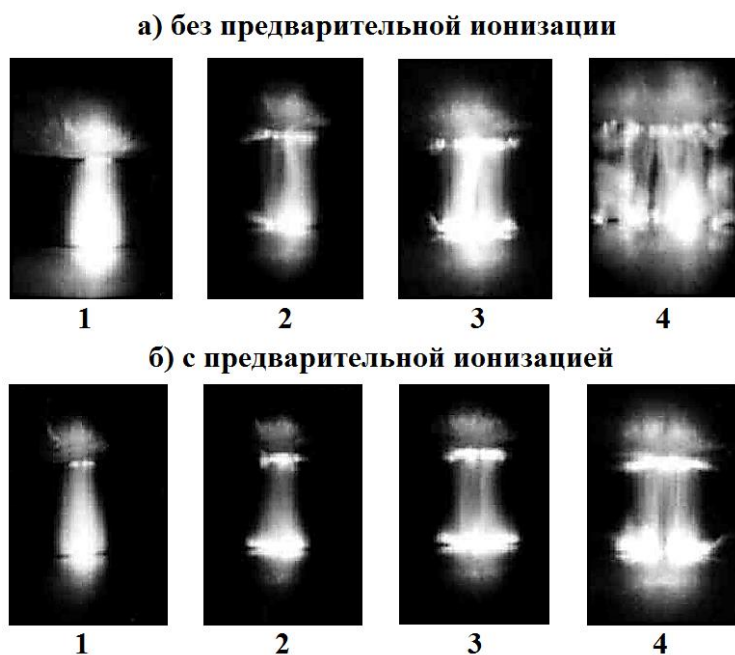


Рис. 4. Интегральные во времени фотографии разряда ($d = 0,3$ см, $p=2280$ Торр, при W : 1— 0; 2 –50%; 3 — 100%; 4 — 150%); а) без предварительной ионизации; б) с предварительной ионизацией.

Экспериментально установлено, что переход к стримерному механизму наблюдается при $W > 20\%$. Стример не трансформируется в искровой канал. Канал инициируется ярким свечением, появляющимся в промежутке на расстоянии от катода, равном критической длине лавины. Яркое свечение со скоростью $\sim 10^6$ см/с распространяется к обоим электродам. Одновременно со свечением, инициирующим искровой канал, формируются катодные пятна слабой интенсивности.

Интенсивная предварительная ионизация газа ($n_{e0} \sim 10^6$ см $^{-3}$) приводит к новой форме разряда. При всех исследованных значениях пробойного напряжения первое регистрируемое свечение возникает у анода (как и в случае таунсендовского разряда) и со скоростью 10^7 см/с замыкает разрядный промежуток. Затем формируется яркое катодное пятно и привязанный к нему диффузный канал. И от катодного пятна вглубь промежутка прорастает яркий искровой канал. С увеличением перенапряжения число катодных пятен и привязанных к ним диффузных каналов растет, а скорость прорастания уменьшается ($\sim 10^6$ см/с, $W = 50\%$).

Множество диффузных каналов, сливаясь, образуют широкий столб однородной плазмы. Начиная с перенапряжений 75%, разряд затормаживается на промежуточной стадии (СДР).

Скорость прорастания искрового канала определяется плотностью тока в нем. Внешнее продольное магнитное поле увеличивает скорость прорастания искрового канала, но практически не влияет на характеристики диффузного канала. С ростом плотности тока скорость растет.

Скорость распространения канала можно определить выражением

$$v_k = br_y \frac{e}{m\varepsilon_i} \frac{k_{ee}^2}{k_{ea}^2} \left(\frac{E_{ст}}{n_a} \right)^2 n_a,$$

где e — заряд электрона, k_{ee} и k_{ea} — константы электрон-электронных и электрон-атомных взаимодействий, n_a — плотность нейтральных атомов, r_y — размер области усиленного поля, b — коэффициент, доли энергии, расходуемой на ионизацию газа, ε_i — потенциал ионизации. В эксперименте ($W = 25\%$), $r_y \sim 10^{-2}$ см, $E_{ст} \sim 10^4$ В/см, $k_{ee} \sim 10^{-7}$ см³/с, тогда получим $v_k \sim 10^8$ см/с.

