

На правах рукописи

Земченкова Надежда Вячеславовна

ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА ИЗ ОБЛАСТИ РАЗРЯДА ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,
доцент Прохорович Дмитрий Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Вихрев Виктор Викторович

доктор технических наук,
профессор Гришин Юрий Михайлович

Ведущая организация Физический институт имени П. Н. Лебедева
Российской академии наук

Защита состоится 21 сентября 2011 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в конференц-зале К-608 в НИЯУ «МИФИ» по адресу: 115409 Москва, Каширское шоссе 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан _____ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Евсеев И.В.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Импульсные электрические разряды, в которых реализуется режим микропинчевания, уже достаточно длительное время являются предметом интенсивных исследований, что обусловлено широким кругом научно-прикладных задач (от осуществления управляемого термоядерного синтеза до разработки селективных источников коротковолнового линейчатого излучения), для решения которых необходимо использование высокотемпературной плотной плазмы.

Предметом исследования в данной работе является разряд вакуумной искры (ВИ), плазмообразующим элементом в котором служит материал эродирующих электродов (железо). Режим микропинчевания осуществляется при величине тока разряда, превышающей критическое значение (приблизительно 50 кА для плазмы железа), определяемое балансом между потерями энергии на излучение и джоулевым тепловыделением в перетяжке плазменного канала. В разрядах ВИ микропинчевую область принято называть плазменной точкой (ПТ). По данным многочисленных экспериментальных исследований ПТ является короткоживущим ($\tau \leq 1$ нс) плазменным объектом малого размера ($r \leq 10$ мкм) с высокими температурой ($T_e = 1 - 2$ кэВ) и электронной плотностью ($n \geq 10^{21}$ см⁻³).

Традиционно сильноточный разряд ВИ рассматривается в качестве лабораторного источника вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения, а также в качестве объекта для моделирования процессов в плазме тяжёлых элементов крупномасштабных устройств типа Z-пинч с токами на уровне десятков МА. При этом считается, что сильноточный разряд ВИ не является эффективным источником ионов, а для продвижения на пути создания приемлемого для решения различных прикладных задач источника ионов более перспективны так называемые слаботочные (достигаемый ток в разряде менее 10 кА) импульсные электрические разряды. Однако для создания горячей плазмы высокой плотности, в которой возможно рождение ионов высокой кратности

сти, весьма привлекателен механизм радиационного сжатия, реализуемый в сильноточных импульсных разрядах. Неоспоримым преимуществом сильноточного разряда ВИ по сравнению с такими сильноточными электроразрядными устройствами как плазменный фокус в среде тяжелых элементов, Z-пинч с импульсным напуском газа и взрывающиеся проволочки является относительная простота конструктивного решения и эксплуатации. Этим обстоятельством продиктована необходимость исследования возможности реализации процесса радиационного сжатия плазмы в разряде ВИ совместно с созданием условий для эффективной транспортировки ионов за пределы разрядной области.

Отметим также, что получение информации о механизмах формирования и разрушения плазмы как в межэлектродном промежутке, так и за его пределами, и экспериментальных результатов о параметрах корпускулярных потоков из области разряда ВИ является актуальной задачей на пути создания импульсного источника ионов, а также немаловажно для создания эффективной защиты экспонируемого объекта от потоков плазмы и нейтралов в схеме рентгенолитографии и других практических приложений плазмы разряда ВИ.

Цель работы. Исследование пространственной структуры плазмы разряда вакуумной искры и параметров ионной эмиссии, изучение влияния различных факторов на динамику разряда и корпускулярные потоки, формирующиеся в разряде. Оптимизация конструкции электроразрядного устройства и режимов горения разряда вакуумной искры с целью увеличения среднего заряда частиц в потоке вещества из области межэлектродного промежутка.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

– получена информация о структуре и динамике плазмы в разряде вакуумной искры при использовании внешних электродов с различной пропускной способностью осевого отверстия методом теневого фотографирования;

– при использовании различных конструкций внешних электродов в разряде вакуумной искры времяпролетным методом получены распределения ионов по скоростям в осевом и радиальном направлениях, при увеличении пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода обнаружено изменение

углового распределения эмитируемых из разряда высокоэнергетичных ионов и электронов;

– зондовым методом выявлена зависимость электронной температуры в осевых плазменных потоках от тока разряда вакуумной искры. Показано, что увеличение пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода приводит к росту электронной температуры;

– зафиксирован значительный рост среднего заряда, приходящегося на одну частицу в эмитируемых плазменных потоках, при увеличении пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода.

Научная и практическая значимость работы

1. Комплексное применение относительно простых диагностических методов дало возможность связать характеристики корпускулярной эмиссии с процессами в межэлектродном промежутке.

2. Обнаружен факт образования перетяжки токового канала в продуктах эрозии внутреннего электрода. Эрозия внешнего электрода дает вклад, главным образом, в образование периферийной холодной плазмы, препятствующей выходу за пределы разряда ионов высокой кратности ионизации. Увеличение пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода уменьшает экранирование области высокотемпературной плазмы массами плотной холодной плазмы на периферии разряда.

3. Применение технических решений, связанных, во-первых, с минимизацией роли внешнего электрода в формировании рабочей среды разряда путем трансформации его формы и размеров, и, во-вторых, с использованием внутреннего электрода отрицательной полярности, т.е. с использованием эффекта формирования потока надтепловых электронов, направленного в сторону внешнего электрода, позволило улучшить условия транспортировки ионов за пределы разряда. Совокупность полученных результатов позволяет рекомендовать сильноточный разряд вакуумной искры в качестве эмиттера ионов для создания импульсного ионного источника.

Автор выносит на защиту следующие, содержащие научную новизну, основные результаты:

1. Информацию о структуре и динамике плазмы в разряде вакуумной искры при использовании внешних электродов с различной пропускной способностью осевого отверстия.

2. Результаты регистрации и анализа распределений ионов по скоростям в осевом и радиальном направлениях при использовании внешних электродов с различной пропускной способностью осевого отверстия. Экспериментальные свидетельства «убегания» электронов в приосевой области разряда вакуумной искры.

3. Зависимость электронной температуры в осевых плазменных потоках от тока разряда вакуумной искры

4. Результаты экспериментального исследования среднего заряда, приходящегося на одну частицу в эмитируемых плазменных потоках, при использовании внешних электродов с различной пропускной способностью осевого отверстия.

Личный вклад автора заключается в сборке и настройке схем диагностики, планировании и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных результатов, участии в обсуждении и формулировке выводов по результатам работы, а также в анализе и обобщении литературных данных. Все выносимые на защиту результаты получены автором лично.

