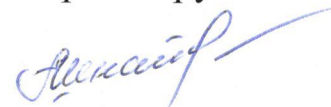


На правах рукописи



Шнайдер Антон Витальевич

ПРОЦЕССЫ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ТОКА СИЛЬНОТОЧНОЙ  
ВАКУУМНОЙ ДУГИ ЧЕРЕЗ НОЛЬ

Специальность 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
Батраков Александр Владимирович

Официальные оппоненты: Овсянников Александр Георгиевич,  
доктор технических наук,  
профессор,  
Филиал ОАО «Электросеть сервис» -  
Специализированная производственная база  
«Электросетьремонт», г. Новосибирск,  
главный специалист

Уйманов Игорь Владимирович,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования Новосибирский  
государственный технический университет  
(НГТУ), г. Новосибирск

Защита состоится «29» \_\_\_\_\_ декабря 2016 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.031.01 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 634055, г. Томск,  
пр. Академический, 2/3, ауд.408.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИСЭ СО РАН  
<http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/Shnaider/shnaider.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

 В.В. Рыжов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Электрическая изоляция в вакууме обеспечивает наибольшие электрические поля, выдерживаемые без пробоя, и не содержит среды в изолирующих промежутках, способной быть источником заряженных частиц за счет объемной ионизации, что позволяет промежуткам восстанавливать электрическую прочность после случайных пробоев. Это определило многие применения вакуумной изоляции, в том числе выключение сильных токов в вакуумных сетевых выключателях.

Вакуумный выключатель (ВВ) способен выдерживать высокое напряжение, обладая при этом сравнительно малыми габаритами, длительное время пропускать большие токи и быстро восстанавливать электрическую прочность промежутка после гашения дуги. В настоящее время в электрических сетях среднего класса напряжений используются преимущественно вакуумные или элегазовые выключатели. Этот тип выключателей полностью вытеснил технологию отключения дуги в воздухе и масле. Действительно, вакуумный выключатель обладает рядом преимуществ, таких как:

- отсутствие риска возникновения взрыва,
- относительно компактные размеры,
- высокая отключающая способность,
- высокий коммутационный ресурс (на порядок больше, чем в любых других дугогасительных средах),
- очень незначительное выделение энергии в дуге при дугогашении,
- высокая износостойкость и отсутствие обслуживаемых элементов конструкции,
- быстрое восстановление электроизоляционных свойств промежутка.

Эти и другие свойства ВВ позволяют им прочно удерживать лидирующие позиции в производстве коммутационной аппаратуры. Кроме того, постоянно возрастающие требования потребителей позволяют оптимизировать основные параметры выключателей и развивать это направление. Необходимость исследования процессов, протекающих в ВВ, как в течение горения дуги, так и

после, обусловлена потребностью в выборе наиболее оптимальной конструкции электродов, материала электродов, расположения и формы экрана, окружающего разрядный промежуток.

Задача изучения гашения дуги и процессов, происходящих после перехода тока через ноль, сохранила свою актуальность до сегодняшнего дня. Решение данной проблемы поможет лучше понять происходящие процессы в вакуумной дугогасительной камере (ВДК), оптимизировать режимы работы и, возможно, усовершенствовать конструкцию ВДК.

Помимо ВДК, решение проблемы пробоя изолирующего промежутка и дугообразования остро стоит в бортовой энергопреобразующей аппаратуре космических аппаратов при их эксплуатации в условиях орбитального космического пространства [1]. Данная проблема является сравнительно новой и связана с переходом систем электропитания космических аппаратов напряжений диапазона 27 В на напряжения диапазона 100 В, превышающие порог образования дуги в вакууме. Одной из причин выхода из строя бортовой аппаратуры является возникновение вторичного дугового разряда.

В реальных условиях эксплуатации оборудования напряжения 100 В недостаточно для образования первичной дуги даже при очень малых межэлектродных расстояниях (доли миллиметров). Однако ситуация меняется кардинально, когда в промежутке уже присутствует плазма, образованная первичной дугой. В этом случае такое напряжение является достаточным для образования вторичной дуги, поскольку катодное падение потенциала, необходимое для поддержания дуги, составляет величину порядка 20 В. Поэтому основным фактором, приводящем к образованию вторичной дуги, является плазма, образованная первичной дугой.

**Целью диссертационной работы** являлось исследование процессов в области разрядного промежутка при переходе тока сильноточной вакуумной дуги через ноль в условиях быстронарастающего напряжения на промежутке, а также исследование инициирования электрической дуги в промежутке,

заполненном плазмой первичного разряда и газом низкого давления, при напряжениях уровня 100 В.

#### **Основные задачи диссертационной работы:**

1. Разработать метод и исследовать динамику расширяющегося катодного слоя, образующегося после горения сильноточной вакуумной дуги в условиях быстроснарастающего напряжения на разрядном промежутке.

2. Разработать и реализовать метод измерения температуры поверхности анода после перехода тока через ноль.

3. Изучить влияние длительности горения дуги на отключающую способность промежутка, в том числе при шунтировании промежутка полупроводниковым ключом.

4. Исследовать инициирование вторичного дугового разряда в промежутке, в том числе за счет наличия дефекта на поверхности электродов.

#### **Научная новизна диссертационной работы** заключается в том, что:

1. Разработана и реализована в эксперименте оригинальная методика исследования расширяющегося катодного слоя в вакуумной дугогасительной камере с помощью линейки одиночных зондов Ленгмюра.

2. Разработана и реализована в эксперименте методика измерения температуры поверхности контактов непосредственно после погасания сильноточной дуги в вакуумной дугогасительной камере.

3. В дуговой стадии разряда обнаружено формирование анодного факела, являющегося следствием взаимодействия катодной и анодной плазмы.

4. Экспериментально определены оптимальные условия горения, как «свободной» вакуумной дуги, так и в условиях ее шунтирования полупроводниковым ключом.

5. Разработан критерий инициирования вторичной дуги в вакууме и газе низкого давления при наличии дефекта сплошности диэлектрического покрытия на поверхности электродов.

#### **Практическая значимость диссертационной работы:**

1. Показана возможность улучшения отключающей способности вакуумного выключателя путем параллельного подключения тиристорной сборки.

2. Экспериментально установлен критический размер дефекта сплошности диэлектрического покрытия на электродах, который приводит к инициированию вторичной дуги в условиях окружения промежутка плазмой, что особенно актуально при функционировании радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. С использованием сканирования пространства вакуумной дугогасительной камеры набором электрических зондов установлено, что после перехода переменного тока сильноточной вакуумной дуги амплитудой до 15 кА и частоты 50 Гц через ноль в условиях роста переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) с темпом роста  $0,4 \div 0,8$  кВ/мкс катодный слой распространяется от электрода со скоростью  $10^5$  см/с. При этом средняя напряженность электрического поля в катодном слое составляет величину порядка 10 кВ/см.

