

На правах рукописи

**АЛЬ-ШАТРАВИ АЛИ ДЖИХАД ГАТЕА (КАТАА АЛИ ДЖ.)**

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ В КОРОТКИХ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ПРОМЕЖУТКАХ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ  
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.04. – физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МАХАЧКАЛА 2011

Работа выполнена на кафедре физической электроники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Дагестанский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Курбанисмаилов Вали Сулейманович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Решетняк Сергей Александрович

доктор физико-математических наук,  
профессор Садыков Садык Абдулмуталибович

**Ведущая организация:** Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Защита диссертации состоится «20» июля 2011 г. в 14<sup>00</sup> час на заседании диссертационного совета Д 212.053.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при Дагестанском государственном университете по адресу: 367000, г. Махачкала, ул. Дзержинского, 12, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан «19» июня 2011 г.

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

Курбанисмаилов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Импульсные разряды, развивающиеся в плотных газах, находят широкое применение в новейших областях науки и техники. Именно такие разряды используют в качестве активных сред газовых технологических лазеров, лазерах для применения в медицине и научных исследованиях. Кроме того, такие разряды применяются в импульсных источниках света при разработке быстродействующих коммутаторов тока, в устройствах квантовой электроники, фотохимии и т.д.

В ранее выполненных исследованиях были установлены классические (таунсендовский и стримерный) механизмы роста проводимости разрядных промежутков, применяемых как для объяснения зажигания тлеющего разряда при малых электрических полях, так и искрового пробоя газа при высоких перенапряжениях.

В связи с усовершенствованием современной техники эксперимента существенно расширился диапазон представлений об импульсных разрядах, развивающихся в плотных газах. В частности, для искровых разрядов в длинных промежутках обнаружено развитие неизвестной ранее неустойчивости плоского фронта ионизации участка стримера (ветвление стримера), при достижении им некоторого критического размера. В научной литературе отсутствуют надежные экспериментальные данные и единое мнение о механизме ветвления стримера и количественного и качественного его обоснования.

Поскольку инертные газы (He, Ar) широко используются в качестве буферного газа в активных средах газовых лазеров, то помимо исследований характера формирования и контракции объемного разряда (ОР) в искровой канал, наблюдений разнообразных картин развития неустойчивостей объемных и стримерных разрядов, значительный интерес представляют также экспериментальные и теоретические результаты изучения механизмов возбуждения и девозбуждения энергетических уровней атомов, концентрации различных молекулярных комплексов и степень их влияния на процессы, протекающие в плазме газового разряда.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является исследование динамики пространственной структуры и кинетические процессы импульсного разряда в инертных газах в коротких перенапряженных промежутках.

В задачи диссертационной работы входило:

1. На основе использования теоретических моделей и получения необходимого объема экспериментальных результатов дать целостное, физически непротиворечивое описание начальных стадий импульсного пробоя в инертных газах высокого давления, позволяющее объяснить как различие в скоростях распространения ионизационных фронтов в He и Ar, так и расслоение столба разряда в He при высоких перенапряжениях на отдельные каналы.

2. Исследования динамики формирования ионизационных фронтов и развития искрового канала для таунсендовского, стримерного и объемного механизмов пробоя в инертных газах (He, Ar) в широком диапазоне изменения начальных условий (величины поля, концентрации первичных электронов, давления газа, формы и материала электродов и т.д.)
3. Исследование спектрального состава излучения катодной плазмы и формирования ударных волн, обеспечивающих возникновение диффузных каналов, привязанных к катодным пятнам. Изучение процесса перехода объемного разряда в сильноточный диффузный режим.
4. Выявление роли различных элементарных процессов в общей кинетике образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда в аргоне атмосферного давления, а также разработка комплекса методик диагностики, позволяющих решить поставленные исследовательские задачи.

**Объектами исследования** явились свободно расширяющиеся самостоятельные импульсные разряды в межэлектродных промежутках (1-3 см) в инертных газах (He, Ar) в диапазоне давлений 1-5 атм и прикладываемых электрических полей 3-25 кВ/см.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи был использован комплексный подход, включающий в себя электрические, оптические и спектральные методики с временным разрешением  $\approx 10$  нс. Концентрация электронов на стримерной стадии и на стадиях формирования и горения объемного разряда определялась по плотности тока, а на более поздних стадиях коммутации измерялась по штарковским контурам спектральных линий водорода ( $H_{\beta}$ ), гелия (He II 468,6 нм) и аргона (ArI 427,2 нм и 425,9 нм); температура электронов в искровом канале определялась методом относительных интенсивностей; характеристики оптического излучения плазмы исследовались методом лучеиспускания; концентрации возбужденных молекул аргона на стадиях формирования и горения объемного разряда ( $2p^1S_0$ ,  $4s[3/2]_2$ ,  $4s[1/2]_0$ ,  $4s[3/2]_1$ ,  $4s[1/2]_1$ ,  $4p[1/2]_1$ ,  $4p[5/2]_3$ ,  $4p[3/2]_1$ ,  $4p[3/2]_2$ ,  $4p[1/2]_0$ ,  $4p[1/2]_0$ ), ионов  $Ar^+$  (основное состояние), эксимерных молекул  $Ar_2$  ( $^3\Sigma_u^+$ ),  $Ar_2$  ( $^1\Sigma_u^+$ ), объединение многих разлетных и слабосвязанных состояний, молекулярных ионов  $Ar_2^+$  (основное состояние) и  $Ar_3^+$  (основное состояние) рассчитывались теоретически на основе разработанных моделей и алгоритмов их реализации.

**Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений** базируются на использовании современных средств диагностики с высоким временным и пространственным разрешением, систематичности экспериментальных исследований в широком диапазоне начальных условий. Непротиворечивость численных и экспериментальных методов исследования и их соответствие с имеющимися данными других авторов, подтверждают достоверность полученных результатов.

**Научная новизна исследования.** Большинство полученных в работе результатов исследований являются оригинальными и получены впервые. Основные новые научные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведено систематическое исследование оптических, спектральных и электрических характеристик импульсных разрядов в инертных газах (He, Ar) высокого давления и выявлены основные закономерности формирования ионизационных фронтов и искрового канала в различных видах разрядов: таунсендовском, стримерном и объемном в диапазоне напряжений от статического пробойного до перенапряжений в сотни процентов.