Апробация работы. Материалы, положенные в основу диссертационной работы, докладывались и обсуждались на Научных сессиях МИФИ (2008, 2010, г. Москва); XXXV, XXXVI, XXXVII и XXXVIII Международных (Звенигородских) конференциях по физике плазмы и УТС (2008, 2009, 2010, 2011, г. Звенигород, Моск. обл.); VI Российском семинаре «Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды» (2008, г. Москва); VIII Международном симпозиуме по радиационной плазменной динамике (2009, г. Москва), а также опубликованы в журнале «Физика плазмы».

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 13 печатных работах. Их список представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 145 наименований.

Содержание диссертации. Во введении дан краткий обзор электроразрядных устройств, в которых реализуется явление микропинчевания, представлены достигаемые в микропинчевых областях разряда ВИ параметры плазмы (размеры, время существования, электронная концентрация, температура), отмечены возможности практического применения разрядов ВИ. Обозначены методы исследования плазмы разрядов ВИ, получившие наиболее широкое распространение во многих исследовательских коллективах. Указано на недостаточную роль корпускулярных методов в диагностике пинчующихся разрядов. Обоснована актуальность темы диссертации и сформулирована цель работы.

В главе 1 дано описание разряда вакуумной искры и рассмотрены различные типы его инициирования, проведен обзор литературных источников, посвященных диагностике плазмы разрядов вакуумной искры, в том числе, явлению микропинчевания. Рассмотрены теоретические модели явления микропинчевания и механизмы образования ускоренных частиц, а также вопросы, связанные с возможными практическими применениями разрядов вакуумной искры. Сформулирована постановка задачи в рамках данной диссертационной работы.

Электроразрядное устройство, в котором реализуется разряд ВИ, представляет собой цилиндрический внешний электрод (катод) с плоским основанием, обращенным в сторону разрядной области, и острый (со стороны разряда) внутренний электрод (анод). Электроразрядное устройство размещается в вакуумной камере при давлении остаточных газов $10^{-4} - 10^{-5}$ Тор. Источником для поддержания тока в цепи разряда ВИ служит батарея импульсных высоковольтных конденсаторов. Напряжение, прикладываемое к межэлектродному промежутку в начальный момент времени значительно меньше величины статическо-

го пробивного напряжения этого промежутка при соответствующих вакуумных условиях. Это обстоятельство позволяет контролировать как момент зажигания разряда ВИ, так и величину энергии, вкладываемую в разрядный контур. Наиболее часто используемыми методами инициирования разряда ВИ являются триггерный (эрозионный разряд по поверхности дополнительного электрода, расположенного в непосредственной близости от межэлектродного промежутка) и лазерный (осуществляется посредством фокусировки излучения оптического квантового генератора на поверхности одного из электродов). Указанные методы инициирования разряда ВИ используют энергию внешнего источника питания. Известны также схемы инициирования, питаемые тем же источником энергии, что и сам разряд ВИ. Напряжение от емкостного накопителя энергии прикладывается к основному межэлектродному промежутку анод – катод и через электролитическое сопротивление к параллельно подключенному небольшому разрядному промежутку между катодом и дополнительным электродом. В результате инициируется пробой вспомогательного промежутка с образованием форплазмы.

Широкое распространение в диагностике плазмы разрядов ВИ получили лазерные методы – интерферометрия, теневое зондирование и фарадеевское вращение плоскости поляризации просвечивающего плазму лазерного излучения. Указанные методы позволили с высоким пространственным и временным разрешением провести исследования электронной плотности в электроразрядном промежутке, визуализировать динамику плазменного канала, получить распределения магнитных полей и токов в плазме разряда.

В частности показано, что плазменный канал разряда ВИ подвержен образованию перетяжек вдоль оси разрядной камеры. Минимальный радиус области развития перетяжки $r_{\min} = 100$ мкм достигается за 20 – 25 нс до минимума особенности производной тока, которая по времени совпадает с началом импульса жесткого рентгеновского излучения, свидетельствующего о формировании микропинчевой области.

Интерферометрические измерения позволили зафиксировать наличие относительно высокой электронной плотности ($n_e \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в периферийных областях плазмы разряда ВИ, что указывает на возможность протекания шунтирующих токов по периферийным областям и их влияние на процесс развития перетяжки (пинчевание) плазменного канала.

Характерной особенностью, присущей всем типам пинчевых разрядов, является развитие ускорительных процессов и эмиссия надтепловых частиц – электронов и ионов. При изучении параметров корпускулярной эмиссии из разряда ВИ обнаружено наличие потока ускоренных электронов с энергий до 300 кэВ. Показано, что появление указанного потока связано с возникновением квазистатических электрических полей, продолжительность существования которых $>10^{-8}$ с, что много больше времени разгона ($\sim 10^{-11} - 10^{-10}$ с) электронов до наблюдаемых энергий в межэлектродном пространстве разрядного устройства. Анализ пространственной структуры плазмы разряда, излучающей в рентгеновском диапазоне спектра, свидетельствует о том, что рождение высокоэнергетичных электронов происходит в области формирования микропинча. При этом кинетическая энергия надтепловых электронов сравнима по величине с тепловой энергией плазмы в микропинчевой области, и, следовательно, развитие ускорительных процессов способно оказать значительное влияние на динамику плазмы в процессе микропинчевания.

В разрядах ВИ, инициируемых лазерным излучением, обнаружена эмиссия многозарядных ионов. При этом в корпускулярных потоках, испускаемых из разрядов ВИ с триггерным инициированием в режиме микропинчевания, фиксируются преимущественно однозарядные ионы плазмообразующего элемента.

Наиболее исчерпывающую интерпретацию результатам экспериментальных исследований процессов, происходящих в плазме разряда ВИ, дает модель радиационного коллапса. В рамках указанной модели образование микропинчевой области является результатом двухстадийного сжатия, обусловленного высоким уровнем радиационных потерь плазмообразующего элемента и вытеканием плазмы из области перетяжки. Получаемые с использованием указанной

модели параметры плазмы в микропинчевых областях находят экспериментальное подтверждение. Однако за пределами своего рассмотрения модель радиационного коллапса оставляет процессы, приводящие к образованию потоков ускоренных частиц.

Краткий обзор теоретических моделей механизмов образования ускоренных частиц свидетельствует об их многообразии и о том, что общепринятой картины ускорительных процессов в микропинчевых разрядах до сих пор не существует.

Считается, что сильноточный разряд ВИ не является эффективным источником ионов, а для продвижения на пути создания приемлемого для решения различных прикладных задач источника ионов более перспективны так называемые слаботочные (достигаемый ток в разряде менее 10 кА) импульсные электрические разряды. Однако для создания горячей плазмы высокой плотности, в которой возможно рождение ионов высокой кратности, весьма привлекателен механизм радиационного сжатия, который проявляет себя как пороговый эффект по отношению к силе тока в разряде. В слаботочных разрядах условия для осуществления радиационного сжатия плазмы отсутствуют.