Скорость расширения искрового канала при наложении магнитного поля уменьшается. Это связано с тем, что градиент магнитного давления соизмерим с градиентом газодинамического давления, особенно на начальном этапе его развития.

В пятой главе изложены результаты исследования спектров сильноточного разряда высокого давления в инертных газах (Ar, He) как в поперечном, так и в продольном направлениях развития разряда.

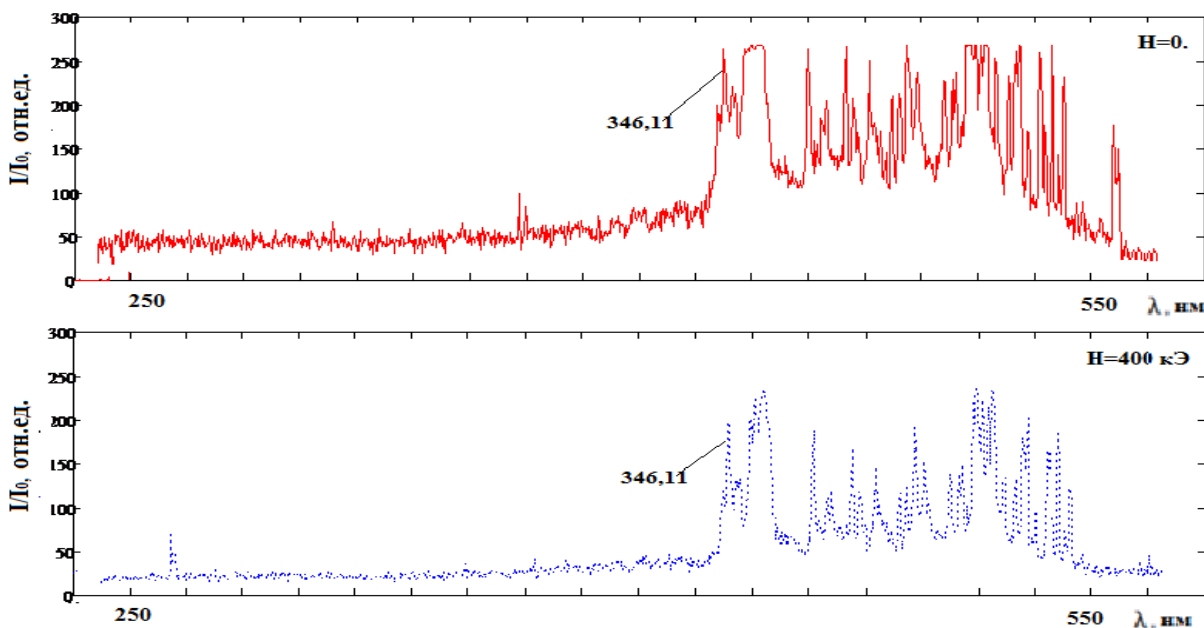


Рис. 5. Спектры поперечного излучения пробоя Ar (250–550 нм) при $d=0,3$ см, $p=2280$ Торр, $U_{np}=5$ кВ, $U_{стат}=4,7$ кВ для $H=0$ и 400 кЭ ($t=100$ нс).

Для определения временных зависимостей интенсивности излучения в различных диапазонах длин волн использовался фотоэлектрический метод. Данный метод позволяет с высокой точностью проследить временное изменение интенсивности для отдельно взятой линии или для небольшой группы линий. Для хронологии изменения интенсивности излучения большого

диапазона длин волн использовались численные методы моделирования на основе компьютерной программы Mathcad. На рис. 5 приведены спектры поперечного излучения при пробое Ar, развернутые с помощью численных методов моделирования компьютерной программы Mathcad для $H = 0$ и 400 кЭ. Сравнивая эти рисунки, отметим, что поперечное излучение из плазмы сильноточного разряда высокого давления во внешнем критическом магнитном поле уменьшается почти в 2 раза. По временам развития разряда рис. 5 соответствует стадии образования катодного пятна с дрейфом электронного пучка в усиленном электрическом поле с последующим образованием узкого искрового канала и его расширением ($t = 100$ нс).