2. На основе экспериментальных данных и теоретических расчетов при значительных перенапряжениях ( $W \geq 300\%$ ) в He предложен механизм зажигания необычной формы объемного горения разряда - сильноточный диффузный режим, в котором практически отсутствует контракция и формируется за счет перекрытия тонких диффузных каналов, привязанных к катодным пятнам. Диффузные каналы образуются за счет ударных волн, формируемых в прикатодной плазме при взрывных процессах в сильном электрическом поле с напряженностью  $E = 10^6$  В/см.

3. Разработаны и обоснованы вычислительные алгоритмы для моделирования импульсного разряда в Ar атмосферного давления и изучена кинетика образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда в Ar.

4. Получены экспериментальные и теоретические результаты по развитию неустойчивости фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя в гелии атмосферного давления. Впервые в He экспериментально обнаружено явление ветвления катодонаправленного стримера в коротких перенапряженных промежутках, а также дано качественное обоснование физического механизма этого процесса.

5. Для импульсного разряда в Ar экспериментально показано, что стримерный канал инициируется ярким свечением, появляющимся в точке критического усиления лавины на различных расстояниях от катода в зависимости от перенапряжения. Экспериментально измерены предпробойные токи для таунсендовского и стримерного механизмов пробоя в He, Ar и изучены особенности формирования искрового канала для этих механизмов.

**Научная и практическая ценность работы** определяется актуальностью темы и научной новизной полученных в диссертации результатов. Результаты выполненных комплексных экспериментальных и теоретических исследований будут способствовать дальнейшему развитию физических представлений об импульсных разрядах, развивающихся в газах высокого давления (порядка атмосферного), в частности, объяснению наблюдаемых больших скоростей распространения фронтов свечения в плотных газах, распространения ионизации в сторону катода и получения объемных форм разрядов при атмосферных давлениях, используемых для инициирования газовых лазеров.

Полученные в работе новые результаты о характере контракции объемного разряда в искровой канал и режимах горения сильноточного диффузного разряда в инертных газах (He, Ar) могут быть использованы для устранения неоднородности плазмы, повышения устойчивости и улучшения характеристик газовых лазеров и систем их инициирования, а также позволят изучить кинетику развития разряда, моделировать развитие различных стадий пробоя в широком диапазоне изменения начальных условий инициирования разряда.

**На защиту выносятся:**

1. Экспериментальные результаты, позволяющие обобщить качественные представления о развитии начальных стадий искровых разрядов в инертных газах (He, Ar), механизмы и скорости их распространения при различных давлениях и энерговкладах, а также граница по напряжению, выше которой происходит смена механизма пробоя от таунсендовского к стримерному.

2. Экспериментальные и теоретические результаты по развитию неустойчивости фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя в гелии атмосферного давления, а также качественное обоснование физического механизма, обнаруженного впервые в He экспериментально, явления ветвления катодонаправленного стримера в коротких перенапряженных промежутках, экспериментальное определение критических размеров стримера  $l_{кр}$  и время его ветвления для различных значений энерговклада в разряд.

3. Результаты детального изучения кинетики образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда высокого давления в аргоне и выяснения роли процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда.

4. Механизм зажигания необычной формы объемного горения разряда - сильноточный диффузный режим в He, формирующий в промежутке при значительных перенапряжениях ( $W \geq 300\%$ ), в котором практически отсутствует контракция и формируется за счет перекрытия тонких диффузных каналов привязанных к катодным пятнам. Диффузные каналы образуются за счет ударных волн, формируемых в прикатодной плазме за счет взрывных процессов в сильном электрическом поле  $E = 10^6$  В/см.

**Вклад автора.** Личный вклад автора в работы, на основе которых написана диссертация, является определяющим. Постановка задачи, результаты экспериментов и расчетов, представленные в диссертации, анализ всего цикла работ, выводы диссертации и основные положения, выносимые на защиту, выполнены совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов исследования и публикации.**

Результаты, содержащиеся в настоящей диссертационной работе, докладывались на V Всероссийской конференции по физической электронике (Махачкала, ДГУ 2008); на Международной конференции по Волновой

электродинамике проводящей жидкости (Ярославль, 2009); на II Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов Российских вузов» (Томск, 2009) на XXXVII Международной (Звенигородская) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2010); а также на научных семинарах ДГУ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; содержит 180 страниц, включая 40 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 162 наименований.

### Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные задачи и цели исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна полученных результатов. Приводится краткое содержание диссертации.

**В первой главе**, состоящей из 4 параграфов, приводится обзор работ, в которых получены экспериментальные и теоретические результаты, описывающие формирование таунсендовского, стримерного и объемного разрядов в газах высокого давления. Особое внимание уделяется как моделям, описывающим начальные стадии пробоя, так и формированию объемного разряда и его контракции в искровой канал.

Отмечается, что широко применяемые электрофизические, оптические методы диагностики (спектральные, ФЭР и СФР-граммы и т.д.) в целом позволяют извлечь информацию о пространственно-временной структуре разряда, проследить переход одной формы разряда к другой, оценить параметры плазмы разряда и описать эти явления на основе различных моделей.

Описаны условия, определяющие режим формирования и стационарного горения ОР. Показано, что наличие предыонизации газа является одним из необходимых условий зажигания объемного разряда, длительность и устойчивость которого ограничивается неустойчивостями, возникающими в приэлектродных областях.

Для создания и поддержания устойчивого объемного разряда необходимо обеспечить однородность электрического поля межэлектродного пространства, создать высокий уровень предыонизации, удовлетворяющий условию перекрытия электронных лавин, уменьшить длительность высоковольтных импульсов, прикладываемых к промежутку, подобрать материал электродов для обеспечения однородной воспроизводимости вторичных электронов с катода.