2. В сильноточной вакуумной дуге, горящей на электродах из контактного материала  $\text{CuCr}_{25}$ , формируется анодный факел, имеющий вид светящейся оболочки, свет из которой излучается преимущественно нейтральными атомами. Оболочка окружена диффузным гало, свет из которого излучается преимущественно ионами. Формирование анодного факела объясняется ионизационно-рекомбинационными процессами при столкновении катодного потока плазмы с анодным потоком нейтральных паров. В случае медных электродов подобные светящиеся оболочки формируются только вокруг жидкометаллических выступов с затрудненным отводом тепла и вокруг крупных капель, летящих в промежутке.

3. Для вакуумной дугогасительной камеры существует оптимальное время горения сильноточной вакуумной дуги переменного тока амплитудой 11 кА и частоты 50 Гц, лежащее в диапазоне от 1 до 7 мс, в пределах которого

прерывание дуги не приводит к пробоем контактного промежутка в условиях роста переходного восстанавливающегося напряжения амплитудой до 31 кВ с темпом роста 0,4 кВ/мкс и разведения контактов со скоростью порядка 1 м/с. Увеличение времени горения дуги приводит к пробоям вследствие контрагирования разряда и образования анодного пятна с концентрацией плазмы более  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и интенсивным испарением материала анода. Уменьшение времени горения дуги до 1 мс и менее приводит к пробоем промежутка из-за сильных электрических полей напряженностью более 300 кВ/см в коротком вакуумном промежутке. При ограничении времени горения дуги в ВДК путем шунтирования промежутка полупроводниковым ключом дуга горит при напряжении на разрядном промежутке вплоть до 8 В, что ниже падения потенциала на катодной дуге и соответствует первому потенциалу ионизации атомов материала электродов.

4. Инициирование вторичного дугового разряда при напряжении уровня 100 В на электродах, покрытых диэлектрической пленкой, после зажигания первичного дугового разряда в условиях газа низкого давления происходит через стадию объемного несамостоятельного разряда и только при наличии на электродах дефектов диэлектрического покрытия, характерные размеры которых превосходят 0,2 мм.

**Достоверность** полученных результатов настоящей работы подтверждается систематическим характером исследований, совпадением экспериментальных результатов и теоретических оценок и сравнением полученных результатов с данными других работ.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих отечественных и зарубежных конференциях и симпозиумах: *XXIV ISDEIV*, Braunschweig, Germany, 2010; *XXV ISDEIV*, Tomsk, Russia, 2012; *XXVI ISDEIV*, Mumbai, India, 2014, *XXVII ISDEIV*, Suzhou, China, 2016 и XIX Международной научно-практической конференции посвященной 55-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева (Красноярск, 2015) «Решетневские чтения». Также

результаты работы обсуждались на научных семинарах Института сильноточной электроники СО РАН.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 7 научных статей в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ. Также опубликовано 9 докладов на международных научных и научно-практических конференциях, подана заявка на патент РФ № 2016124256 от 20.06.2016 «Способ обнаружения слаботочной электрической дуги в радиоэлектронной аппаратуре».

**Личный вклад автора** состоит в участии в постановке задач исследований, проведении экспериментов, обработке и анализе представленных результатов. Соавторы, принимавшие участие в исследованиях, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 166 страниц, включая 91 рисунок, 3 таблицы и список литературы из 115 наименований.

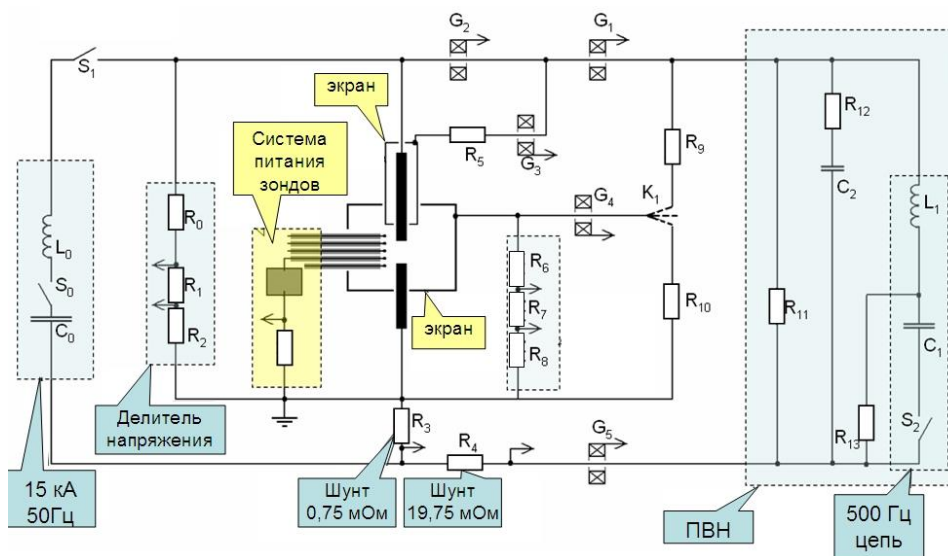
## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, определена основная цель, изложена ее научная новизна, поставлены задачи, формулируются выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе**, являющейся обзорной, кратко рассматриваются основные свойства вакуумного дугового разряда, анализируются способы инициирования вакуумной дуги, режимы горения дугового разряда, роль анода и температура его поверхности, рассматриваются процессы после перехода тока через ноль, такие как восстановление электрической прочности промежутка и формирование катодного слоя после перехода тока через ноль.



**Вторая глава** посвящена расширению катодного слоя сильноточной вакуумной дуги после перехода тока через ноль в условиях роста напряжения. Для исследования процессов, протекающих в сильноточной вакуумной дуге и после перехода тока через ноль, был собран стенд на основе синтетической схемы по Вейлю-Доббке [2], электрическая схема которой представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда.

Принцип работы схемы основан на параллельном подключении двух контуров, сильноточного низковольтного контура и менее сильноточного высоковольтного контура, на исследуемый разрядный промежуток. Низковольтная сильноточная цепь генерирует гармонический импульс тока амплитудой до 15 кА с длительностью полупериода по основанию 10 мс (50 Гц). Высоковольтная, относительно менее сильноточная цепь генерирует импульс переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) амплитудой до 41 кВ.