Развернутый во времени спектр пробоя Ar приведен на рис. 6 во внешнем магнитном поле $H=400$ кЭ и без него $H=0$ ($E/p=9$ В/см·Торр, $p=2280$ Торр, $d=0,3$ см). Излучение начальных стадий разряда фиксируется в течение первых 60–80 нс, затем регистрируется излучение искрового канала (90–150 нс), квазистационарной дуги (160–250 нс) и деионизация плазмы отдельных спектральных линий (до 1 мкс). Как показали результаты эксперимента, внешнее продольное критическое магнитное поле, ускоряя процесс формирования всех стадий разряда, приводит к образованию новых спектральных линий в коротковолновой части спектра (рис. 6). Спектральные линии с длинами волн $\lambda_1=310,43$ нм и $\lambda_2=314,48$ нм, характерные для химического элемента Мо (молибден), показаны на рис. 6 для $H=0$. При увеличении значения напряженности внешнего продольного магнитного поля до $H=400$ кЭ эти линии исчезают и появляются новые: $\lambda_3=279,67$ нм (Rh, родий, или, осмий), $\lambda_4=307,03$ нм (Mn, марганец), $\lambda_5=330,25$ нм (Zn, цинк), $\lambda_6=332,37$ нм (Ar, аргон), $\lambda_7=335,64$ нм (Ar), $\lambda_8=340,15$ нм (Ar), $\lambda_9=366,45$ нм (Ar).

Спектры излучения Ar были сняты в условиях линейной зависимости оптической плотности почернения фотопленки от освещенности. При значениях напряженности магнитного поля $H=0$ и 400 кЭ ($p=2280$ Торр, $d=0,3$ см) регистрировалась спектрограмма участка 250–550 нм. В дальнейшем спектры оцифровывались с помощью численных методов моделирования компьютерной программы Mathcad (рис. 7).

На рис. 7 (1) представлены спектрограммы излучения участка спектра при пробое в Ar для $H=0$ и 400 кЭ. В рамках указаны длины волн спектральных линий ($\lambda=330,2$ нм, Zn), которые на стадии развития искрового канала (120 нс) появляются при значении напряженности магнитного поля $H=400$ кЭ, а на рис. 7 (2) – длины волн ($\lambda=269,76$ нм, Rh, Os), появляющиеся на стадии горения квазистационарной дуги (200 нс) при $H=400$ кЭ.