Материалы литературного обзора свидетельствуют о многообразии физических свойств плазмы разряда ВИ и о большом числе выполненных исследовательских работ, посвященных ее изучению. Подавляющее число исследований было направлено на изучение характеристик ПТ, а исследования параметров плазмы за пределами ПТ не отличаются многочисленностью. Имеющиеся в наличии достаточно отрывочные экспериментальные данные корпускулярных диагностик, как правило, не несут информации о процессах в плазме разряда ВИ, так как допускают самую широкую трактовку. Плодотворность использования методов корпускулярной диагностики, занимающих весьма скромное место в изучении процессов в плазме быстрого Z-пинча, очевидна, поскольку они позволяют получать непосредственную информацию о характеристиках частиц, составляющих изучаемый плазменный объект. Практические приложения плазмы разряда ВИ требуют информации о механизмах формирования и разруше-

ния плазменной структуры как в межэлектродном промежутке, так и за его пределами. Указанными обстоятельствами продиктована постановка задачи в рамках данной диссертационной работы.

В главе 2 приведено описание электроразрядного устройства и его вакуумной части, средств контроля режимов горения разряда, схемы визуализации процессов в межэлектродном промежутке, средств регистрации корпускулярных потоков из области разряда вакуумной искры.

Конструкция электроразрядного устройства приведена на рис. 1.

Электроразрядное устройство конструктивно представляет собой систему двух коаксиальных цилиндрических тоководов (внешнего и внутреннего) диаметрами 115 и 95 мм, соответственно, которые разделены капролактановым изолятором (3). На торце внутреннего токовода (1) располагался внутренний электрод (4) разрядного промежутка, а на торце внешнего обратного токовода (2) – внешний электрод (5). В процессе зарядки конденсаторной батареи внутренний электрод являлся катодом, а внешний – анодом. Внутренний электрод в виде сменной иглы диаметром 3 мм ориентирован в направлении оси экспериментальной установки. Торцу внутреннего электрода, обращённому в сторону разрядного промежутка изначально придаётся плоская, полусферическая, или коническая форма с углом раствора $45^\circ - 90^\circ$. Внешний электрод представляет собой цилиндр с плоским основанием диаметром 20 мм, обращённым в сторону разрядной области. Во внешнем электроде предусмотрено наличие осевого отверстия для возможности транспортировки эмитируемых из области разряда в осевом направлении корпускулярных потоков и коротковолнового излучения. Этот электрод также является сменным, что допускает возможность изменения его формы и размеров в зависимости от требований проводимых экспериментальных исследований.

В плоскости перпендикулярной оси электроразрядного устройства симметрично (под углом 90° друг к другу) располагаются во внешнем токовом электроде четыре электрода инициирующего устройства - триггера. Использование этих электродов необходимо для образования форплазмы, требуемой для «закорачивания»

межэлектродного промежутка на начальной стадии развития разряда ВИ. Триггер является электродом эрозионного типа. Конструктивно он представляет собой центральный железный электрод (7) (анод иницирующего устройства) диаметром 2 мм, окруженный снаружи полиэтиленовым диэлектриком внешним диаметром 8 мм. Каждый из четырёх, последовательно соединённых, триггеров вкручивается во внешний (обратный) токовод, играющий роль внешнего электрода (6) – катода в системе иницирующего устройства.

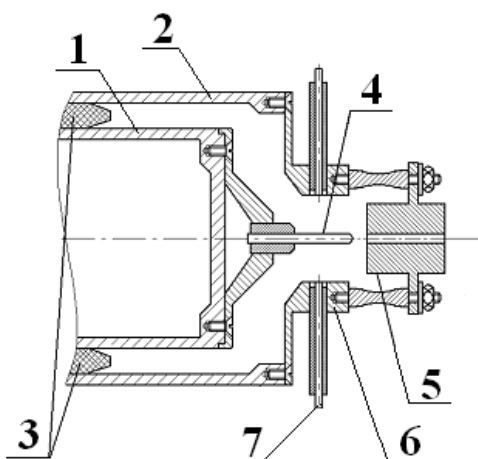


Рис. 1 Конструкция электроразрядного устройства: 1 – внутренний цилиндрический токовод, 2 – внешний цилиндрический токовод, 3 – разделительный изолятор, 4 – внутренний электрод (в процессе зарядки конденсаторной батареи является катодом), 5 – внешний электрод (в процессе зарядки конденсаторной батареи является анодом), 6 – внешний электрод источника эрозионного типа, 7 – внутренний электрод источника эрозионного типа.

Система трехступенчатой вакуумной откачки позволяет достигать предельного давления остаточных газов $10^{-5} - 10^{-6}$ Тор в камере, где расположено электроразрядное устройство.

Для определения временных и амплитудных характеристик тока, протекающего в разрядной цепи, были использованы: пояс Роговского, работающий в режиме трансформатора тока, и магнитный зонд, регистрирующий временной ход производной разрядного тока di/dt . Временной ход напряжения, приложенного к электроразрядному устройству, измерялся с помощью емкостного делителя, набранного из высоковольтных конденсаторов. Исследования про-

пространственного положения излучающих в рентгеновском диапазоне спектра $\lambda \leq 0.4$ нм областей разряда были проведены с помощью камер-обскур, расположенных в осевом и радиальном направлениях.

Для получения наглядной информации о пространственной структуре и динамике плазмы в разряде вакуумной искры была применена оптическая схема теневого фотографирования межэлектродного промежутка с азотным лазером в качестве осветителя (рис. 2).

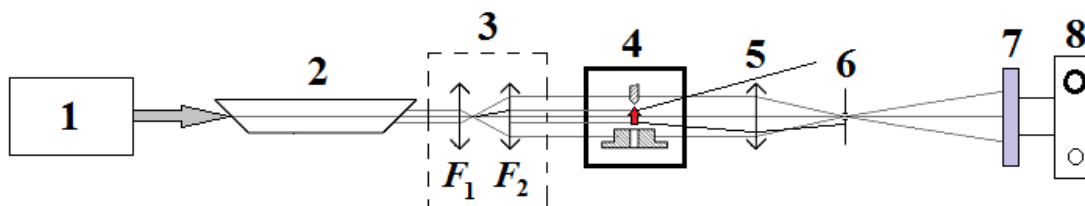


Рис. 2 Схема лазерного зондирования (теневого фотографирования) области разряда ВИ: 1 – система синхронизации и контроля запуска лазерного осветителя, 2 – лазерный осветитель ИЛГИ-503; 3 – линзовый уширитель зондирующего лазерного пучка ($F_1 = 50$ мм, $F_2 = 250$ мм); 4 – электроразрядный промежуток; 5 – кварцевая линза ($F = 500$ мм); 6 – диафрагма; 7 – интерференционный фильтр; 8 – фотоаппарат ЗЕНИТ.

