

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шнайдера Антона Витальевича "Процессы при переходе тока силовоточной вакуумной дуги через ноль", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы диссертации. В настоящее время вакуумный дуговой разряд получил широкое применение не только в ряде технологических процессов (вакуумно-дуговая плавка, сварка, ионно-плазменное напыление, модификация поверхности материалов ионными и электронными пучками), но и для коммутации электрического тока в вакууме (силовоточные вакуумные разрядники и вакуумные выключатели (прерыватели) тока). С другой стороны, вакуумный дуговой разряд представляет собой уникальный физический объект, настолько сложный, что до сих пор не существует общепризнанной теории его функционирования.

Следует отметить, что в относительно слабых режимах разряда общепринятым является представление о том, что основные свойства вакуумной дуги определяются процессами в катодных пятнах. В силовоточных же режимах, когда проявляется контрагирование разрядного канала, круг процессов, определяющих горение вакуумной дуги, как и их взаимосвязь, еще точно не установлены.

В настоящее время силовоточные вакуумные прерыватели тока среднего диапазона напряжений широко используются в электроэнергетике во всем мире. Этот тип выключателей полностью вытеснил технологию отключения дуги в воздухе и масле. А за счет компактных размеров, высокой отключающей способности и на порядок большего коммутационного ресурса потеснил элегазовые коммутаторы в более высоковольтный диапазон. В связи с вышеизложенным, тематика диссертационной работы является актуальной как с точки зрения исследования плазменных и приэлектродных процессов в силовоточных режимах горения вакуумной дуги, так и с точки зрения выяснения возможностей дальнейшего совершенствования коммутационных и эксплуатационных характеристик вакуумно-дуговых выключателей.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте силовоточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН). Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 115 наименований. Общий объем составляет 166 страниц машинописного текста, включая 91 рисунок и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, ее научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен сжатый литературный обзор современного состояния исследований вакуумной дуги. В логичной последовательности рассмотрены общие представления о вакуумном дуговом разряде, методы инициирования вакуумной дуги, диффузионный и контрагированный режимы горения вакуумной дуги и роль при этом анода. Рассмотрены также процессы, имеющие важнейшее значение именно для вакуумных выключателей – восстановление электрической прочности вакуумного промежутка и формирование катодного слоя при переходе тока через ноль. На основании рассмотренного литературного обзора автором сформулированы основные задачи, решению которых посвящена диссертация. Эти задачи действительно актуальны, поскольку расширение диапазона отключаемых токов сталкивается именно с проблемами формирования катодного слоя и восстановления высокого напряжения, причем важнейшее влияние на эти процессы оказывает перегрев поверхностных слоев анода и активное участие анодной паро-плазменной среды в явлениях, развивающихся в размыкаемом промежутке выключателя.

Вторая глава посвящена описанию исследований динамики катодного слоя, формирующегося при переходе сильноточной вакуумной дуги через ноль тока и вызванного ростом напряжения между размыкающимися электродами. В технологии искусственного размыкания электродов дуги формирование такого слоя имеет принципиальное значение, поэтому диссертант предпринял ряд методических усилий, позволивших решить поставленные задачи. Автором описан экспериментальный стенд, который позволил имитировать режим короткого замыкания электрической сети переменного тока в исследуемой разрядной камере. Особо хочется подчеркнуть, что кроме хорошего воспроизведения эксплуатационных режимов работы вакуумных прерывателей с разводными контактами в диапазоне токов до 15 кА, данный стенд позволяет проводить измерение не только электрических и эксплуатационных характеристик прерывателей, но в нем заложены большие возможности диагностики приэлектродных и плазменных процессов, позволяющие получать детальные данные о параметрах плазмы и приэлектродных процессов, способствующих изучению механизмов рассматриваемых явлений. И в первую очередь это относится к разработанным методикам зондовых измерений параметров плазмы в сильноточной вакуумной дуге, а также динамики расширения катодного слоя после обрыва тока дуги в условиях роста напряжения на промежутке. С помощью двойного зонда Ленгмюра, работающего в режиме насыщения ионного тока, была измерена температура электронов ($\sim 3\text{эВ}$) и оценена концентрация плазмы во время горения сильноточной дуги в непосредственной близости от межэлектродного промежутка ($\sim 10^{14}\text{ см}^{-3}$). А исследование и разработка методики одиночного зонда Ленгмюра, работающего в режиме насыщения электронным током, позволила расширить область измерения концентрации плазмы на время после нуля тока (до $\sim 10^{12}\text{ см}^{-3}$). Дальнейшее совершенствование методики привело к разработке координатно-чувствительного метода исследования этой стадии, основанного на использовании позиционируемой линейки одиночных зондов Ленгмюра. Несомненным достоинством работы является теоретический анализ применимости разработанных зондовых методик в различных стадиях исследуемого процесса, а также оценка их пространственного и временного разрешений. С помощью данной методики была измерена средняя скорость расширения катодного слоя в промежутке в зависимости от коммутируемого тока дуги, скорости роста переходного восстанавливающегося напряжения и потенциала внешнего экрана. Оказалось, что скорость расширения катодного слоя практически не зависит от указанных параметров и близка к 10^5 см/с . Этот результат свидетельствует о том, что расширение слоя носит стационарный характер и определяется боровской скоростью ионов, входящих в формирующийся слой со стороны плазмы.