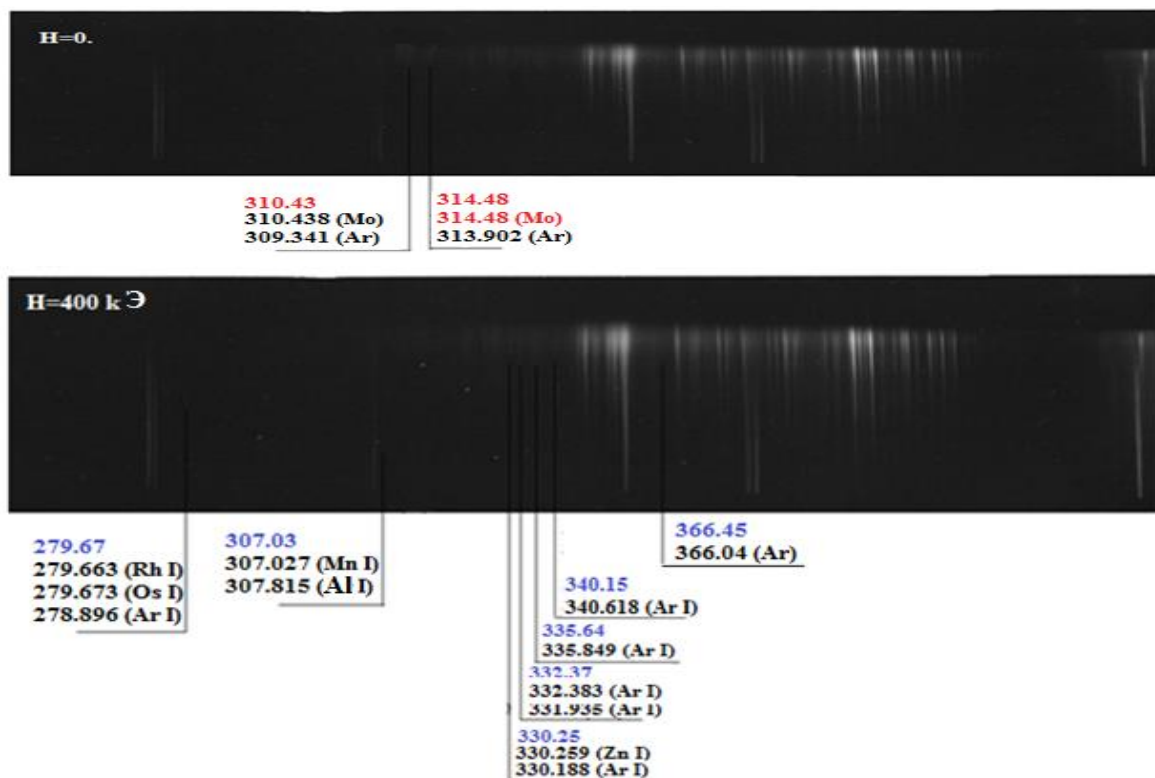


Рис. 6. Спектрограмма излучения при пробое Ar $d=0,3$ см, $p=2280$ Торр, $U_{np}=5$ кВ в диапазоне 250–550 нм, для $H = 0$ и 400 кЭ (I/I_0 — относительная интенсивность).

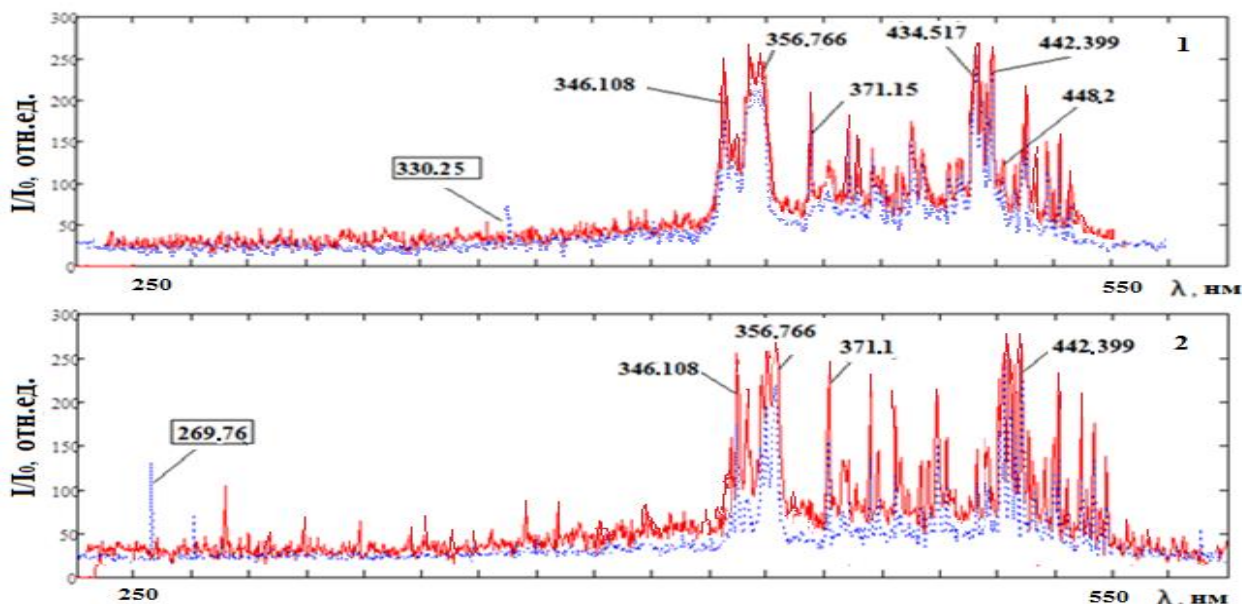


Рис. 7. Последовательность спектров излучения Ar, при $d=0,3$ см, $p=2280$ Торр, $U_{np}=5$ кВ в диапазоне 250 нм–550 нм, сплошная линия — $H=0$; пунктирная — $H=400$ кЭ (I/I_0 — относительная интенсивность), 1 — $t=120$ нс; 2 — $t=200$ нс.

Анализ полученных данных показывает, что наложение внешнего продольного магнитного поля приводит к изменению интенсивности излучения, как во времени, так и по длинам волн. В частности, наложение

магнитного поля приводит к более раннему росту интенсивности излучения именно в коротковолновой области спектра. Для длинноволновой области спектра характерен более поздний рост интенсивности излучения с ростом напряженности внешнего продольного магнитного поля.