В качестве разрядного промежутка используется экспериментальный вакуумный выключатель, представляющий собой динамически откачиваемую вакуумную камеру с помещенными в нее контактами диаметром 20 мм из сплава  $\text{Cu}_{75\%}\text{Cr}_{25\%}$  или чистой бескислородной меди. Один из контактов является подвижным, а другой – изолированным с использованием высоковольтного ввода. Скорость движения подвижного контакта составляет

1 м/с и остается практически постоянной на протяжении 10 мс. Дуга инициируется разведением контактов. Для исследования параметров плазмы на стадии горения сильноточной вакуумной дуги и для восстановления динамики

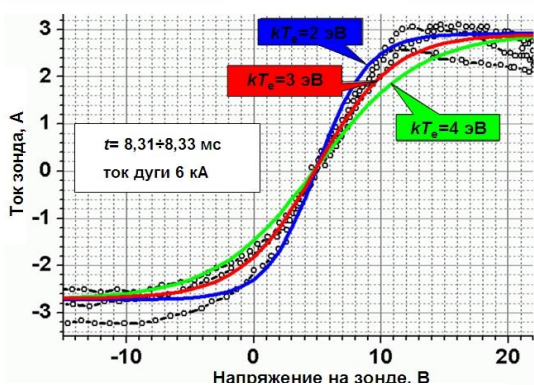
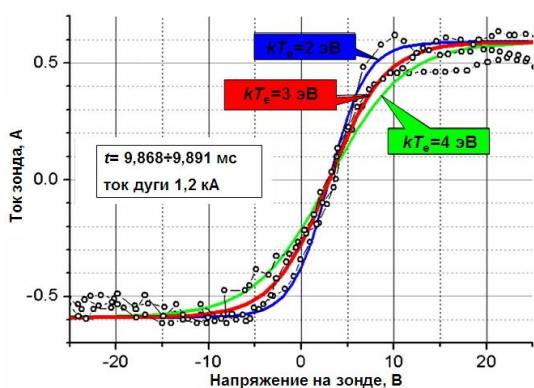


**Рисунок 2** – Разрядный промежуток с набором из 5 одиночных цилиндрических зондов Ленгмюра.

катодного слоя используется набор цилиндрических зондов Ленгмюра, с возможностью перемещения в радиальном направлении относительно разрядного промежутка (рисунок 2).

Для измерения температуры электронов плазмы используется двойной зонд, образованный зондами №2 и №3. Частота переменного напряжения, подаваемого на

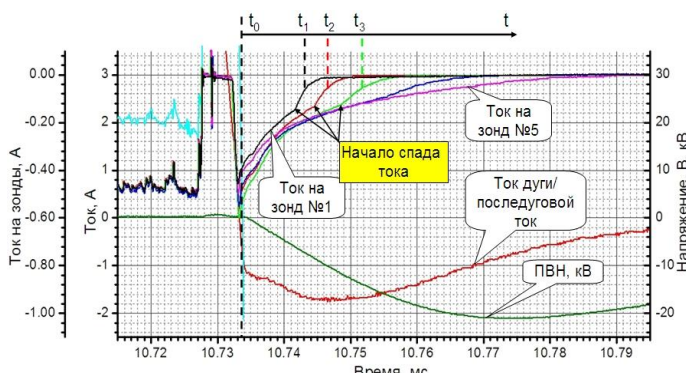
зонды, составляет 100÷400 кГц. На рисунке 3 представлены осциллограммы



**Рисунок 3** – ВАХ двойного зонда.

двойного зонда. Видно, что температура электронов на стадии горения сильноточной дуги не зависит от частоты подаваемого на зонды напряжения, тока разряда и момента измерения и близка к 3 эВ. При приближении тока разряда к нулю амплитуда сигнала двойного зонда уменьшается и в момент нуля тока становится сравнима с шумом. Поэтому для исследования редкой (концентрация  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и ниже) плазмы является целесообразным использование одиночного зонда.

Для исследования динамики расширения катодного слоя использовались одиночные зонды Ленгмюра работающие в режиме электронного тока насыщения. Каждый из зондов был соединен с одним из пяти независимых каналов источника питания.

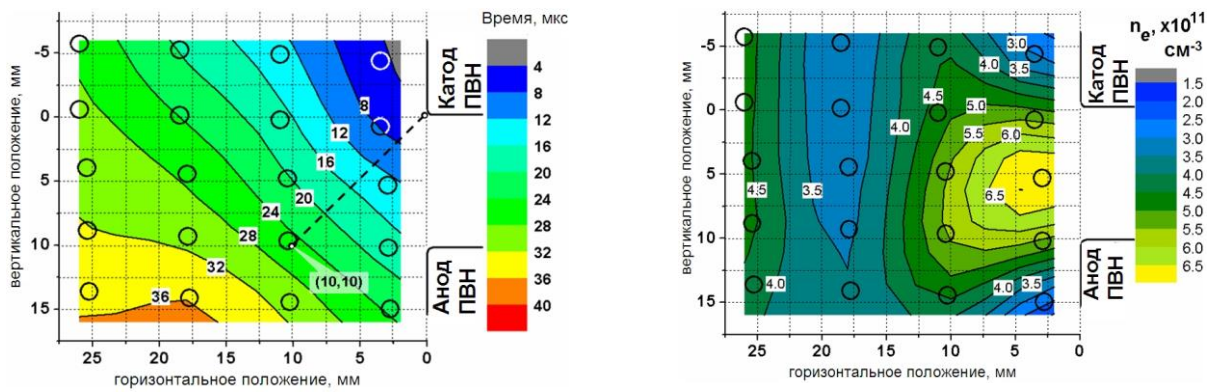


**Рисунок 4** – Осциллограммы напряжения горения дуги, тока/последугового тока дуги, импульса ПВН и токов на зонды в окрестностях нуля тока. Амплитуда тока разряда 10 кА, напряжение на зондах 35 В.

что электронный ток на зонды имеет некий обрыв. Образование таких обрывов можно связать с резким спадом концентрации плазмы вокруг зонда и уменьшением эффективной площади собирающей поверхности зонда при прохождении границы катодного слоя через зонд (т.е. освобождение зонда от плазмы). За момент оголения зонда принимаем момент времени, за который ток на зонд уменьшится в два раза (моменты времени  $t_1-t_3$ ). Данные моменты времени можно определить по осциллограммам с точностью до 0,1 мкс, что позволяет делать достоверные выводы о динамике границы плазмы и слое пространственного заряда между плазмой и катодом ПВН, принимая во внимание промежуток времени не менее 0,1 мкс в качестве временной погрешности. Таким образом, для восстановления динамики слоя необходимо измерить времена обрывов зондовых токов на различном удалении линейки зондов от разрядного промежутка. Для каждого расстояния зондов от разрядного промежутка производилось от 5 до 10 актов горения дуги, измерялось время для каждого выстрела, а затем высчитывалось среднее время оголения для каждого зонда на данном расстоянии. После нахождения средних времен возможно построение двумерной картины расширения катодного слоя в плоскости радиально-осевого сечения разрядного промежутка после перехода

Напряжение питания зондов по всем пяти каналам регулировалось синхронно в диапазоне от 20 до 50 В. Все пять каналов запускались одновременно за  $50 \div 100$  мкс до перехода тока дуги через ноль.

Осциллограммы токов на зонды после перехода тока через ноль приведены на рисунке 4. Видно,



**Рисунок 5** – Двумерное представление расширяющегося катодного слоя для тока дуги 10 кА и скорости роста ПВН 0,4 кВ/мкс и средняя концентрация плазмы в разрядном промежутке после горения 10 кА дуги.

тока дуги через ноль в условиях быстронарастающего напряжения на промежутке. Результаты построения приведены на рисунке 5. Зная не только среднее время оголения зондов, но и ток на зонд в момент перехода тока дуги через ноль (по осциллограммам), можно восстановить среднюю концентрацию плазмы для различного расстояния от разрядного промежутка. Экспериментальные данные представлены на рисунке 5 (справа).