**Во второй главе** диссертации приводится описание экспериментальной установки и методов измерений (электрические, оптические и спектральные) параметров плазмы импульсного разряда в He и в Ar атмосферного давления с высоким временным разрешением  $\approx 10$  нс. Диагностический стенд включает в себя вакуумную систему с остаточным давлением ( $\approx 10^{-3}$  Торр), спектрографы

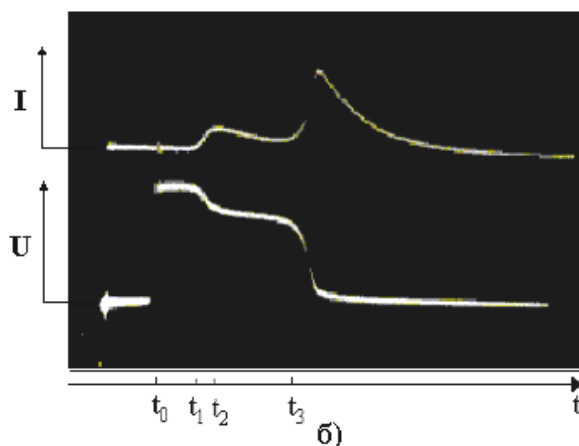
(СТЭ-1, ДФС-458 С), монохроматоры (ДМР-4, МДПС-3), генератор импульсов напряжения (амплитудой до 30 кВ и фронтом нарастания  $\approx 10$  нс), фотоумножители (ФЭУ-29, ФЭУ-30, ФЭУ-77, ФЭУ-79, ФЭУ-87), разрядные камеры с кварцевыми окнами, скоростные, цифровые и высоковольтные осциллографы (С8-14, С1-75, Актаком-2150, ОК-21), систему синхронизации (ГИ-1) и предыонизации (создаваемое плотность электронов  $n_0 \approx 10^7 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ ). Здесь же приводится описание фотоэлектрического метода записи спектра излучения разряда с временным разрешением  $\approx 10$  нс. Обосновываются также основные методики измерений, и анализируются их погрешности.

**В третьей главе** диссертации рассматриваются современные представления о развитии начальных стадий электрического пробоя газов высокого давления. Представлены результаты исследования влияния таких начальных условий как прикладываемое поле, так и интенсивность иницирующих факторов на развитие разряда в инертных газах (He, Ar) высокого давления. Представлена общая картина динамики развития ионизационных процессов, определены параметры плазмы на начальных стадиях формирования разряда в различных газах. Рассмотрены волновые процессы на этих стадиях (§3.1).

Характерные осциллограммы пробойного импульса в согласованном режиме питания в Ar и характерные осциллограммы тока и напряжения на промежутке в He при различных начальных условиях представлены соответственно на рис.1 и рис.2.



**Рис.1.** Осциллограмма импульса напряжения в Ar,  $R=2\rho_0$ . Метка – 100 нс,  $U_{пр}=9$  кВ,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см.



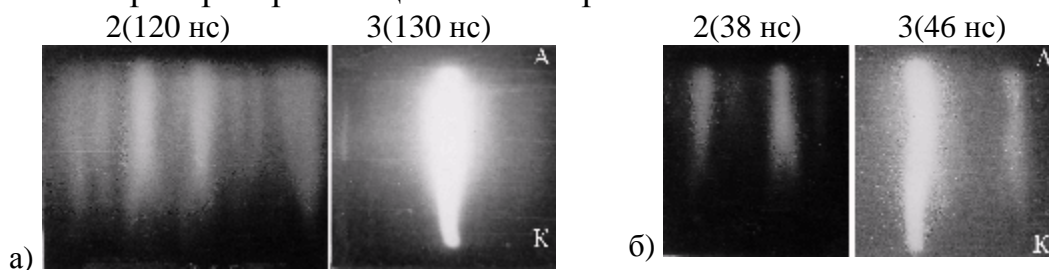
**Рис.2.** Характерные осциллограммы тока и напряжения на промежутке в He,  $U_0 = 9$  кВ,  $p = 3$  атм,  $d = 1$  см.

Из оптических картин (см. рис.3) формирования стримерного пробоя в гелии определены зависимости скорости распространения стримерного канала как от пробойного напряжения, так и от давления. Кроме того, динамические картины свечения промежутка позволили определить наличие двух ионизационных фронтов в гелии:

- первый фронт (начальная стадия), регистрируемый с началом резкого спада напряжения, распространяющийся со скоростью  $10^7 - 10^8$  см/с в зависимости от пробойного напряжения;



- второй фронт - искровой канал, регистрируемый со вторым спадом напряжения и распространяющийся со скоростью  $10^6$  см/с.



**Рис. 3. Последовательные стадии развития плазменной области в гелии при полях 10 кВ/см (а) и 14 кВ/см (б) ( $p=1$ атм,  $d=1$  см, He).**

Экспериментально измерены предпробойные токи для таунсендовского и стримерного механизмов пробоя в He и Ar, изучены особенности формирования ионизационных фронтов и искрового канала для этих механизмов.

На основе решения системы уравнений, описывающих стационарную плоскую волну ионизации, получено аналитическое выражение для скорости распространения фронта волны ионизации в Ar, значение которой удовлетворительно согласуется со значением скорости, полученной экспериментально. Показано, что процесс ионизации в волне, имеющего конечные поперечные размеры, поддерживается поверхностной электромагнитной волной, распространяющейся вдоль канала. Рассчитаны значения концентрации электронов и напряженности поля на фронте ионизационной волны в аргоне. При этом концентрация электронов за фронтом волны совпадает со значением концентрации, полученной из экспериментальных данных.

В §3.1 так же показано, что на начальных стадиях формирования стримерного пробоя, обусловленных распространением ионизационных фронтов, значение тока в He на порядок превышает аналогичные значения тока в Ar. Этим и объясняется образование ступеньки на кривой импульса напряжения в He. Кроме того в He для создания концентрации электронов  $\sim 10^{13}$  см $^{-3}$  требуется значительно больше энергия, чем в Ar. Распределенная в пространстве энергия поля не может обеспечить такую концентрацию и по этой причине с ростом тока происходит расслаивание разряда на узкие каналы, чего не наблюдается в Ar. Различие в скоростях распространения фронтов ионизации в He и в Ar объясняется различием в геометрии фронтов и величиной потока энергии в зону ионизации.

Фронт волны ионизации, формирующий начальные стадии стримерного пробоя в He оказывается неустойчивым при превышении определенного значения энерговклада в разряд.

В §3.2 обсуждаются экспериментальные и теоретические результаты по развитию неустойчивости фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя в гелии атмосферного давления. Здесь же показано, что отличительной особенностью стримера является его неустойчивость,

закрывающая в способности по мере продвижения стримера к ветвлению. Экспериментально показано, что ветвление катода направленного стримера не происходит при достижении им некоторого критического размера и развивается быстрее, чем стример достигает противоположного электрода.

Экспериментально определены критические размеры стримера  $l_{кр}$ , при которых происходит ветвление. В частности, при  $U_0=10$  кВ критическая длина составляет  $l_{кр} \approx 7$  мм, а при  $U_0 = 14$  кВ –  $l_{кр} \approx 5$  мм. С ростом величины прикладываемого поля уменьшается критическая длина стримера, при которой происходит ветвление, а также время ветвления, а также дано качественное обоснование физического механизма этого процесса.