Интегральные спектры продольного излучения при пробое Ar приведены на рис. 8 во внешнем магнитном поле ($H=400$ кЭ) и без него ($H=0$) для $p=2280$ Торр, $d=0,3$ см. Как показали результаты эксперимента, внешнее продольное критическое магнитное поле, создавая упорядоченную структуру в газе и ускоряя процесс формирования всех стадий разряда, приводит к увеличению интенсивности свечения (рис. 8).

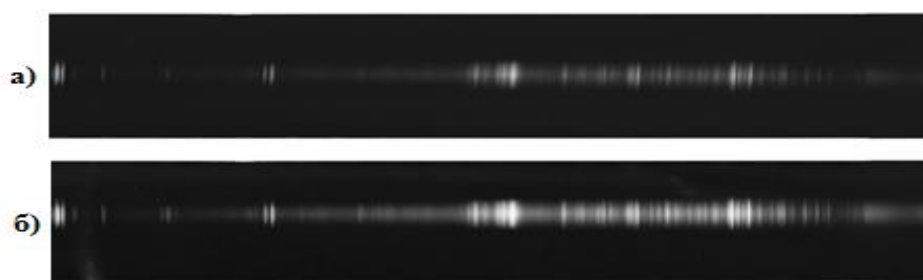


Рис. 8. Спектры интегрального излучения разряда в Ar вдоль силовых линий сильного продольного магнитного поля: а — $H=0$; б — $H=400$ кЭ, $p=2280$ Торр, $d=0,3$ см; $U_{np}=6$ кВ; $U_{стат}=4,7$ кВ.

В сильном продольном магнитном поле происходит намагничивание атомов инертных газов (Ar, He), вектор намагничивания пропорционален значению напряженности внешнего магнитного поля, при этом их магнитная восприимчивость χ не зависит от температуры. Мы предполагаем, что создается упорядоченная структура до подачи пробойного импульса электрического напряжения. Отметим, что магнитные поля действуют на протяжении 600 мкс, а импульс электрического поля 1 мкс; фактически газ и плазма находятся в сильном магнитном поле, которое создает анизотропию излучения вдоль силовых линий магнитного поля, что на наш взгляд может привести к усилению направленного излучения из плазмы газового разряда. С помощью численных методов автоматизированного проектирования компьютерной программы Mathcad спектры, представленные на рис. 8, преобразуются в спектрограммы, которые приведены на рис. 9.

Анализ интегральных спектров продольного излучения сильноточного разряда высокого давления в инертных газах позволяет заключить, что во внешнем критическом магнитном поле увеличивается интенсивность излучения в продольном направлении (рис. 9 для Ar, и рис. 10 для He).