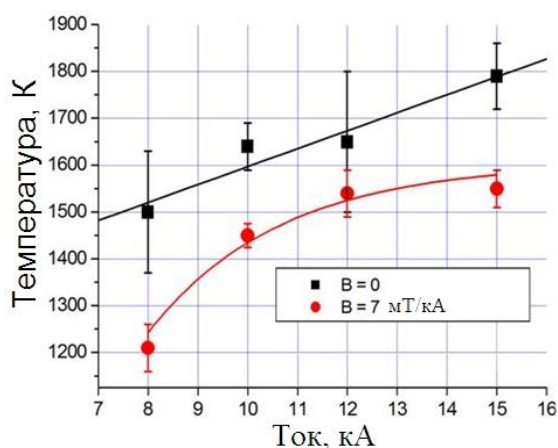
Кроме того, из представленных данных оценивалась средняя скорость движения катодного слоя и средняя напряженность в катодном слое. Т.о. получили, что катодный слой распространяется со скоростью порядка  $10^6$  см/с, что соответствует скорости Бома, а средняя напряженность в слое составляет величину порядка 10 кВ/см.

Результаты второй главы опубликованы в работах [А1-А4].

**Третья глава** посвящена формированию анодного факела при горении сильноточной вакуумной дуги. Кроме того, был разработан и реализован метод, позволяющий измерять температуру поверхности анода после перехода тока через ноль. Эксперименты по исследованию анодных процессов, включая измерение температуры и регистрацию свечения плазмы, проводились на синтетической схеме по Вейлю-Доббке, описанной в Главе 2. Эксперименты проводились как при отсутствии, так и при наличии внешнего магнитного поля.

Для измерения температуры поверхности электродов при переходе тока сильноточной вакуумной дуги через ноль использовалась скоростная

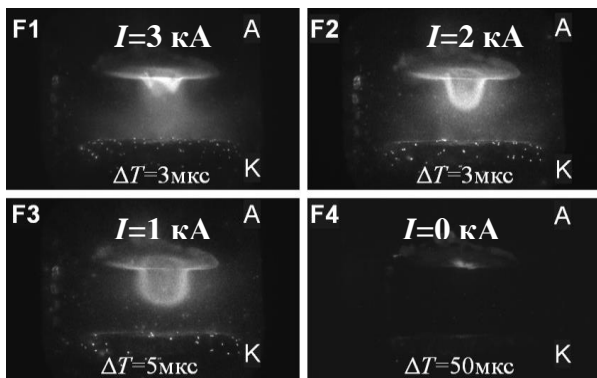
регистрация изображений с возможностью оценки температуры по интенсивности свечения. При этом более предпочтительным является измерение температуры по соотношению интенсивности свечения наблюдаемого объекта на различных длинах волн, поскольку измерения по спектрально интегрированной яркости зависят от прозрачности вакуумных окон, которые подвержены интенсивному запылению при горении сильноточной вакуумной дуги. Перед измерениями температуры поверхности анода выполнялась калибровка оптических трактов камеры, чтобы установить связь между интенсивностью свечения поверхности нагретого тела и его температурой. После калибровки оптических трактов система регистрации изображений была перенесена на экспериментальную установку для исследования температуры поверхности анода в окрестностях нуля тока, при этом светофильтры и настройки камеры не менялись, кроме времени экспозиции кадров. Для анализа температуры поверхности анода на фотографии выбиралась однородная по свечению область. Данные изображения обрабатывались в программе Andor Technology, благодаря



**Рисунок 6** – Зависимость средней температуры поверхности анода в момент перехода тока через ноль от амплитуды тока разряда.

Используя данный метод, была получена информация по зависимости температуры поверхности анода от тока разряда, которая представлена на рисунке 6.

которой высчитывалась средняя интенсивность свечения в однородной области. Анализ изображений показал, что температура (интенсивность свечения) нестабильна как от выстрела к выстрелу, так и от канала к каналу в одном выстреле. Поэтому для того, чтобы корректно восстановить температуру поверхности в одном выстреле, мы использовали усреднение по методу наименьших

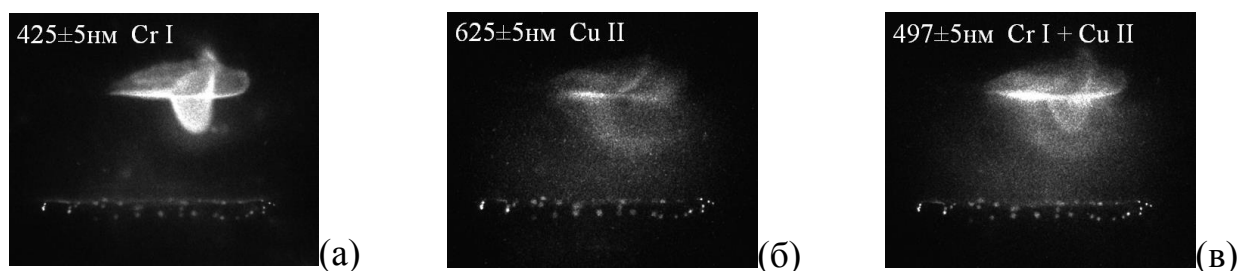


**Рисунок 7** – Изображения анодного факела в различные моменты времени.  $\Delta T$  – экспозиция кадра,  $I$  – ток.

При выполнении экспериментов с электродами из CuCr был зарегистрирован анодный факел (рисунок 7) с яркой оболочкой [A5,A6], который в литературе по вакуумной дуге не был ранее описан, за исключением работ [3,4], в которых подобный факел был зарегистрирован, но не

идентифицирован как самостоятельный объект. Отличительной особенностью являлась тенденция увеличения размеров факела с уменьшением тока разряда. Обратная зависимость размера факела от тока говорит о том, что появление яркой оболочки факела является результатом взаимодействия между потоком катодной плазмы, становящейся менее плотной к концу полупериода импульса тока, и потоком паров с анода, интенсивность которых не так сильно уменьшается даже к концу полупериода из-за теплоемкости анода. Кроме того, анодный факел наблюдается и при горении на медных электродах. Однако, в отличие от CuCr электродов, его появление носит нерегулярный характер и форма факела не воспроизводится. Как правило, факел образуется только вокруг жидкометаллических выступов на поверхности электрода с затрудненным теплоотводом или вокруг капель, находящихся в промежутке. Эти данные указывают на то, что ключевую роль в появлении такого объекта играет испарение материала анода.