Измерения распределений эмитированных из области разряда частиц по скоростям проведены с использованием времяпролетной методики (рис. 3). В качестве детектора частиц использовались плоский коллектор и цилиндр Фарадея. Для регистрации электронной температуры и концентрации частиц в потоках применялся метод электрических зондов Ленгмюра.

Определение среднего электрического заряда, приходящегося на одну эмитированную частицу, выполнено с помощью баллистического маятника (рис. 4), необходимого для регистрации общего числа частиц в потоке в пределах телесного угла видимости из области разряда, и схемы регистрации заряженной компоненты (рис. 3).

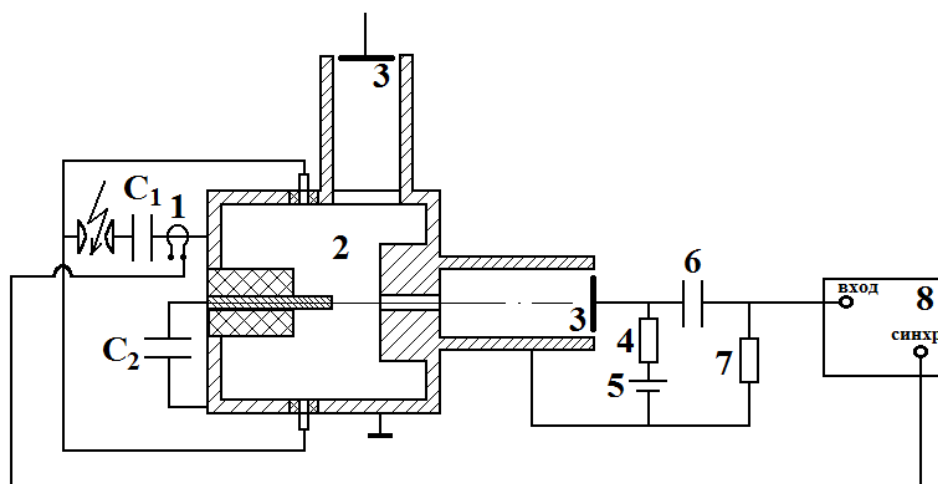


Рис. 3 Схема времяпролётных измерений: 1 – пояс Роговского ПР-2 (формирователь импульса синхронизации диагностической аппаратуры); 2 – электроразрядный промежуток; 3 – плоский коллектор; 4 – балластное сопротивление номиналом $R_{бал} = 20$ кОм; 5 – источник постоянного напряжения регулируемой величины и полярности; 6 – электрическая емкость $C = 2.2$ мкФ; 7 – измерительное сопротивление номиналом $R = 50$ Ом; 8 – запоминающий осциллограф С8-13.

Баллистический маятник, использовавшийся в измерениях, представлял собой диск, набранный из нескольких слоев алюминиевой фольги и подвешенный на двух тонких проводящих заземленных нитях. Величина регистрируемого визуально максимального смещения маятника x_m , т.е. расстояние между точками пересечения плоскостью маятника фиксированной горизонтальной прямой в состоянии равновесия и в состоянии максимального отклонения подвеса от вертикали, связана с параметрами налетающего на маятник потока частиц следующим соотношением:

$$N = \frac{2N_A}{M \langle V \rangle} \sqrt{\frac{mgl}{a}} \sin\left(\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{x_m}{b}\right)\right), \quad (1)$$

где N – число налетающих частиц, N_A – число Авогадро, M – молярная масса рабочего вещества разряда, m – масса маятника, g – ускорение свободного падения, I – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точки подвеса, a – расстояние от вышеуказанной оси до центра масс маятника, b – расстояние от точки подвеса маятника до горизонтальной прямой, вдоль которой измеряется смещение x_m .

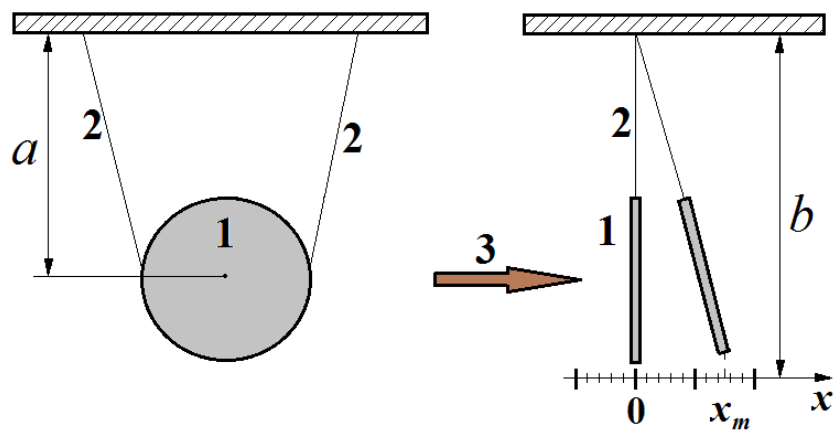


Рис. 4 Схема регистрации импульса корпускулярного потока: 1 – баллистический маятник; 2 – проводящая нить; 3 – корпускулярный поток из области разряда ВИ; x_m – величина максимального смещения маятника от положения равновесия; a – расстояние от оси, проходящей через точки подвеса маятника, до его центра масс; b – расстояние от вышеуказанной оси до горизонтальной прямой, вдоль которой измеряется смещение x_m .

В главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований режимов горения разряда вакуумной искры, визуализации процессов развития разряда в межэлектродном промежутке и данные корпускулярных измерений время-пролетным и зондовым методами.

Эксперименты проводились при различных конструкциях электродной системы, различающихся формой внешнего электрода (рис. 5): одна – без осевого отверстия (рис. 5 а), две другие – с осевыми отверстиями, обладающими пропускной способностью 0.15 (рис. 5 б) и 5 (рис. 5 в). В качестве пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода из области разряда принимается отношение диаметра цилиндрического отверстия к его длине.