Полученные в данной главе результаты изучения динамики катодного слоя при росте переходного восстанавливающегося напряжения обосновывают первое положение, выносимое автором на защиту, приоритетность которого подтверждается 4 публикациями в профильных журналах и трудах международного симпозиума.

Третья глава посвящена исследованию процессов на аноде при сильноточном вакуумном разряде в зависимости от тока дуги, наличия внешнего продольного магнитного поля и материалов электродов (медь, медно-хромовый композит). В первой части главы представлена разработанная методика и измерена температура поверхности анода как в процессе горения вакуумной дуги, так и после перехода тока сильноточной вакуумной дуги через ноль. Показано, что в отсутствие внешнего магнитного поля температура анода растет линейно с увеличением тока разряда, а ее значение близко к результатам других авторов. Однако наиболее интересные результаты были получены по исследованию анодного пятна, возникающего на завершающей стадии горения сильноточной вакуумной дуги. Наиболее яркие результаты получены в случае CuCr электродов, и автором дано объяснение этому факту. На основе разработанной методики регистрации спектрально-дифференцированных

изображений свечения анодного факела, было показано, что излучение из оболочки эмитируется преимущественно нейтральными атомами, а оболочка окружена диффузным гало, свет из которого излучается преимущественно ионами. Используя методику абсорбции излучения зондирующего лазера, настроенного на резонансную линию поглощения атомами паров материала анода, автором было установлено, что плазма анодного факела не является оптически плотной в исследуемом спектральном диапазоне излучения. Это позволило восстановить радиальное распределение свечения анодного факела на основе преобразования Абея и показать, что излучение вещества, находящегося внутри оболочки, значительно слабее, чем вещества в оболочке. Полученный результат свидетельствует в пользу ионизационно-рекомбинационного механизма формирования оболочки анодного факела, формируемого в результате столкновения потока высокоионизованной катодной плазмы с потоком испаренного материала анода, имеющего большую долю нейтральной компоненты.

Результаты исследований анодного факела на медно-хромовых электродах обосновывают второе положение, выносимое автором на защиту, приоритетность которого подтверждается 6 публикациями в журналах и трудах профильного международного симпозиума.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния длительности горения сильноточной вакуумной дуги на отключающую способность вакуумного выключателя, а также исследованию эффективности восстановления электрической прочности выключателя при его шунтировании полупроводниковыми структурами (тиристорная или диодная сборки). Было установлено, что существует оптимальное время горения дуги, в пределах которого прерывание дуги не приводит к пробоем контактного промежутка в условиях роста переходного восстанавливающегося напряжения. Увеличение времени горения дуги за пределы оптимального диапазона приводит к пробоям вследствие контрагирования дуги и образования анодного пятна с интенсивным испарением материала анода. Уменьшение времени горения дуги приводит к пробоем промежутка из-за сильных электрических полей в условиях роста переходного восстанавливающегося напряжения в коротком (недостаточно разведенном к этому времени) вакуумном промежутке. Кроме этого в данной главе продемонстрирована перспективность шунтирования вакуумнодугового промежутка полупроводниковым ключом с целью снижения вероятности пробоя после перехода тока дуги через ноль с последующим восстановлением на промежутке высокого рабочего напряжения в диапазоне до 10 кВ.

Результаты исследований влияния длительности горения и амплитуды тока сильноточной вакуумной дуги на отключающую способность выключателя, а также исследований эффективности восстановления электрической прочности выключателя при его шунтировании тиристорным ключом обосновывают третье положение, выносимое автором на защиту.

В пятой главе исследуются процессы инициирования дугового разряда в промежутке с напряжением 100 В, которое используется для питания радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Проблема состоит в том, что элементы такой аппаратуры часто оказываются в окружении внешних источников плазмы, что приводит к инициированию пробоя, загоранию вакуумной дуги и, соответственно, выходу аппаратуры из строя. Следует отметить, что, несмотря на, казалось бы, разные области техники, изучаемые в данной главе и в предыдущих главах диссертации, по существу речь идет о физических явлениях, близких к тем, что определяют природу вторичного инициирования вакуумной дуги при неуспешном выключении тока в вакуумном выключателе. Некоторое отличие состоит лишь в том, что зачастую элементы радиоэлектронной аппаратуры покрывают тонкой изолирующей пленкой.