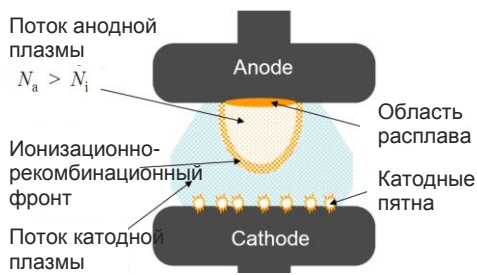
Механизмы образования светящейся оболочки анода факела подразумевают ионизационно-рекомбинационные процессы. В связи с этим представляет интерес регистрация спектрально-дифференцированных изображений свечения анодного факела. Для этого были выбраны и установлены в скоростную камеру три интерференционных светофильтра с полосой пропускания 10 нм. Фильтры выбирались на диапазон  $425 \pm 5$  нм для регистрации изображения на линиях Cr I (рисунок 8, а), на диапазон  $625 \pm 5$  на



**Рисунок 8** – Одновременно зарегистрированные спектрально-дифференцированные изображения промежутка при горении дуги на медно-хромовых электродах, полученные за 500 мкс до момента нуля тока, что соответствует току разряда 1,5 кА.

линиях Cu II (рисунок 8, б) и на диапазон  $497\pm 5$  нм на линиях Cr I и Cu II одновременно (рисунок 8, в), поскольку линии в этих диапазонах присутствуют при горении дуги на CuCr электродах. Видно, что большая часть света анодного факела излучается возбужденными нейтральными атомами. Оболочка анодного факела окружена диффузным гало, излучаемым ионами.

Глядя на анодный факел (рисунок 7), можно сказать, что излучение из него сосредоточено в достаточно узкой оболочке, а пространство внутри оболочки относительно темное. Данное предположение требует проверки, которая заключается в обратном преобразовании Абеля. Преобразование Абеля без привлечения сложных математических моделей возможно лишь в случае оптически тонкого излучающего объекта. Для проверки объекта на соответствие этому условию был проведен ряд экспериментов по наблюдению теневых изображений анодного факела при подсветке излучением лазера на красителе с изменяемой длиной волны излучения. Длина волны излучения лазера настраивалась на резонансную длину поглощения света атомами паров материала анода. Данные экспериментов показали, что заметного поглощения лазерного излучения после прохода через анодный факел не выявлено, что свидетельствует о малой оптической толщине факела. Т.о., применение обратного преобразования Абеля позволило восстановить интенсивность свечения факела по радиусу, которое показывает, что свечение оболочки факела значительно интенсивнее свечения внутренней части. Известно [5], что в результате столкновения катодной плазмы, имеющей скорость  $10^6$  см/с, с анодной плазмой возможно формирование устойчивого ударного фронта в



**Рисунок 9** – Модельное представление структуры анодного факела, где  $N_i$  – концентрация ионов и  $N_a$  – концентрация атомов.

дуговом промежутке. При столкновении двух потоков и замедлении скоростей их распространения возможно формирование ионизационно-рекомбинационного фронта (ИРФ), в котором основным механизмом ионизации нейтральной компоненты анодного потока является резонансная

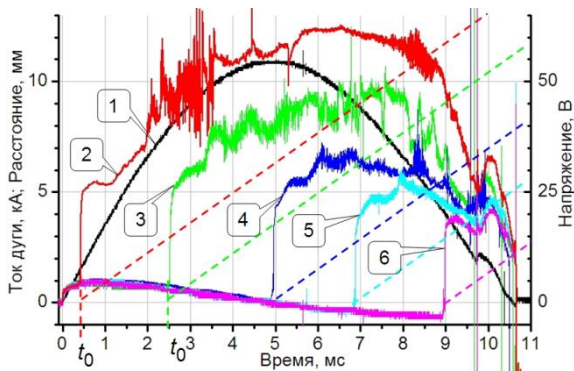
перезарядка ионов на атомах. В результате перезарядки действительно возможно формирование оболочки из возбуждённых атомов, окружённой ионным гало. На основании вышеперечисленного структуру образования ИРФ анодного факела можно представить в следующем виде (рисунок 9).

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A5-A10].

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния длительности горения сильноточной вакуумной дуги на отключающую способность вакуумной дугогасительной камеры.

Длительность горения дугового разряда в промежутке оказывает значительное влияние как на характеристики самого разряда, так и на отключающую способность. Чем раньше (относительно начала протекания переменного тока в полупериоде сети) размыкаются контакты, тем дольше горит дуга и больше межэлектродный зазор к моменту перехода тока дуги через ноль. В условиях сильных токов это приводит к контрагированию разряда. Контрагирование разряда приводит к росту плотности потока энергии на локальную область поверхности анода. Поэтому, отключающая способность ВДК ухудшается. С другой стороны, при слишком позднем размыкании контактов к моменту перехода тока через ноль и эскалации ПВН межэлектродный промежуток может оказаться слишком мал для выдерживания амплитудного значения ПВН без пробоя, что также отрицательно сказывается на отключающей способности ВДК. Для ограничения времени горения дуги были выбраны два способа:





**Рисунок 10** – Осциллограмма тока через ВДК (1) и осциллограммы напряжения на выводах контактов (2÷6).  $t_0$  – начало движения подвижного контакта, пунктиром показан межэлектродный зазор.

время задержки включения ключей изменялось.

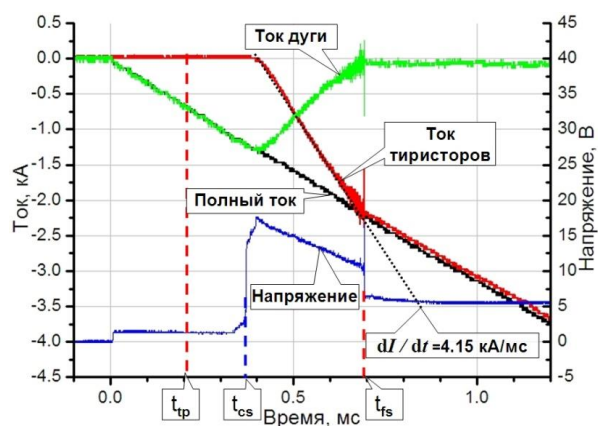
В первой серии экспериментов по исследованию влияния длительности горения дуги, при фиксированных параметрах выключателя, использовалась синтетическая схема, характеристики которой приведены в Главе 2. В этом случае с помощью генератора задержек изменялось только время начала разведения контактов относительно начала протекания тока через контакты. Осциллограмма тока через ВДК в серии экспериментов с амплитудой тока 11 кА и соответствующие этому току осциллограммы напряжения на промежутке приведены на рисунке 10. При относительно малом времени задержки размыкания контактов  $t_0 < 2$  мс от начала протекания тока, как правило, наблюдался анодный факел, аналогичный наблюдаемому в работах [А9, А10]. После обрыва дуги наблюдалось излучение узкой разогретой области на верхнем электроде. Стабильно от импульса к импульсу наблюдались пробои при приложении ПВН. При увеличении  $t_0$  от 2 до 3 мс вероятность пробоев резко уменьшалась. При  $t_0 = 3,5$  мс пробои уже не наблюдались. Анодный факел также не наблюдался. Отсутствовало и свечение поверхности верхнего электрода после обрыва дуги, что указывает на относительно невысокую температуру поверхности анода. Пробоя при приложении ПВН не наблюдалось при увеличении  $t_0$  до момента, когда до перехода тока через ноль оставалась чуть меньше 1 мс. При этом напряженность электрического поля достигала

- все параметры выключателя оставались неизменными, а время задержки начала размыкания контактов относительно начала полупериода тока изменялось,

- время горения дуги ограничивалось путем параллельного подключения к разрядному промежутку полупроводниковых ключей, при этом

порядка 300 кВ/см (по нижним оценкам). При дальнейшем приближении  $t_0$  к моменту перехода тока через ноль возникали пробои в коротком межэлектродном промежутке.