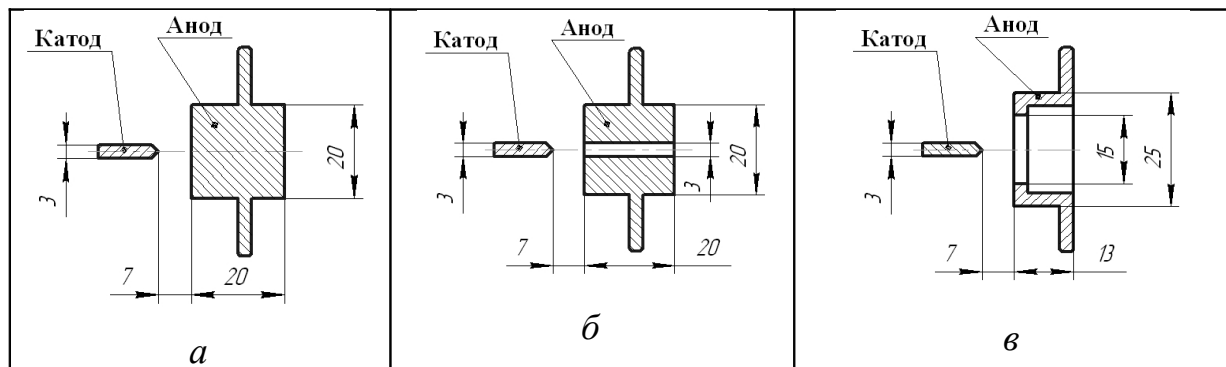


Рис. 5 Конструкции электродных систем, использованные в экспериментах.

Токовая особенность, соответствующая процессу пинчевания плазменного канала, регистрируется в интервале времени 1.8 – 2.0 мкс от момента срабатывания системы инициирования разряда при достигаемой величине тока более 70 кА. В указанном диапазоне токов разряда наблюдается временная корреляция токовых особенностей с резкими выбросами на сигнале производной тока и напряжения на разрядном промежутке. Зависимости от времени разрядного тока, его производной и напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку, носят характер затухающих колебаний, причем периоды этих колебаний равны между собой и составляют $T \approx (5.0 \pm 0.2)$ мкс .

При использовании внешнего электрода без осевого отверстия и с осевым отверстием, обладающим малой пропускной способностью (рис. 5 б), на рентгеновских обскурограммах плазмы разряда ВИ (рис. 6 а) регистрируются три источника излучения: область генерации плазменной точки (1), локализованная на расстоянии 2 – 3 мм от поверхности внутреннего электрода; диффузно светящееся облако (2) между областью генерации ПТ и поверхностью внешнего электрода; свечение поверхности внешнего электрода (3).

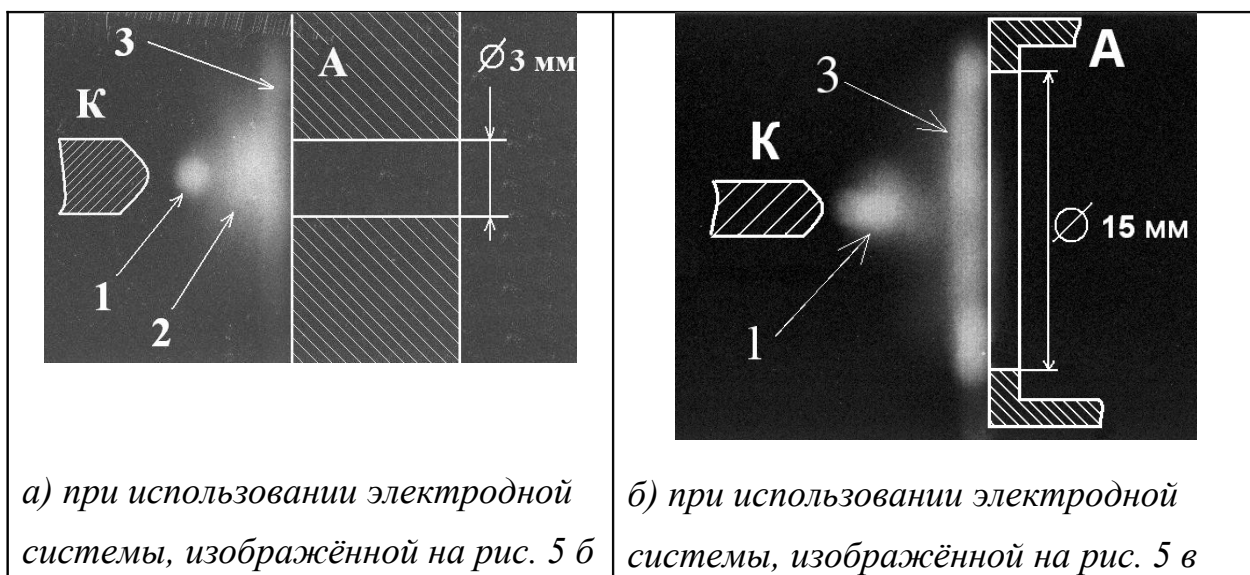


Рис. 6 Типичные обскурограммы плазменного канала (ток разряда $I_{\text{макс}} = 140$ кА): 1 – область генерации плазменной точки, 2 – диффузно светящееся облако, 3 – свечение поверхности внешнего электрода.

При использовании внешнего электрода с осевым отверстием, обладающим большой пропускной способностью (рис. 5 в) на рентгеновских обскуро-

граммах плазмы разряда ВИ (рис. 6 б) отчётливо регистрируются только два источника излучения: область генерации плазменной точки (1), по-прежнему локализованная на расстоянии 2 – 3 мм от поверхности внутреннего электрода, и свечение поверхности внешнего электрода (3).

Характерные теневые фотографии плазменного канала при различной величине тока в разряде с использованием внешних электродов с пропускными способностями осевого отверстия 0 (рис. 5а), 0.15 (рис. 5 б) и 5 (рис. 5 в) представлены на рисунках 7, 8, 9, соответственно. Для каждого кадра указана соответствующая временная задержка между моментом инициации разряда и импульсом зондирующего лазерного осветителя.

На полученных теневых фотографиях при использовании электродных систем, изображенных на рис. 5 а, б, в процессе возрастания тока наблюдается выброс плотного вещества с поверхности внутреннего электрода преимущественно вдоль оси разрядного промежутка (рис. 7 а, б; 8 а, б). За передним фронтом указанного потока вещества, то есть ближе к внутреннему электроду, происходит формирование перетяжки в момент времени близкий к моменту достижения максимума тока (рис. 7 в, 8 в). В этот же момент времени фиксируется так называемая особенность на осциллограмме сигнала с магнитного зонда, указывающая на быстрое изменение условий протекания тока в разряде, а именно, увеличение сопротивления токового канала.

Максимальное сжатие и, по-видимому, разогрев плазмы в перетяжке приводит к образованию яркого источника мягкого рентгеновского излучения – ПТ. Местоположения области минимального регистрируемого радиуса плазменного канала на теневых фотографиях (рис. 7 в; 8 в) и источника рентгеновского излучения на обскурограммах (рис. 6 а) – совпадают.

Таким образом, результаты теневого фотографирования плазмы разряда свидетельствуют о том, что формирование области наиболее горячей и плотной плазмы происходит в потоке вещества, поступающего в разряд с поверхности внутреннего электрода за передним фронтом указанного потока.