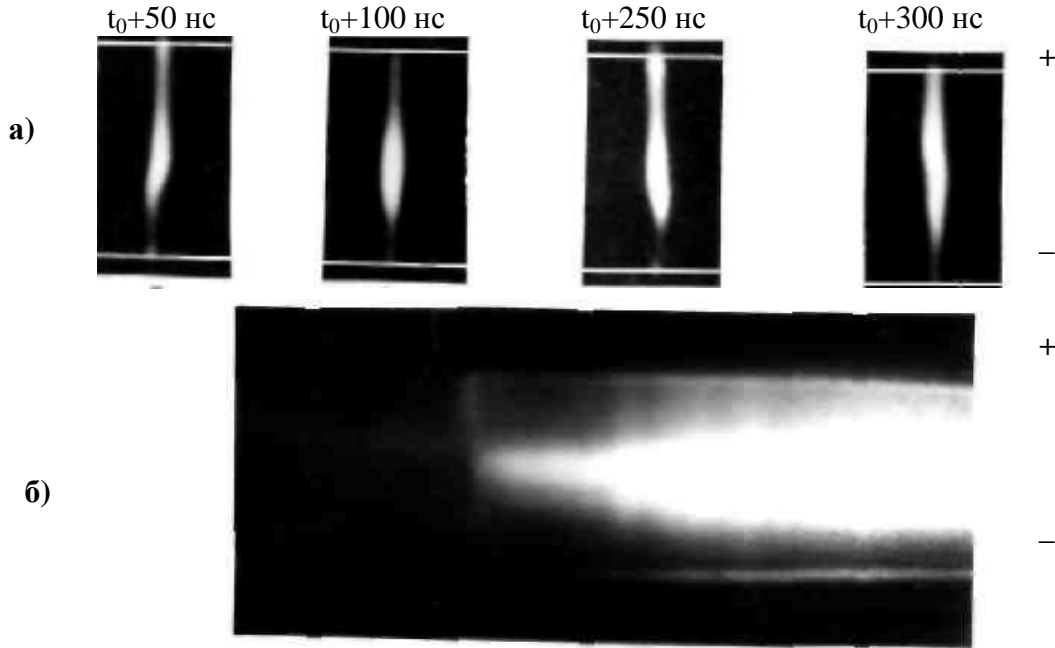
Действительно, из пространственно-временных картин формирования стримерного пробоя (см. рис.3) видно, что распределение свечения по сечению стримерного канала неравномерное, обусловленное наличием градиента плотности зарядов в радиальном направлении. Наличие такого градиента, прежде всего, обусловлено неоднородностью распределения внешнего электрического поля по сечению промежутка (использовались алюминиевые электроды с радиусом кривизны  $\approx 30$  см). Поэтому, из условия непрерывности полного электрического тока, как на головке, так и на боковой поверхности следует, что амплитуда поля внутри стримерного канала с размытыми границами возрастает при переходе от центра к периферии, а концентрация электронов, наоборот, падает. Именно там создаются условия для зарождения очагов повышенной концентрации плазмы. В усиленном поле происходит интенсивная ионизация, приводящая к появлению возмущения плотности зарядов и соответственно к неустойчивости поверхности фронта ионизации катода направленного стримерного канала.

В §3.3 описаны особенности формирования и развития начальных стадий импульсного пробоя в Ar атмосферного давления. В частности, представлены экспериментальные результаты формирования и развития начальных стадий импульсного пробоя в Ar при таунсендовском и стримерном механизмах пробоя для различных начальных условий. Показано, что стримерный канал в аргоне инициируется ярким свечением (см. рис.4), появляющемся в точке критического усиления лавины на различных расстояниях от катода в зависимости от перенапряжения. Экспериментально измерены предпробойные токи для таунсендовского и стримерного механизмов пробоя и изучены особенности формирования искрового канала для этих механизмов.

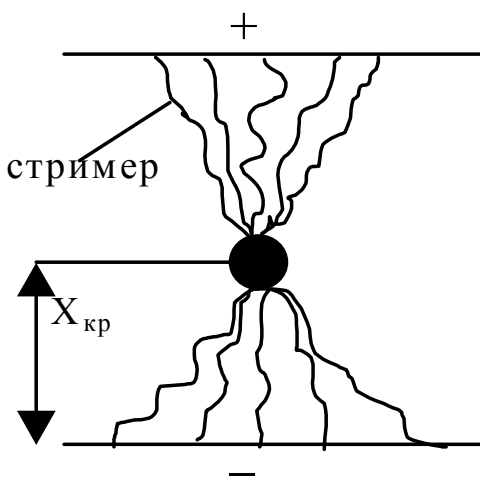
Действительно с появлением яркого свечения в точке перехода лавины в стример резко возрастает энерговыделение в этой точке, вследствие чего происходит взрывообразное расширение этой области.

Чтобы обеспечить экспериментально наблюдаемую плотность тока это свечение должно замыкаться на электроды не менее десятками стримерных каналов (см. рис.5).

Наличием множества стримеров (последовательности стримеров) можно объяснить и слабую интенсивность свечения катодных пятен (см. рис.4а).



**Рис.4. Фотографии свечения в промежутке ( $E/p=14$  В/см<sup>2</sup>Торр):**  
 а) свечение в различные моменты времени;  
 б) фотографии непрерывной щелевой разветки.



**Рис.5. Схема стримеров в аргоне.**

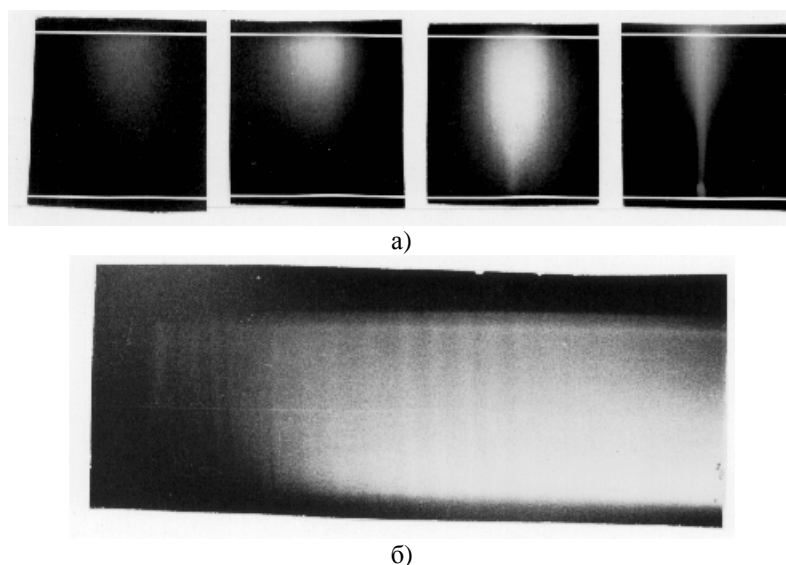
Значение плотности тока в области яркого свечения на порядок превосходит значение плотности тока в стримерных каналах ( $\sim 10^2$  А/см<sup>2</sup>). Отсюда так же следует, что яркое свечение замыкается на электроды десятками стримерными каналами.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что в рамках модели, описывающей одиночный стример, не могут быть объяснены следующие факты:

- появление яркого свечения, инициирующего искровой канал, на расстоянии, равном  $x_{кр}$  от катода;
- слабая интенсивность свечения катодных пятен;
- несоответствие измеренного значения времени формирования, вычисленному, по формуле стримерного пробоя  $t_{\phi} = \ln N_{кр} / au_-$ ;
- высокая плотность тока в области свечения ( $10^3$  А/см<sup>2</sup>).

Действительно, модель трансформации одиночного стримера в искровой канал предполагает нарастание проводимости плазмы по всей длине стримера, соответственно однородная по длине интенсивность свечения.

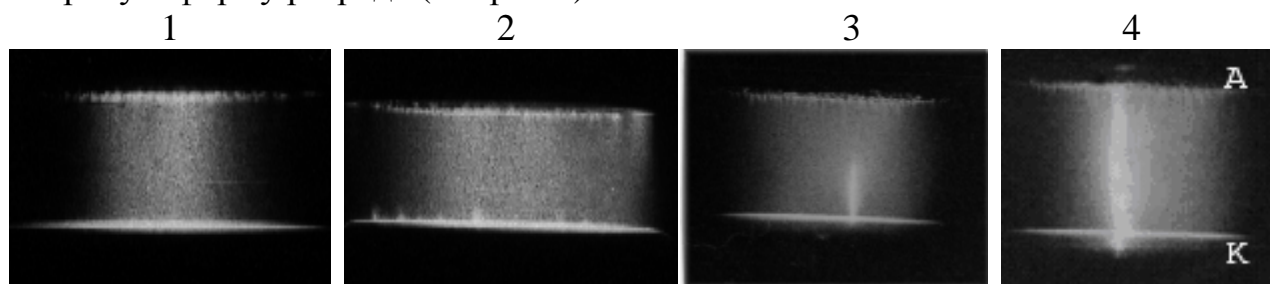
Анализируются так же результаты формирования разряда в аргоне в условиях интенсивной предыонизации (см. рис.6 а,б). Формирование ОР имеет две характерные стадии.



**Рис.6. Пространственно-временные картины формирования искрового канала в аргоне при наличии предыонизации газа в промежутке. Анод - сверху, катод - снизу ( $d = 1$  см;  $p = 760$  Торр;  $U_{сн} = 6,8$  кВ).**

В первой стадии волна ионизации (фронт свечения) переключает промежуток со скоростями  $10^7 - 10^8$  см/с (10-100 нс) в зависимости от начальных условий эксперимента. При этом ток разряда, протекающий в плотной плазме волны ионизации, замыкается током смещения в оставшейся части промежутка. Вторую стадию разряда (особенно в He) можно отнести к аномальному тлеющему разряду с высокой удельной мощностью энерговода.

Во время второй стадии напряжение на промежутке уменьшается, а в эмиссии электронов из катода могут участвовать катодные пятна, образовавшиеся в результате взрывной эмиссии электронов. При увеличении амплитуды напряжения и удельной мощности энерговода ОР переходит в искровую форму разряда (см. рис.7).



**Рис.7. Интегральные картины свечения промежутка: 1 -  $U_0=4$  кВ; 2 - 6 кВ, 3 - 7 кВ; 4 - 10 кВ (He,  $d = 1$  см,  $p=1$  атм).**

Результаты выполненных исследований можно суммировать следующим образом:

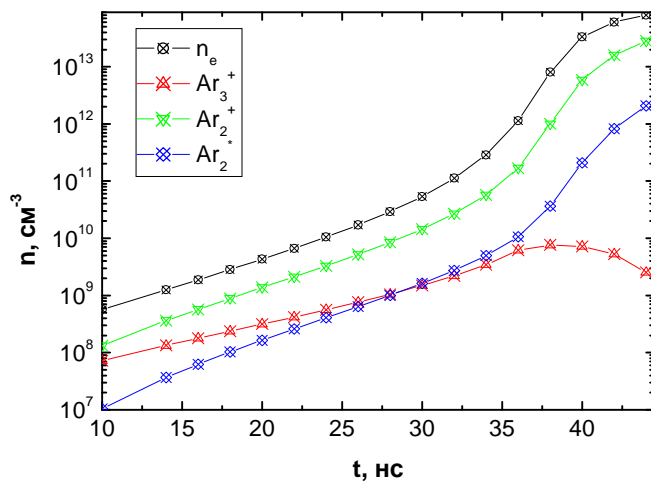
1. Способ инициирования начальных электронов определяет пространственную структуру разряда на стадии формирования и структуру разряда на более поздней стадии коммутации. Равномерное распределение начальных электронов в промежутке обеспечивает объемное протекание тока.

2. Процесс протекания объемного разряда можно разделить на следующие этапы: формирование, режим стационарного горения, распад или

образование искрового канала. Все эти стадии импульсного пробоя взаимосвязаны и естественным образом переходят одна в другую.

В §3.4 анализируются результаты детального исследования кинетики образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда в Ar высокого давления и выяснена роль процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда, а также обоснованы и разработаны вычислительные алгоритмы для его моделирования.

Расчеты проводились в аргоне при атмосферном давлении в сантиметровой промежуток для  $U_0 = 9$  кВ, с концентрацией электронов предыонизации  $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ .



**Рис.8.** Характерные временные зависимости концентрации электронов, молекулярных ионов  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$ , а также эксимерных молекул аргона  $Ar_2^*$ .

Роль эксимерных молекул  $Ar_2^*$  в общей кинетике разряда не существенна. Основным каналом, приводящим к образованию таких молекул является конверсия.

**Четвертая глава** посвящена результатам исследования роли взрывных процессов на стадии формирования разряда. Рассматриваются разряды при различных начальных условиях и в различных газах.