Во второй серии экспериментов использовалась модернизированная синтетическая схема. Модернизация заключалась в параллельном подключении тиристорной сборки к разрядному промежутку [A11]. Тиристорная сборка представляла собой два последовательно подключенных фототиристора с выравнивающими резисторами и  $RC$ - цепями. Кроме того, для оптимизации количества последовательно включенных полупроводниковых ключей (полупроводниковой сборкой), шунтирующих вакуумную дугу, были проведены эксперименты по исследованию динамики перераспределения тока между дугой и полупроводниковой сборкой при различном количестве последовательно соединенных полупроводниковых ключей. В этом эксперименте в качестве полупроводниковых ключей были выбраны диоды, поскольку переходные характеристики диодов и тиристоров в открытом



**Рисунок 11** – осциллограммы, иллюстрирующие переключение тока из вакуумного выключателя в тиристор. Моменты времени:  $t_{тр}$  – подача импульса открытия тиристоров,  $t_{сн}$  – начала размыкания контактов вакуумного выключателя, и  $t_{фс}$  – полное переключение тока.

выключателе загорается дуговой разряд и на промежутке скачкообразно устанавливается напряжения порядка  $15 \div 20$  В. В этот момент ток в цепи тиристоров начинает возрастать и к моменту времени  $t_{фс}$  тиристоры полностью открываются и весь ток переключается в них. По мере перехода тока из ВДК в

состоянии близки друг к другу.

На рисунке 11 представлены осциллограммы, иллюстрирующие переключение тока из ВДК в тиристоры.

Пока контакты замкнуты, падение потенциала на них составляет величину

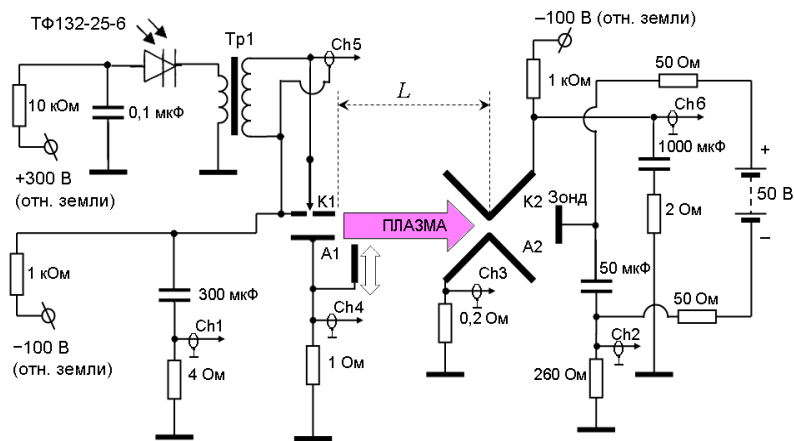
менее 1 В, что недостаточно для открытия тиристоров. Поэтому ток в цепи тиристоров не появляется до момента размыкания контактов. После размыкания контактов в вакуумном

тиристоры, мощность в дуге начинает падать, и к моменту полного переключения тока ( $t_{fs}$ ) дуга окончательно гаснет. Было замечено, что на этапе переключения тока из ВДК в тиристоры в промежутке времени ( $t_{fs}-t_{cs}$ ) напряжение снижается до меньшего уровня, порядка  $8\div 10$  В, хотя дуга продолжает функционировать. В рамках взрывоэмиссионной модели образование новых катодных пятен при таком напряжении невозможно, но функционирование существующих пятен, по-видимому, возможно до тех пор, пока падение потенциала на дуге не станет ниже первого ионизационного потенциала атомов материала катода.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A11-A15].

**В пятой главе** представлены результаты инициирования вторичного дугового разряда в низковольтной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), эксплуатируемой в вакууме и газе низкого давления, в частности, в РЭА космических аппаратов. Вторым исследуемым параметром данного раздела работы является критический размер дефекта сплошности диэлектрического покрытия электродов, который способен привести к инициированию вторичного дугового разряда в промежутке, а также сравнение экспериментальных результатов с результатами теоретического моделирования, проведенного в [6]. Эксперименты по инициированию вторичного дугового разряда имеют общую физическую природу с инициированием вакуумной дуги после перехода тока через ноль, происходящее при неуспешном выключении тока в ВДК.

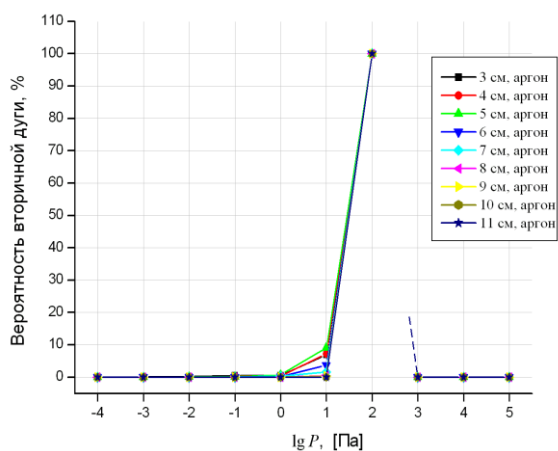
Схема эксперимента по вторичному дугообразованию представлена на рисунке 12. В камере создавалось давление, которое варьировалось от атмосферного до уровня вакуума  $10^{-4}$  Па. Рабочие газы – воздух и аргон. В экспериментах использовались два разрядных промежутка: промежуток для инициирования первичной дуги и контрольный промежуток для тестирования вероятности вторичного дугообразования. Промежутки находятся на расстоянии  $L$ , которое изменяется в пределах от 3 до 30 см, и является ключевым параметром системы. Промежуток вторичной дуги образован двумя



**Рисунок 12** – Схема эксперимента по вторичному дугообразованию. Ch1 – катодный ток первичной дуги; Ch2 – ток зонда; Ch3 – катодный ток вторичной дуги; Ch4 – анодный ток первичной дуги; Ch5 – напряжение на поджигающем промежутке первичной дуги; Ch6 – напряжение на вторичной дуге.

параллельными алюминиевыми уголками, расположенными на расстоянии 2 мм друг от друга. Между уголками прикладывалась разность потенциалов 100 В. В пространстве за промежутком вторичной дуги располагался зонд, используемый для измерения концентрации плазмы.