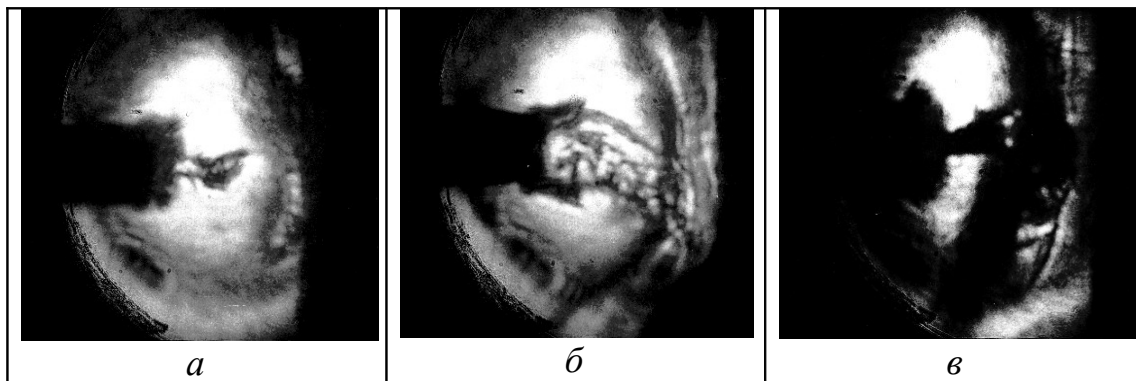


Рис. 7 Теневые фотографии плазменного канала разряда ВИ при использовании электродной системы рис. 5 а ($I_{max} = 140$ кА, время достижения максимальной силы тока $t \approx 2.5$ мкс): а – 1.5 мкс; б – 1.7 мкс; в – 2.1 мкс.

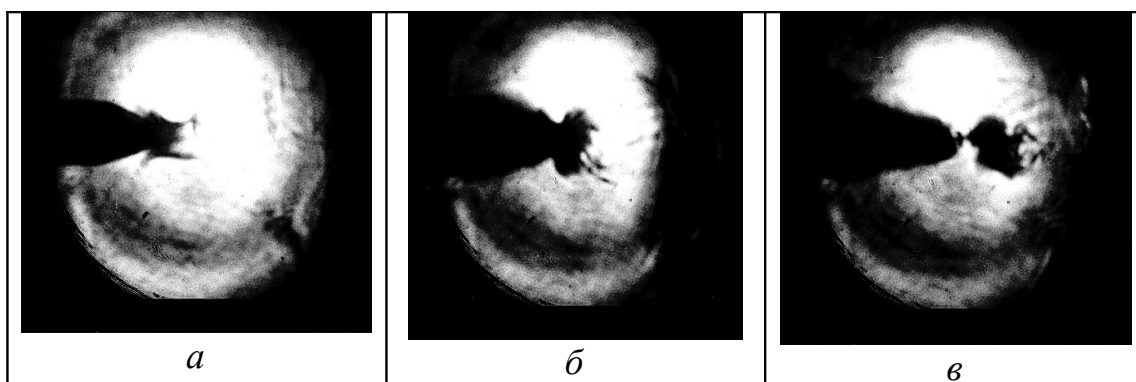


Рис. 8 Теневые фотографии плазменного канала разряда ВИ при использовании электродной системы рис. 5 б ($I_{max} = 170$ кА, время достижения максимальной силы тока $t \approx 2.5$ мкс): а – 1.1 мкс; б – 1.7 мкс; в – 2.1 мкс.

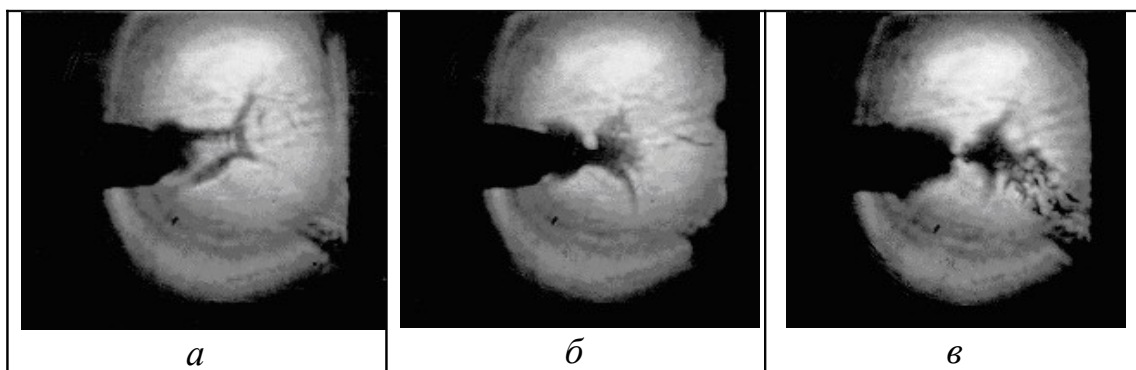


Рис. 9 Теневые фотографии плазменного канала разряда ВИ при использовании электродной системы рис. 5 в ($I_{max} = 140$ кА, время достижения максимальной силы тока $t \approx 2.5$ мкс): а – 1.6 мкс; б – 1.9 мкс; в – 2.1 мкс.

При использовании электродной системы, изображенной на рис. 5 в, результаты теневого фотографирования (рис. 9) свидетельствуют об уменьшении потоков вещества с поверхности внешнего электрода в разрядный промежуток

по сравнению с наблюдаемым ранее (рис. 7, 8). Можно отметить, что на теневых фотоснимках по-прежнему фиксируется область образования перетяжки плазменного канала в момент времени 1.9 – 2.1 мкс от инициирования разряда на расстоянии 1.5 – 2 мм от поверхности внутреннего электрода (рис. 9 в), пространственно совпадающая с изображением рентгеновского источника на обскурограмме (рис. 6 б).

На тенеграммах наблюдается формирование токоплазменной оболочки из продуктов эрозии преимущественно материала внутреннего электрода (рис. 9 а, б), причем отчетливо видно, что перетяжка формируется в плазменном факеле, распространяющемся от внутреннего электрода к внешнему (рис. 9 б, в). Наблюдаемое на тенеграммах поступление вещества в разрядный промежуток со стороны внешнего электрода носит по отношению к процессу формирования области плотной высокотемпературной плазмы второстепенный характер и обусловлено взаимодействием с поверхностью внешнего электрода осевого потока плазмы, вытекающего из области развития перетяжки. Эрозия внешнего электрода дает вклад, главным образом, в образование периферийной плазмы.