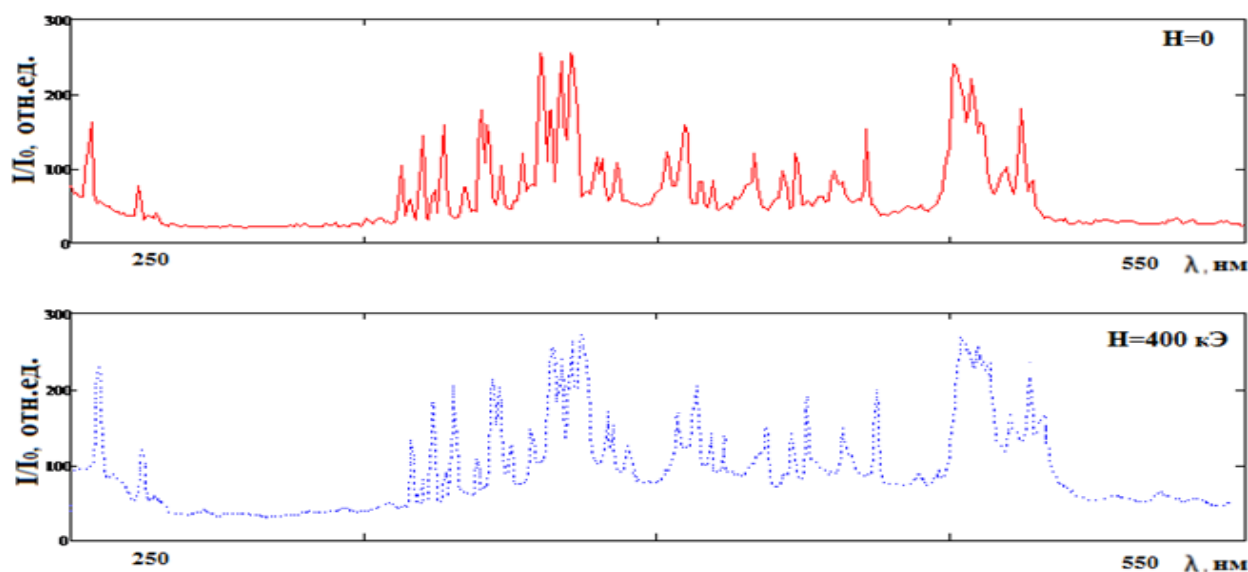


Рис. 9. Интегральные спектры излучения разряда в Ag вдоль силовых линий внешнего продольного магнитного поля: а — $H=0$; б — $H=400$ кЭ, $p=2280$ Торр, $d=0,3$ см; $U_{np}=6$ кВ; $U_{стат}=4,7$ кВ.

Аналогичная картина и в случае с Ne. На рис. 10 приведены спектры интегрального излучения при пробое Ne, для двух значений напряженности магнитного поля: $H=0$ (а) и 400 кЭ (б) ($p=2280$ Торр, $d=0,3$ см).

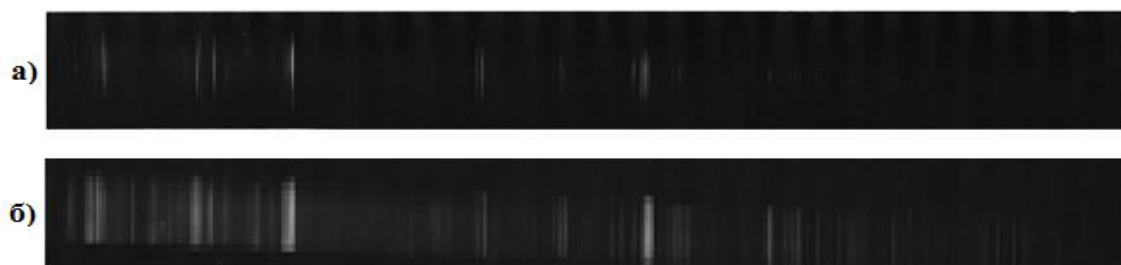


Рис. 10. Интегральные спектры излучения разряда в Ne вдоль силовых линий продольного сильного магнитного поля: а – $H=0$, б – $H=400$ кЭ, $p=2280$ Торр, $d=0,3$ см; $U_{np}=6$ кВ; $U_{стат}=2,5$ кВ.

В магнитном поле интенсивность непрерывного излучения и интенсивность спектральных линий в УФ-области возрастает. Яркость спектральных линий в видимой области незначительно уменьшается. С ростом напряженности магнитного поля максимум интенсивности непрерывного излучения смещается в коротковолновую область (рис. 11). Этот результат может быть использован для формирования импульсов излучения с регулируемым спектральным составом.

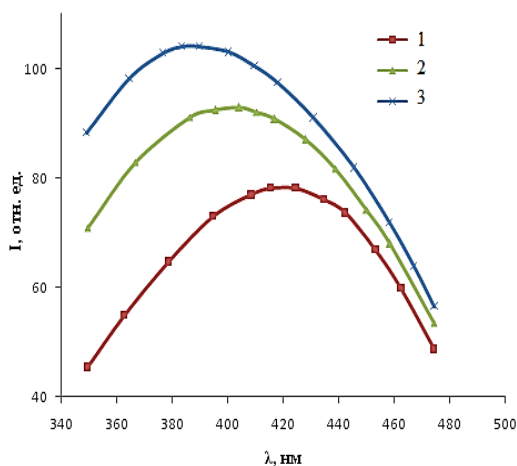


Рис. 11. Зависимость относительной интенсивности излучения искрового канала от длины волны: 1) $H=0$; 2) $H=140$ кЭ; 3) $H=200$ кЭ.