При режиме импульсно-периодического горения первичной дуги



**Рисунок 13** – Зависимость вероятности вторичного дугообразования в аргоне от давления остаточной атмосферы.

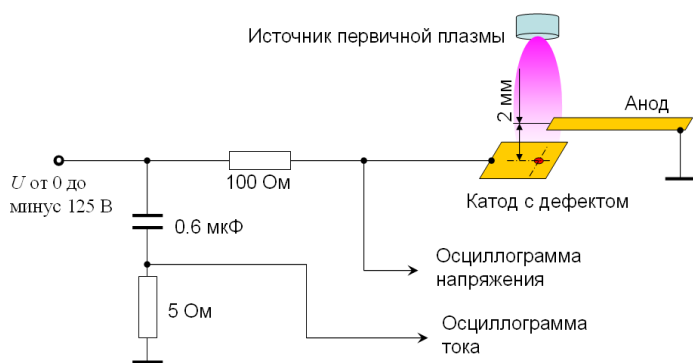
расстояние  $L$  постепенно уменьшается до тех пор, пока не начнёт происходить инициирование вторичной дуги, что регистрируется свечением плазмы в промежутке  $K2-A2$  и осциллограммами тока. Вероятность вторичной дуги в атмосфере аргона низкого давления

достигала 100% при давлении порядка 100 Па и не зависела при этом от расстояния  $L$  (рисунок 13). Столь высокая

вероятность вторичной дуги и отсутствие зависимости вероятности дуги от  $L$  указывает на зажигание объемного разряда в камере перед зажиганием вторичной дуги. На зажигание объемного разряда указывало также наблюдение объемного свечения в камере. Вероятность вторичной дуги в воздухе низкого

давления имеет тенденцию, подобную экспериментам в аргоне, но в условиях настоящего эксперимента не достигает 100% и зависит от расстояния  $L$ .

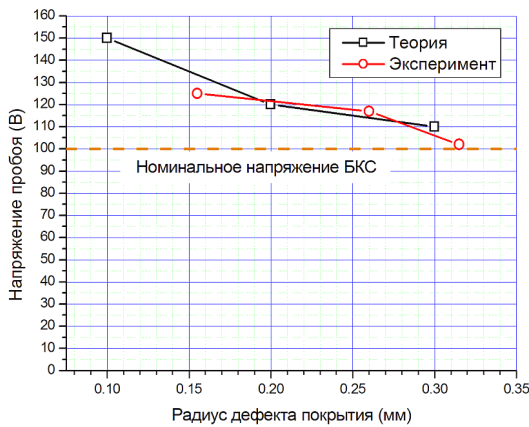
Результат зондовых измерений в области испытываемого промежутка (при условии, что вторичный промежуток заземлен) для воздуха и аргона показал, что рост измеряемой концентрации плазмы с ростом давления свидетельствует о том, что во всех измерениях при давлении 0,1 Па и выше вторичное дугообразование происходило в условиях горения несамостоятельного объёмного разряда, поддерживаемого источником первичной плазмы. Поскольку именно в этом диапазоне регистрировались вторичные дуги, можно сделать вывод о том, что вторичная дуга в РЭА КА зажигается через стадию инициирования объёмного разряда.



**Рисунок 14** – Схема эксперимента по проверке критерия минимального размера дефекта, ответственного за инициирование дуги.

Если электроды покрыты лаком, то напряжения порядка 100 В недостаточно для дугообразования за исключением ситуации, когда диэлектрическое покрытие содержит дефекты нарушения сплошности покрытия. Для экспериментальной проверки критерия размера дефекта

сплошности диэлектрического покрытия на медной поверхности, покрытой слоем лака толщиной порядка 10 мкм, с использованием лазера были выполнены отверстия в покрытии, обнажающие медную подложку. Всего на плате было выполнено 5 отверстия диаметрами 630, 520, 310, 220, и 120 мкм. Эксперименты проводились в атмосфере аргона низкого давления уровня 100 Па. В качестве источника первичной плазмы использовался источник плазменной струи с полым катодом (рисунок 14). После включения источника плазмы на промежутке с дефектом на катоде медленно повышалось напряжение, пока не происходил пробой с протеканием тока разряда.



**Рисунок 15** – Зависимость напряжения иницирования вторичной дуги от радиуса дефекта в диэлектрическом покрытии на катоде. Данные теоретических исследований взяты из [6].

Результаты экспериментальных исследований сравнивались с расчетом динамики разрядного процесса, выполненного в [6]. Результаты сравнения данных эксперимента с данными теоретического анализа критерия иницирования вторичного разряда при наличии дефекта сплошности диэлектрического покрытия на катоде приведены на рисунке 15.

Сравнивая результаты теоретического моделирования и экспериментальной проверки, получено согласие по критерию размера дефекта защитного диэлектрического покрытия, представляющего риск вторичного дугообразования. Для напряжения 100 В дефект порогового размера имеет радиус 300 мкм. Но с учетом возможных перенапряжений при переходных процессах в DC-DC преобразователях, используемых в системах электропитания КА, пороговым размером следует полагать дефект, характерный полный размер которого составляет 200 мкм.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [A16-A18].

### **Основные результаты работы заключаются в следующем:**

1. Разработана методика, позволяющая восстановить динамику катодного слоя после перехода тока сильноточной вакуумной дуги через ноль в условиях эскалации напряжения на разрядном промежутке. Найдено, что средняя скорость расширения катодного слоя по порядку величины равна  $10^5$  см/с, что соответствует скорости Бома. Установлено, что скорость расширения слоя увеличивается с увеличением темпа роста ПВН и уменьшается с увеличением тока разряда.

2. С использованием одиночного и двойного зондов Ленгмюра измерена температура электронов в течение времени горения сильноточной вакуумной дуги и восстановлена концентрация плазмы после обрыва дуги в вакуумной

дугогасительной камере. Найдено, что температура электронов составляет величину порядка 3 эВ и не зависит от тока разряда и момента измерения. Концентрация плазмы вблизи перехода тока дуги через ноль составляет величину менее  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

3. Разработан и реализован метод измерения температуры поверхности контактов вакуумной дугогасительной камеры после обрыва сильноточной дуги. Показано, что в отсутствии внешнего магнитного поля температура анода растет линейно с увеличением тока разряда. При наложении внешнего магнитного поля общая температура поверхности анода уменьшается.

4. В сильноточной вакуумной дуге зарегистрирован анодный факел с яркосветящейся оболочкой. Механизм появления светящейся оболочки анодного факела объясняется формированием ионизационно-рекомбинационного фронта при столкновении катодной плазмы с потоком испаренного материала анода.

5. Установлено, что существует оптимальное время горения сильноточной вакуумной дуги, лежащее в диапазоне от 1 до 7 мс, в пределах которого прерывание дуги не приводит к пробоем контактного промежутка в условиях роста переходного восстанавливающегося напряжения.

6. В режиме резкого снижения тока вакуумной дуги в процессе перераспределения токов обнаружен не наблюдавшийся ранее режим горения дуги при напряжениях порядка первого потенциала ионизации атомов металлов, входящих в состав материала электродов. Данный режим представляет большой практический интерес при шунтировании сильных токов.