При наличии осевого отверстия во внешнем электроде в распределениях частиц по скоростям, полученных времяпролетным методом, регистрируются выраженные максимумы, соответствующие скоростям $(1.0 - 1.6) \cdot 10^6$ см/с и $(2.0 - 2.7) \cdot 10^6$ см/с. По мере увеличения пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода в зарегистрированных распределениях становится заметным третий максимум, соответствующий скоростям частиц $(9 - 11) \cdot 10^6$ см/с. При регистрации в радиальном направлении отмечаются выраженные максимумы, соответствующие скоростям частиц $(1.0 - 1.5) \cdot 10^6$ см/с, $(2.0 - 2.5) \cdot 10^6$ см/с и $(4 - 5) \cdot 10^6$ см/с, независимо от конструкции внешнего электрода.

Регистрация электронной температуры в плазменных потоках из области разряда ВИ показала, что ее величина в радиальном направлении не обнаруживает зависимости от величины тока в разряде и составляет в среднем 24 эВ при

использовании электродной системы, изображенной на рис. 5 б и 29 эВ при использовании электродной системы, изображенной на рис. 5 в. При увеличении тока разряда от 40 до 140 кА регистрируемая в осевом направлении электронная температура уменьшается от 27 до 15 эВ при использовании внешнего электрода с малой пропускной способностью осевого отверстия (рис. 5 б) и от 55 до 30 эВ при использовании внешнего электрода с большой пропускной способностью осевого отверстия (рис. 5 в).

Также определены концентрации ионов и электронов ($\sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$ в зависимости от величины тока разряда) в плазменных потоках с использованием методики расчета этих параметров в движущейся относительно коллектора плазме.

При обработке данных баллистических и коллекторных измерений рассчитывался средний электрический заряд $\langle Z \rangle$, приходящийся на одну эмитированную атомарную частицу, с использованием следующего соотношения:

$$Z = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} I(t) dt}{eN}, \quad (2)$$

где t_{\min} и t_{\max} – время появления и исчезновения сигналов на осциллограмме, отражающей временной ход тока $I(t)$ ионной компоненты на коллектор, находящийся под отрицательным потенциалом смещения, e – элементарный электрический заряд, N – число налетающих на маятник атомарных частиц.

С ростом достигаемого в разряде тока наблюдается падение среднего электрического заряда, приходящегося на одну атомарную частицу для обеих конфигураций электродной системы. Для обеих конфигураций регистрируемый средний заряд на одну частицу оказывается выше в случае плазмы, разлетающейся в радиальном направлении, по сравнению с потоком, распространяющимся вдоль оси разряда. В целом новая конфигурация обеспечивает более высокое значение среднего заряда на одну частицу. По результатам расчетов с использованием соотношения (2) для осевого отверстия внешнего электрода с малой пропускной способностью $\langle Z \rangle = 10^{-3} - 10^{-2}$, а для осевого отверстия внеш-

него электрода с большой пропускной способностью аналогичная величина достигает значения $\langle Z \rangle \approx 0.2$.

Глава 4 посвящена обсуждению полученных в эксперименте результатов.

Показано, что период разрядного тока $T \approx (5.0 \pm 0.2)$ мкс определяется ёмкостью и индуктивностью внешней по отношению к межэлектродному промежутку части цепи. При этом величина тока в разряде зависит не только от ёмкости и индуктивности внешней части цепи, а также напряжения зарядки ёмкостного накопителя, но и от активного сопротивления разрядного контура в целом.

Свечение диффузного облака, локализованного между ПТ и поверхностью внешнего электрода, вызвано взаимодействием потоков горячей плазмы и электронов, ускоренных в области развития ПТ, с периферийной плазмой. Источником периферийной плазмы служит, как свидетельствуют данные теневого фотографирования области разряда, аблирующий материал внешнего электрода. Транспортировка высокотемпературной плазмы через внешний электрод затруднена, по всей видимости, из-за диссипации энергии потока в осевом отверстии. В результате абляции поверхностных слоёв в отверстии внешнего электрода падает электронная температура и возрастает вклад нейтральной компоненты материала этого электрода в корпускулярные потоки из области разряда ВИ, снижается степень ионизации регистрируемой плазменной эмиссии за пределами электроразрядного устройства.

Получены свидетельства реализации явления «убегания» электронов в приосевой области разряда ВИ. Изображения на тенеграммах следа электронного пучка наблюдаются только случае, когда столб плазмы, образованный продуктами эрозии внутреннего электрода, обладает высокой степенью осевой симметрии (рис. 10). В случае заметных отклонений плазменного столба от осевой симметрии подобные изображения не наблюдаются, что свидетельствует о нарушении условий формирования электронного пучка и рассеянии ускоренных электронов в плотной периферийной плазме разряда.

При использовании осевого отверстия внешнего электрода с большой пропускной способностью зарегистрирована группа быстрых электронов, движущихся в составе плазменных потоков в направлении оси разряда.

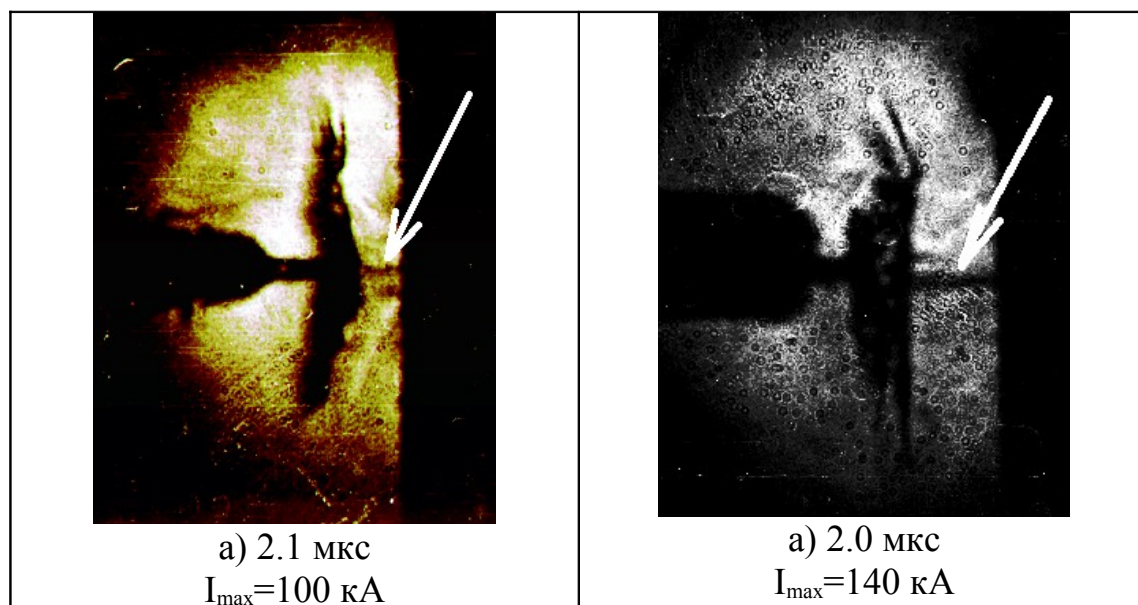


Рис. 10 Примеры теневых изображений области разряда ВИ, свидетельствующие о появлении потока высокоэнергетичных электронов, распространяющегося из области развития перетяжки по направлению к внешнему электроду. Под кадрами указано время, отсчитываемое относительно срабатывания системы инициирования, и достигаемый ток разряда.