Физические процессы, протекающие в прикатодной области импульсных разрядов рассмотрены в § 4.1. Показано, что процесс контракции состоит из трех последовательных стадий: а) явлений, предшествующих микровзрыву; б) собственно микровзрыв и образование плазменного сгустка; в) прораствание канала.

В приэлектродной области разряда неизбежно формируется высокое значение напряженности поля, которое растет с ростом плотности тока вблизи катода. В конечном итоге это приводит к переходу от однородной формы горения к контрагированному разряду. Показано, что катодный слой неустойчив к флуктуациям плотности тока разряда. В результате развития неустойчивости плотность тока на отдельных участках катода возрастает, при

На рис.8 представлены характерные временные зависимости следующих компонент плазмы: электронов  $n_e$ , молекулярных ионов  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$ , а также эксимерных молекул аргона  $Ar_2^*$ .

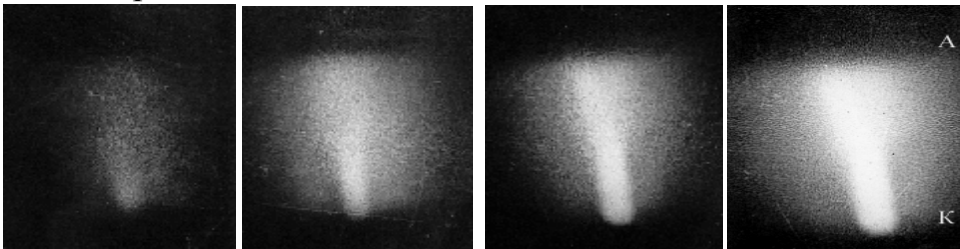
При этом относительная концентрация эксимеров  $Ar_2^*$  существенно выше характерных концентраций эксимеров  $Ar_2^{**}$ . Эксимеры  $Ar_2^*$  могут служить эффективными резервуарами для вкладываемой энергии.

этом уменьшается катодное падение потенциала, а напряженность поля  $E_k$  на катоде продолжает нарастать с ростом  $j$ , хотя и медленнее, чем в отсутствие автоэмиссии. Именно это и является предпосылкой дальнейшего увеличения тока автоэмиссии и последующего перехода автоэлектронной эмиссии во взрывную.

В различных типах разрядов пробой инициирует взрывные процессы в объеме, а в других взрывные процессы на электродах (в основном на катоде). И в зависимости от этого дальнейшие стадии разряда протекают по-разному. Формирование искрового канала в различных газах имеет свои особенности. Попытки объяснения этих процессов в рамках единой модели не всегда продуктивны, и во многих случаях, несмотря на внешнее сходство, физические процессы, лежащие в основе этих явлений различны. Единственное, что их объединяет это взрывообразный характер протекания этих процессов.

В §4.2 представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования и прорастания искрового канала в аргоне (см. рис.6) и в гелии (см. рис.9). Изучены механизмы прорастания искрового канала из катодного пятна. Причиной образования контрагированного канала служит развитие неустойчивости, которая нарушает однородность протекания тока в катодном слое. Роль инициирующих факторов при этом играют катодные и анодные пятна. С увеличением прикладываемого поля число катодных пятен и соответственно число нитевидных каналов увеличивается.

Известно также, что несмотря на высокую проводимость, поле в канале остается высоким, соответственно выше и плотность энергии, выделяемой в канале. Образование высокопроводящего канала создает необходимые предпосылки для его самоподдержания. С увеличением области, занятой каналом, увеличивается поле внутри канала, и процесс контракции разряда становится необратимым.



**Рис. 9. Покадровые картины (ЭОПограммы) формирования и прорастания искрового канала для величин  $U_0 = 9$  кВ,  $p=3$  атм,  $d=1$  см.**

Рассматривается подход, основанный на предположении, согласно которому катодное пятно вносит искажение в распределение электрического поля в столбе вблизи пятна. Тогда в усиленном поле происходит ударная ионизация и за счет роста проводимости потенциал вновь вытесняется из более ионизированной области в столб разряда. Так происходит распространение волны ионизации. Описываемая трактовка распространения волн ионизации предполагает, что увеличение проводимости на фронте происходит за счет размножения электронов при их соударении с нейтральными частицами.

В условиях интенсивной предварительной ионизации горение объемного разряда ограничивается катодным пятном, с образованием которого ток разряда резко возрастает. Данное обстоятельство хорошо подтверждается как результатами исследования электронно-оптических характеристик с использованием ФЭР-2 (см. рис.10), так и наличием в спектре излучения плазменного факела на катоде линий паров материала вещества электродов.

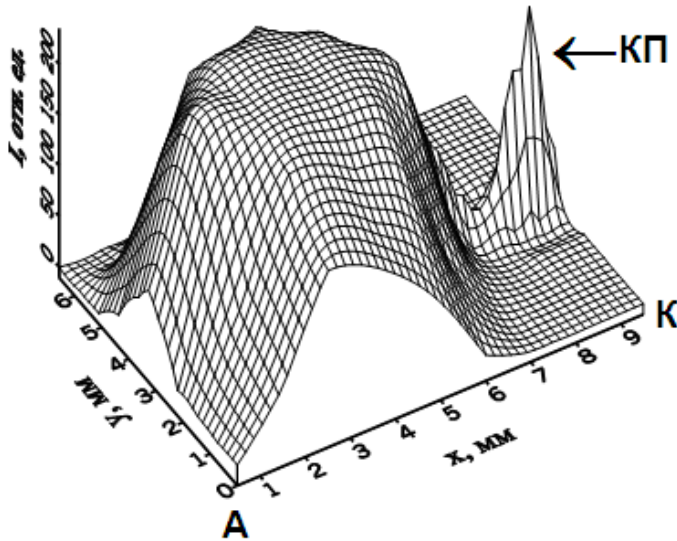


Рис. 10. Картина распределения интенсивности излучения (в отн.ед.) в промежутке как вдоль поля, так и поперек электродов. Здесь,  $x$  – координата, меняющаяся вдоль электродов,  $y$  – поперек электродов, А – анод, К – катод, КП – катодное пятно,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см

Таким образом, обсуждаемые результаты показывают, что в широком диапазоне плотностей токов и длительностей горения разряда процесс контракции происходит за счет прорастания высокопроводящих каналов со стороны электродов ( $v_k \approx 10^6$  см/с). При этом роль инициирующих факторов для развития процесса контракции играют катодные и анодные пятна.