7. Разработан и реализован метод, позволяющий оценить вероятность инициирования вторичного дугового разряда в изолирующем промежутке при напряжениях уровня 100 В в условиях воздействия на промежуток продуктов горения слаботочного первичного разряда. Проведены экспериментальные исследования инициирования вторичной дуги при наличии дефекта сплошности изоляционного покрытия электрода при напряжениях ниже

минимума кривой Пашена. Найдено, что дефект сплошности покрытия электродов размером 200 мкм и более способен приводить к образованию вторичного дугового разряда при напряжениях уровня 100 В в условиях окружения промежутка плазмой первичного разряда.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- [A1] Schneider A.V. Diagnostics of the Cathode Sheath Expansion after Current Zero in a Vacuum Circuit Breaker / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, G. Sandolache, and S. W. Rowe // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no 6, pp. 1349-1353, June 2011.
- [A2] Шнайдер А.В. Зондовый метод диагностики катодного слоя после нуля тока вакуумной дуги / А.В. Шнайдер, С.А. Попов, А.В. Батраков // Известия ВУЗов. Физика, 2013. Т. 56. № 7-2. С. 373-378.
- [A3] Popov S. Experimental Investigation of the Sheath Dynamics in the Post-Arc Period / S. Popov, A. Schneider, A. Batrakov, S. Rowe, G. Sandolache // in Proc. XXIV ISDEIV, Braunschweig, Germany, 2010, pp. 403-406.
- [A4] Schneider A. Experimental Study of Sheath Dynamics after Current Zero of AMF-Stabilized Vacuum Arc / A. Schneider, S. Popov, H. Schellekens, G. Sandolache, and A. Batrakov // in Proc. XXV ISDEIV, Tomsk, Russia, 2012, pp. 255-257.
- [A5] Batrakov A. Observation of an Anode Spot Shell at the High-Current Vacuum Arc / A. Batrakov, A. Schneider, S. Rowe, G. Sandolache, A. Markov, and L. Zjulkova // XXIV ISDEIV, 2010, Braunschweig, Germany, pp. 351–354.
- [A6] Попов С.А. Анодный факел сильноточной вакуумной дуги / С.А. Попов, А.В. Шнайдер, А.В. Батраков, G. Sandolache, S. W. Rowe, А.Б. Марков, Л.А. Зюлькова // ЖТФ, 2012, Т.82, №7, С. 44-50.
- [A7] Schneider A.V. Anode Temperature and Plasma Sheath Dynamics of High Current Vacuum Arc After Current Zero / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, G. Sandolache, and H. Schellekens // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no 8, pp. 2022-2028, August 2013.



- [A8] Schneider A. Measurements of Anode Temperature around Current Zero Following Interruption of High Currents / A. Schneider // in Proc. XXV ISDEIV, Tomsk, Russia, 2012, pp. 177-180.
- [A9] Batrakov A.V. Observation of the Plasma Plume at the Anode of High-Current Vacuum Arcs / A.V. Batrakov, S.A. Popov, A.V. Schneider, G. Sandolache, and S. W. Rowe // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no 6, pp. 1291-1295, June 2011.
- [A10] Schneider A. Ionization-Recombination Front in High-Current Vacuum Arc / A. Schneider, S. Popov, G. Sandolache, A. Batrakov, and S. Rowe // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no 11, pp. 2844-2845, Nov. 2011.
- [A11] Шнайдер А.В. Исследование процессов перераспределения тока между вакуумной дугогасительной камерой и полупроводниковым ключом / А.В. Шнайдер, С.А. Попов, А.В. Батраков, В.А. Лавринович, В.А. Волостных // Известия ВУЗов. Физика, 2014. Т. 57. № 9-3. С. 267-272.
- [A12] Schneider A.V. High-Current Vacuum Arc Shynted by a Semiconductor Switch on Kiloampere Current Interruption / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, V.A. Lavrinovich // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 44, no 7, pp. 1235-1240, July 2016.
- [A13] Popov S.A. Study of Voltage Drop Dynamics for Vacuum Arc and Thyristor Connected in Parallel / S.A. Popov, A.V. Schneider, V.A. Lavrinovich, and A.V. Batrakov // in Proc. XXV ISDEIV, Tomsk, Russia, 2012, pp. 369-371.
- [A14] Popov S.A. Experimental Study of Dynamics of Current Redistribution at Parallel Connection of Vacuum Interrupter and Diode Assembly / S.A. Popov, A.V. Schneider, A.V. Batrakov, and V.A. Lavrinovich // in Proc. XXVI ISDEIV, Mumbai, India, 2014, pp. 501-503.
- [A15] Lavrinovich V.A. Experimental Investigation of Influence of a Contact Separation Time on the Breaking Capacity of a Vacuum Circuit Breaker / V.A. Lavrinovich, S.A. Popov, A.V. Schneider, and A.V. Batrakov // in Proc. XXVI ISDEIV, Mumbai, India, 2014, pp. 505-508.
- [A16] Batrakov A.V. Development of the technique for spacecraft equipment examination on secondary arcing hazard / A.V. Batrakov, S.G. Kochura, A.V.

Mikov, S.A. Popov, A.V. Schneider, S.B. Suntsov // in Proc. XXVII ISDEIV, Suzhou, China, 2016, pp. 786-788.

[A17] Батраков А.В. Физическое моделирование вторичного дугообразования в диапазоне давлений окружающей среды от атмосферного уровня до уровня вакуума / А.В. Батраков, Е.Л. Дубровская, К.В. Карлик, В.С. Ким, С.Г. Кочура, В.А. Лавринович, С.Б. Сунцов, А.В. Шнайдер // Известия ВУЗов. Физика, 2014. Т. 57. № 11. С. 7-11.

[A18] Батраков А.В. Плазменный метод обнаружения дефектов изоляции в бортовой аппаратуре космических аппаратов / А.В. Батраков, С.А. Попов, Е.В. Нефедцев, Е.Л. Дубровская, А.В. Шнайдер // XIX Международная науч.-практич. конф. «Решетневские чтения». Красноярск 2015, сс. 272-274.

#### **Цитируемая литература**

- [1] Garrett H.B. Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects / H.B. Garrett and A.C. Whittlesey - California Institute of Technology, 2011.- 242 p.
- [2] Slade P.G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application / P.G. Slade -NY: CRC Press, 2008, ch. 2.
- [3] J. Janiszewski, Z. Zalucki // Czechoslovak J. Phys.- 1996.- vol. 46.- No. 10.- pp. 961-971.
- [4] Janiszewski J. Photographic study of discharge development and high-current arc modes in vacuum / J. Janiszewski, Z. Zalucki // Proc. 17th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1996. Berkley, USA.- p. 220-225.
- [5] Gidalevich E. Shock front formation at vacuum arc anodes / E. Gidalevich, S. Goldsmith, and R. L. Boxman // J. Appl. Phys., vol. 92, No. 9, pp. 4891–4896, 2002.
- [6] Kozhevnikov V.Y. Design and diagnostics of arc-resistant electronics for satellite telecommunication systems / V.Y. Kozhevnikov , A.V. Kozyrev , N.S. Semeniuk , A.V. Batrakov , V.M. Karaban , D.S. Kosov // Proc. 18th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, 2016 (DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495441).