Показано, что регистрируемые максимумы в распределениях ионов по скоростям связаны с процессами формирования плазменного столба и перетяжек, развивающихся на этом столбе. В результате увеличения пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода в осевом направлении удалось непосредственно зарегистрировать частицы из области ПТ.

Интерпретированы результаты измерения электронной температуры в плазменных потоках. Зафиксированное в данной работе увеличение в два раза электронной температуры в плазменных потоках, регистрируемых в осевом направлении при увеличении пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода, свидетельствует об уменьшении влияния процессов рассеяния и перезарядки в периферийной плазме (диффузно светящемся облаке) на транспортировку корпускулярных потоков из области развития перетяжки, играющей роль поршня, разгоняющего плазму разряда в осевом направлении.

Проведенные в данной работе исследования показали, что разряд ВИ не является изотропным источником корпускулярных потоков. При этом осевое направление является «выделенным», поскольку при увеличении пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода именно в указанном направлении происходит значительное увеличение электронной температуры и появляется максимум ионного тока, соответствующий скоростям частиц, испускаемых непосредственно из области развития перетяжки (ПТ), являющейся источником, в том числе, многозарядных ионов. При этом в радиальном направлении не происходит столь масштабных изменений как в измерении электронной температуры, так и в регистрации распределения ионов по скоростям, за исключением среднего заряда, приходящегося на одну частицу.

Особенности динамики рабочей среды разряда ВИ проявляются в неоднородности ее параметров, наличии локализованной области горячей плазмы – ПТ – примерно посередине разрядного промежутка и холодной плазмы на периферии разряда, составляющей основную массу продуктов эрозии материала электродов, поступающих в межэлектродное пространство.

Продемонстрирована возможность использования плазмы сильноточного разряда ВИ в качестве эмиттера ионов для создания импульсного ионного источника.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые методом теневого фотографирования получена информация о структуре и динамике плазмы в разряде вакуумной искры при использовании внешних электродов с осевым отверстием различной пропускной способности. Обнаружен факт образования перетяжки токового канала в продуктах эрозии внутреннего электрода. Увеличение пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода уменьшает экранирование области высокотемпературной плазмы массами плотной холодной плазмы на периферии разряда.

2. Впервые при использовании различных конструкций внешних электродов в разряде вакуумной искры времяпролетным методом получены распределения ионов по скоростям в осевом и радиальном направлениях. При увеличении пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода зафиксировано появление в направлении оси разряда группы быстрых ионов и потока электронов, ускоренных в области развития перетяжки.

3. Впервые зондовым методом выявлена зависимость электронной температуры в осевых плазменных потоках от тока разряда вакуумной искры. Показано, что увеличение пропускной способности осевого отверстия внешнего электрода приводит к росту электронной температуры.

4. Впервые при увеличении пропускной способности осевого отверстия во внешнем электроде зафиксирован значительный рост среднего заряда, приходящегося на одну частицу, в эмитируемых плазменных потоках.

Основные результаты, полученные автором, опубликованы в следующих работах:

1. Земченкова, Н. В. Особенности ионной эмиссии из импульсного вакуумного разряда / Н. В. Земченкова, Д. Е. Прохорович // Сборник трудов Научной сессии МИФИ. – М., 2008. – Т. 2. – С. 15 – 16.

2. Долгов, А. Н. Источник металлической плазмы на основе зет-пинча./ А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Д. Е. Прохорович // Тезисы докладов XXXV

Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 11 – 15 февр. 2008 г. – М., 2008. – С. 305.

3. Долгов, А. Н. Корпускулярная диагностика в качестве инструмента исследования процессов в быстром Z-пинче / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, В. В. Наумов, Д. Е. Прохорович // Материалы VI Российского семинара «Современные методы диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». – М., 2008, 22 – 24 октяб. – С. 48 – 50.

4. Долгов, А. Н. О применениях средств корпускулярной диагностики к плазме быстрого Z-пинчевого разряда./ А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, В. В. Наумов, Д. Е. Прохорович // Сборник тезисов докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 9 – 13 февр. 2009 г. – М., 2009. – С. 312.

5. Долгов, А. Н. Возможности создания импульсного источника многозарядных ионов на основе разряда вакуумной искры / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, В. В. Наумов, Д. Е. Прохорович // VIII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов. – М.: НИЦ «Инженер», 2009. – С. 75 – 78.

6. Долгов, А. Н. Исследования влияния структуры разряда вакуумной искры на параметры корпускулярной эмиссии. / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, В. В. Наумов, Д. Е. Прохорович // Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 8 – 12 февр. 2010 г. – М., 2010. – С. 323.

7. Земченкова, Н. В. Корпускулярная диагностика – инструмент исследования процессов в сильноточной вакуумной искре / Н. В. Земченкова, В. В. Наумов // Научная сессия МИФИ-2010. XIII Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых. Сборник научных трудов. – 2010. – С. 27 – 29.

8. Земченкова, Н. В. Возможности создания источника ионов на основе разряда сильноточной вакуумной искры / Н. В. Земченкова, В. В. Наумов // Научная сессия МИФИ-2010. XIII Международная телекоммуникационная

конференция студентов и молодых ученых. Сборник научных трудов. – 2010. – С. 25 – 27.

9. Долгов, А. Н. Механизмы образования и транспортировки ионных потоков в плазме разряда сильноточной вакуумной искры / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36, вып. 9.– С. 826 – 832.

10. Долгов, А. Н. Процессы формирования анизотропной функции распределения электронов по скоростям и рождения многозарядных ионов в плазме микропинчевого разряда /А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович // Физика плазмы. – 2011.– Т. 37, вып. 1.– С. 79 – 87.

11. Долгов, А. Н. Образование и транспортировка ионов в плазме разряда сильноточной вакуумной искры /А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович // Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 14 – 18 февр. 2011 г. – М., 2011– С. 338.

12. Долгов, А. Н. Экспериментальные свидетельства убегания электронов в приосевой области Z-пинча в среде тяжелых элементов / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович // Физика плазмы. – 2011. – Т. 37, вып. 3. – С. 227 – 232.

13. Долгов, А. Н. Исследование возможностей управления условиями рождения и транспортировки ионов в разряде сильноточной вакуумной искры / А. Н. Долгов, Н. В. Земченкова, Д. Е. Прохорович // Физика плазмы. – 2011. – Т. 37, вып. 6. – С. 536 – 543.