Результаты развитие ОР при больших перенапряжениях и больших удельных энергозатратах представлены в §4.3. По спектрам излучения прикатодной плазмы и по пространственно-временным картинам развития тела свечения изучен процесс расширения плазмы катодного пятна и формирование ударных волн, приводящих к образованию диффузных каналов, привязанных к катодным пятнам в импульсных объемных разрядах (ОР) в гелии при изменениях давления газа в диапазоне 1-5 атм и прикладываемых напряжений от статистического пробивного до сотни процентов перенапряжений в сантиметровых промежутках.

Так как расширение плазмы КП происходит со скоростью намного превышающей скорость звука, то на фронте волны происходит значительный рост температуры, и фронт ионизации переносится со скоростью волны. Характерное время формирования КП при высоких перенапряжениях ( $W \geq 300\%$ ) составляет значение  $\sim 10^{-9}$  с, что намного меньше, чем время его расширения.

Распространение ударной волны, инициированной катодным пятном по столбу разряда (слабоионизованной плазме), естественно, вызовет рост ионизации и формирование диффузного канала разряда, вдоль которого в последующем прорастает искровой канал, а при значительных

перенапряжениях ( $W \geq 300\%$ ) объемный разряд в He преобразуется в сильноточный диффузный режим.

О взрывном характере образования КП (время выделения энергии плазмы) говорит и тот факт, что радиальное расширение плазмы очень быстро прекращается. Если бы выделение энергии в плазме пятна продолжалось бы, то расширение происходило бы значительно дольше. Скорость же распространения вдоль плазменного столба выше, чем в невозмущенном газе (в радиальном направлении), т.е. фронт волны сферически не симметричен. Это объясняется тем, что температура газа в слабоионизованном столбе больше чем температура окружающего газа. А ударная волна является дополнительным источником нагрева газа в диффузном канале.

Анализ экспериментальных результатов перехода диффузного ОР в контрагированный разряд и в СДР при изменении давлений в диапазоне 1-5 атм и прикладываемых напряжений от статического пробойного (напряжение статического пробойного при давлении  $p=1$  атм и длине промежутка  $d=1$  см составляет  $U_s=3$  кВ) до сотни процентов перенапряжений показывают, что увеличение энергоклада в разряд приводит к контрагированию ОР в искровой канал при критическом значении отношения  $E/p \approx 13$  кВ/атм·см (см. рис.11, фото 3). На всех остальных интегральных картинах с ростом давления (при давлениях  $p = 2$  и  $3$  атм в условиях эксперимента) разряд горит однородно и диффузно, т.к. приведенные значения отношения  $E/p$  с ростом давления при тех же полях оказываются малыми, существенно не достигающими критической величины  $E/p \approx 13$  кВ/атм·см (см. рис.11, верхний электрод - катод).

В рамках сферически симметричной модели получены аналитические выражения для расчета радиуса плазмы катодного пятна (1) и скорости его расширения, удовлетворительно согласующихся с экспериментальными данными на начальном этапе расширения КП:

$$r(t) \approx \left[ \left( \frac{g+1}{2g} \right)^{1/2} \left( \frac{3g+2}{2} \right) \cdot r_{\max}^2 \cdot c \cdot t + r_0^2 \right]^{\frac{2}{3g+2}}. \quad (1)$$

Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных следует, что наилучшее совпадение радиуса плазмы катодного пятна имеет место при  $r_0 \approx 1 \cdot 10^{-6}$  м. В рамках рассматриваемой модели процесс расширения катодного пятна считается адиабатическим.

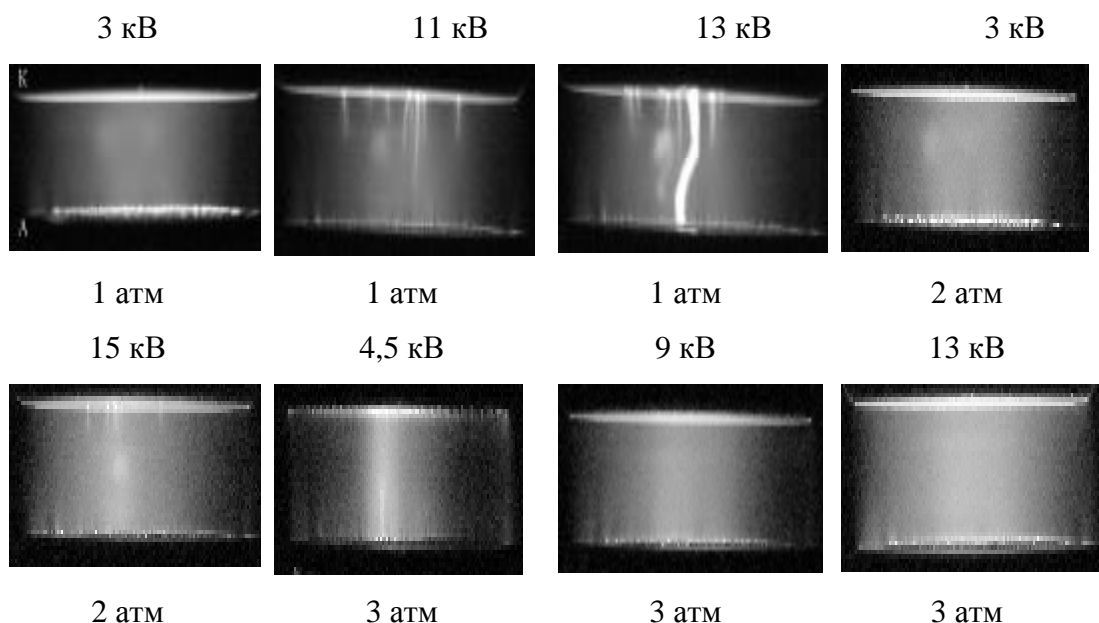
На рис.12 приведена характерная зависимость скорости расширения плазмы катодного факела от времени, определенная с использованием системы щелей, а так же из динамических картин свечения промежутка, полученных с помощью ЭОП.

Из рис.12 следует, что со временем скорость разлета плазмы катодного пятна уменьшается.