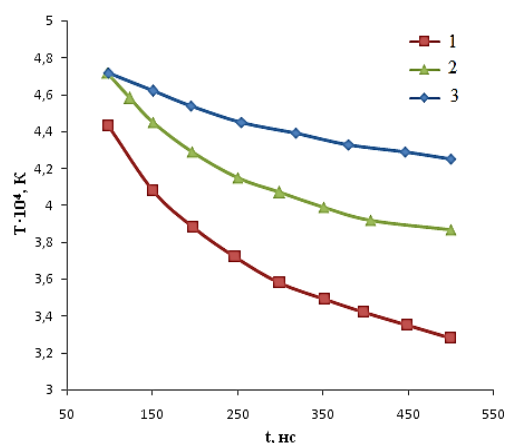


Рис. 12. Изменение температуры плазмы искрового канала со временем: 1) $H=0$; 2) $H=140$ кЭ; 3) $H=200$ кЭ.

Определена температура электронов в плазме искрового канала по методу относительных интенсивностей спектральных линий (рис. 12). Показано, что во внешнем продольном магнитном поле температура плазмы возрастает.

Оценена плотность электронов в плазме канала по штарковскому уширению спектральных линий ионов аргона ($n_e \sim 10^{18}$ см⁻³). Во внешнем продольном магнитном поле концентрация заряженных частиц возрастает.

По уширению линий атомарного аргона определена плотность электронов в плазме СДР. Значение концентрации заряженных частиц $\sim 10^{17}$ см⁻³ оказалось близким к равновесному значению при $T_e \approx 10^4$ К.

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

1. Экспериментально показано, что формирование и развитие сильноточного разряда высокого давления в инертных газах начинается с распространения лавино-плазменных стримеров в виде диффузного свечения; затем образуется катодное пятно, обеспечивающее интенсивную эмиссию электронов, с последующим прорастанием узкого искрового канала ($r \sim 0,1$ мм) со скоростью $\sim 10^8$ см/с; затем происходит расширение искрового канала с переходом в квазистационарную дугу (с радиусом $r > 1$ мм); а завершается импульсный разряд деионизацией плазмы. Характерное время установления единой температуры и равновесной ионизации составляет $\sim 10^{-8}$ с. Плазма искрового канала характеризуется почти 100% ионизацией.

2. Показано, что скорость энерговыклада на начальных этапах формирования канала во внешнем сильном магнитном поле увеличивается в результате ограничения радиальной диффузии электронов, что приводит к ускорению формирования канальной стадии развития разряда. Показано, что в магнитном поле ускоряются почти все стадии формирования сильноточного разряда, кроме стадии деионизации плазмы, что дает возможность управлять характеристиками сильноточного разряда в газах высокого давления. В сильном магнитном поле, увеличивая скорость ввода энергии в искровой канал с одновременным уменьшением скорости его расширения и потерями на излучение, можно повысить температуру плазмы в малых объемах.
3. Показано, что плазма всех стадий сильноточного искрового разряда высокого давления оптически прозрачна. Измеренные значения плотности и температуры обеспечивают прозрачность линий, обладающих анизотропией излучения.
4. Показано, что спектральный состав излучения искрового канала зависит от напряженности внешнего магнитного поля, степень влияния которого определяется скоростью расширения искрового канала, которая в свою очередь является функцией скорости ввода энергии, а уменьшение в магнитном поле скорости поперечного переноса фронта ионизации обуславливает изменение в распределении энергии и, соответственно, изменение спектрального состава излучения плазмы.
5. Обнаружено, что во внешнем сильном магнитном поле поперечное излучение из плазмы сильноточного разряда высокого давления уменьшается почти в 2 раза, а продольное излучение из плазмы канало-дуговых стадий возрастает. Создается упорядоченная структура до подачи пробойного импульса электрического напряжения. Анизотропия излучения вдоль направления развития разряда приводит к усилению излучения из плазмы газового разряда.
6. С увеличением напряженности внешнего магнитного поля максимум спектральной плотности непрерывного излучения смещается в коротковолновую область с образованием новых спектральных линий.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ:

1. **Омарова, П.Х.** Пробой газов в поперечном магнитном поле / М.-Р.Г. Кишов, К.М.-Р. Кишов, **П.Х. Омарова** // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2008. – Вып. 6. – С. 11-14.