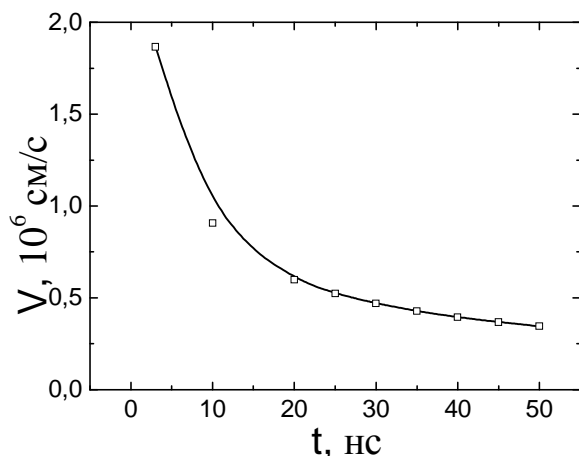
Таким образом, расширяющаяся плазма КП формирует ударную волну, которая переносит фронт ионизации.



Ударная волна, распространяющаяся вдоль направления электрического поля, является дополнительным источником нагрева газа в предискровом диффузионном канале.



**Рис. 11.** Интегральные картины свечения промежутка при различных начальных условиях. Электроды с межэлектродным расстоянием  $d=1$  см из нержавеющей стали (катод – сплошной, анод – сетчатый)



**Рис. 12.** Скорость расширения плазмы катодного факела в гелии для величин  $U = 9$  кВ,  $p = 1$  атм,  $d=1$  см.

В §4.4 рассмотрены результаты развития объемного разряда в аргоне при больших перенапряжениях и больших удельных энергозатратах. Плотность тока в сильноточном диффузном разряде составляет  $\sim 10^3$  А/см<sup>2</sup> и намного меньше чем в искровом канале, и слабо зависит от прикладываемого поля. Длительность горения сильноточного диффузного разряда в аргоне и гелии составляет  $\sim 10^{-6}$  с.

В согласованном режиме питания СДР горит при постоянном напряжении и плотности тока. Проводимость плазмы разряда 30-40 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, соответствует температуре электронов  $T_e=10000-15000$  К, которая в три-четыре раза меньше температуры плазмы искрового канала. А концентрация электронов, определенная по плотности тока и напряжению горения  $n_e \sim 10^{16}-10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. По измеренным значениям предпробойных токов для таунсендовского и стримерного разрядов и по пространственно-временной динамике формирования пробоя обобщены качественные представления о развитии начальных стадий искровых разрядов в инертных газах (He, Ar), позволяющие объяснить механизмы и скорости их распространения при различных давлениях и энерговкладах. На основе экспериментальных результатов уточнена граница по напряжению, выше которой происходит смена механизма пробоя от таунсендовского к стримерному. Показано, что стримерный канал в Ar инициируется флуктуацией, возникающей в точке критического усиления лавины на различных расстояниях от катода в зависимости от перенапряжения.

2. Получены экспериментальные и теоретические результаты по развитию неустойчивости фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя в гелии атмосферного давления. Впервые в He экспериментально обнаружено явление ветвления катодонаправленного стримера в коротких перенапряженных промежутках, а также дано качественное обоснование физического механизма этого процесса. Экспериментально определены критические размеры стримера  $l_{кр}$ , при которых происходит ветвление и показано, что с ростом величины энерговклада в разряд уменьшается как критическая длина стримера, при которой происходит ветвление, так и время ветвления стримера.

3. Проведено систематическое исследование оптических, спектральных и электрических характеристик импульсных разрядов в инертных газах (He, Ar) высокого давления и выявлены основные закономерности формирования ионизационных фронтов и искрового канала в различных видах разрядов: таунсендовском, стримерном и объемном в диапазоне напряжений от статического пробойного до перенапряжений в сотни процентов. Появление катодного пятна инициирует волну ионизации в плазме, которая распространяется от катода к аноду в виде узкого канала. Если проводимость диффузного канала достаточно велика, то процесс контракции становится необратимым, и объемная форма горения разряда переходит в канальную. Недостаточная проводимость плазмы в канале допускает одновременное сосуществование канальной и объемной формы протекания тока через разряд (СДР).

4. На основе экспериментальных данных и теоретических расчетов при значительных перенапряжениях ( $W \geq 300\%$ ) предложен механизм зажигания необычной формы объемного горения разряда - сильноточный диффузный режим, в котором практически отсутствует контракция и который формируется за счет перекрытия тонких диффузных каналов привязанных к катодным пятнам. Диффузные каналы образуются за счет ударных волн, формируемых в прикатодной плазме за счет взрывных процессов в сильном электрическом поле  $E = 10^6$  В/см.

5. Детально изучена кинетика образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда в Ar высокого давления и выяснена роль процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $Ar_2^+$  и  $Ar_3^+$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда, а также обоснованы и разработаны вычислительные алгоритмы для его моделирования.

**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. *Ахмедова Х.Г., Курбанисмаилов В.С., Катаа Али Дж.* Характеристики фотоплазмы в воздухе. //В сб.: Материалы V Всероссийской конференции по Физической электронике. Махачкала. 2008. С.96-99.

2. *Курбанисмаилов В.С., Баурханова М.Г., Омаров О.А., Катаа Али Дж., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Неустойчивость фронта волны ионизации катодонаправленного стримера в гелии высокого давления. //Прикладная физика. 2009. №5. С.62-66.

3. *Курбанисмаилов В.С., Баурханова М.Г., Омаров О.А., Катаа Али Дж., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Процессы расширения катодного пятна и формирование ударных волн в плазме объемного разряда в гелии атмосферного давления. //В сб.: Тез. докл. VIII Международной конф. по Волновой электрогидродинамике проводящей жидкости. Долгоживущие плазменные образования и малоизученные формы естественных электрических разрядов в атмосфере. Ярославль. 2009 г.

4. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Катаа Али Дж.* Взрывные процессы на электродах и их роль в контрагировании объемного разряда в гелии высокого давления. //В сб.: докл. II Всероссийской научно-практической конф. «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов Российских вузов». Томск, 2009. С.264-272.

5. *Курбанисмаилов В.С., Арсланбеков М.А., Омаров О.А., Катаа Али Дж.* Развитие объемного разряда в гелии при больших давлениях и перенапряжениях. //Тез. докл. XXXVII Международной (Звенигородская) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2010.

6. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Баурханова М.Г., Катаа Али Дж., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Особенности формирования и развития начальных стадий импульсного пробоя в аргоне. //Прикладная физика. 2010. №5. С.56-64.

Подписано к печати 18.06.2011.

Формат 60x84 1/16. Печать ризографная. Бумага №1. Гарнитура Таймс.

Усл. Печ. л. – 1,25. Заказ – 264 – 06. Тираж 100 экз.

Издательско-полиграфический центр ДГУ

Махачкала, ул. М. Ярагского, 59-а.