2. **Омарова, П.Х.** О выходе вещества электродов / М.-Р.Г. Кишов, **П.Х. Омарова** // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2008. – Вып. 6. – С. 15-16.
3. **Омарова, П.Х.** Ячейка для исследования разряда в потоке газа с вращающимися электродами / М.-Р.Г. Кишов, К.М.-Р. Кишов, Х.И. Магомедгаджиев, **П.Х. Омарова** // Письма в журнал технической физики. – 2010. – №7. – Т. 36. – С. 11-14.
4. **Омарова, П.Х.** Формирование начальных стадий развития искрового разряда в аргоне во внешнем магнитном поле / Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, А.А. Рамазанова, М.Б. Хачалов, **П.Х. Омарова** // Вестник ДГУ. Естественные науки. – 2013. – Вып. 6. – С. 47-55.
5. **Омарова, П.Х.** Спектроскопия плазмы искрового пробоя газов в сильных магнитных полях [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, А.А., Рамазанова М.Б. Хачалов, **П.Х. Омарова** // Инженерная физика. – 2013. – №5. – С. 50-58.
6. **Омарова, П.Х.** Спектральные исследования искрового разряда [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, М.Б. Хачалов, **П.Х. Омарова** // Инженерная физика. -2013.- №10.- С. 43-53.
7. **Омарова, П.Х.** Спектральные характеристики искрового разряда в магнитном поле [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, А.А. Рамазанова, М.Б. Хачалов, **П.Х. Омарова** // Инженерная физика. – 2013. – №7. – С. 49-54.
8. **Омарова, П.Х.** Влияние внешних магнитных полей на энергетические характеристики искрового пробоя в газах высокого давления [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, **П.Х. Омарова** // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – Т. 38, – Вып. 1. – С. 88-96.
9. **Омарова, П.Х.** Роль термоэлектронной эмиссии в формировании и развитии искрового канала в газах [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, **П.Х. Омарова** // Прикладная физика. – 2015. – №3. – С. 52-56.

Другие публикации:

10. **Омарова, П.Х.** Динамика искры в потоке He, при наличии магнитного поля [Текст]/ М.-Р.Г. Кишов, К.М.-Р. Кишов, Х.И. Магомедгаджиев, **П.Х. Омарова**, //Материалы Международной конференции ФИРКС. – Украина, г. Николаев, 2009. – С. 25-27.
11. **Омарова, П.Х.** Искровой разряд при прокачке газа [Текст]/ М.-Р.Г. Кишов, В.С. Курбанисмаилов, **П.Х. Омарова** // Тезисы докладов XXXVI Международной конференции по физике плазмы и УТС. – М.:ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2009. – С. 212.
12. **Omarova, P.H.** The behavior of discharge contraction in air [Text]/ M.-R.G. Kishov, H.I. Magomadgadjiiev, P.H. Omarova // VI International Conference “Plasma physics and plasma technology”.-Minsk, Belarus, 2009. – Vol. 1.-P. 134-136.
13. **Омарова, П.Х.** Спектральные характеристики искрового разряда в магнитном поле [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, Н.О. Омарова, А.А. Рамазанова, **П.Х. Омарова** // Тезисы докладов XL Международной конференции по физике плазмы и УТС. – М.:ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2013. – С. 233.
14. **Омарова, П.Х.** Какова роль термоэлектронной эмиссии в формировании и развитии искрового канала в аргоне [Текст]/ Ф.М.А. Аль-Харети, О.А. Омаров, **П.Х.**

Омарова // В сб.: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – Т. 2. – С. 24-26.

15. **Омарова, П.Х.** Спад напряжения при искровом пробое гелия и азота [Текст]/ Н.О. Омарова, О.А. Омаров, **П.Х. Омарова** // В сб.: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – Т. 2. – С. 24-26.

16. **Омарова, П.Х.** Роль фотоионизирующего излучения в распространении плазменного стримера [Текст]/ О.А. Омаров, Н.О. Омарова, **П.Х. Омарова** // Тезисы докладов XLIII Международной конференции по физике плазмы и УТС. – М.:ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2016. – С. 252.

17. **Омарова, П.Х.** Энерговклад в плазму канальной стадии сильноточного разряда в критических магнитных полях [Текст]/ О.А. Омаров, Н.О. Омарова, **П.Х. Омарова** //Тезисы докладов XLIII Международной конференции по физике плазмы и УТС. – М.:ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2016. – С. 253.