Для выяснения причин инициирования дугового разряда автором диссертации исследована вероятность дугообразования в зависимости от остаточного давления газа в

разрядном промежутке (моделируемого напуском аргона или воздуха), расстояния от источника плазмы до тестируемого промежутка и размера дефекта сплошности диэлектрического изолирующего покрытия катода. Для этих целей разработана экспериментальная установка с возможностью измерения зондовым методом параметров плазмы, генерируемой первичным источником в тестируемом промежутке. Соответственно, созданы и испытаны необходимые источники плазмы, позволяющие имитировать плазму первичного дугового разряда. Наиболее интересный результат заключается в том, что процесс инициирования дуги в тестируемом промежутке при давлениях вблизи минимума кривой Пашена происходит через стадию зажигания несамостоятельного объёмного разряда, инициированного и поддерживаемого первичным источником плазмы. В случае, когда в качестве рабочего газа использовался аргон, было показано, что дефект сплошности изолирующего покрытия катода имеет критический размер (~0,2 мм), выше которого вероятность вторичного дугообразования при напряжении на промежутке 100 В резко возрастает.

Результаты исследований инициирования плазмой вторичного дугового разряда в атмосфере аргона при давлении 100 Па при напряжении уровня 100 В на электродах, покрытых диэлектрической пленкой с дефектом сплошности обосновывают четвертое положение, выносимое автором на защиту.

В заключении изложены основные результаты работы, обоснована достоверность результатов исследований, отмечен личный вклад автора.

Общие характеристики работы. Материал диссертации и автореферата соответствует отрасли технических наук по специальности 05.27.02 – “вакуумная и плазменная электроника”. Содержание диссертации соответствует формуле специальности, отвечает пунктам 1, 3, 4 паспорта специальности, а именно:

- исследования закономерностей взаимодействия свободных электронов и ионов с электромагнитными полями, создаваемыми в объемах вакуумных и газоразрядных приборов;
- прикладные вопросы физики разрядов в газе и вакууме применительно к созданию соответствующих приборов;
- создание новых и совершенствование существующих вакуумных и газоразрядных приборов, включая вопросы разработки научных основ физических и технических принципов реализации и совершенствования указанных приборов и их основных компонентов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Обоснованность полученных научных положений обусловлена, прежде всего, четкостью формулирования цели и конкретных задач исследований, находящихся в тесной связи с современным состоянием исследований в этой области и конкретными техническими проблемами, возникающими при практической реализации соответствующих технологий. Важно отметить, что для достижения этих целей использовались современные диагностические методы и экспериментальные подходы, соответствующие мировому уровню, что подтверждается обсуждением полученных результатов на профильных международных научных симпозиумах.

Достоверность основных положений, научных выводов и результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, совпадением экспериментальных результатов и теоретических оценок и сравнением полученных результатов с данными других работ.

Можно выделить следующие **основные результаты работы**, определяющие уровень ее научной новизны:

- На основе разработанной координатно-чувствительной методики с использованием позиционируемой линейки одиночных зондов Ленгмюра установлено, что средняя скорость расширения катодного слоя в вакуумном выключателе после нуля тока при росте

переходного восстанавливающегося напряжения составляет $\sim 10^5$ см/с, практически не зависит от коммутируемого тока и темпа роста восстанавливающегося напряжения и фактически определяется боровской скоростью ионов, входящих в формирующийся слой со стороны плазмы.

- В сильноточной дуге вакуумного выключателя с доминирующими в настоящее время медно-хромовыми композитными электродами в отсутствие внешнего магнитного поля устойчиво формируется анодный факел. Показано, что излучение из оболочки факела эмитируется преимущественно нейтральными атомами, а оболочка окружена диффузным гало, свет из которого излучается преимущественно ионами. При этом излучение оболочки факела значительно интенсивнее, чем излучение из его внутреннего объема, что свидетельствует в пользу ионизационно-рекомбинационного механизма формирования оболочки анодного факела, образующегося в результате столкновения потока высокоионизованной катодной плазмы с потоком испаренного материала анода, имеющего большую долю нейтральной компоненты.

- Для вакуумного выключателя существует оптимальное время горения сильноточной вакуумной дуги при выключении тока в отношении эффективности восстановления электрической прочности выключателя при росте переходного обратного напряжения, что говорит о важности синхронизации момента разведения контактов с фазой коммутируемого тока.

- Инициирование дуги при напряжении 100 В, применяемого в питании радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, в условиях внешнего источника плазмы и газа низкого давления происходит через стадию объемного несамостоятельного разряда, который иницируется и поддерживается внешним источником плазмы.

Практическую ценность работы составляют:

- Разработка методик и измерения параметров плазмы в стадии восстановления высокого напряжения на вакуумном выключателе, которые могут позволить найти пути решения одной из основных проблем при их эксплуатации, а именно пробоя после нуля тока.
- Исследование анодных пятен и их влияния на пробой после нуля тока в сильноточной дуге с доминирующими на сегодняшний день медно-хромовыми электродами может способствовать более обоснованному поиску и созданию эффективных электродных материалов для вакуумных выключателей.
- Демонстрация перспективности шунтирования вакуумнодугового промежутка полупроводниковым ключом с целью снижения вероятности пробоя после перехода тока дуги через ноль.
- Разработка источников плазмы, позволяющих имитировать плазму первичного дугового разряда при тестировании пробоев радиоэлектронной аппаратуры и дефектов сплошности изоляционного покрытия, предотвращающего дугообразование, в системах электропитания радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

Апробация результатов исследований

Анализ опубликованных работ и материалов диссертации позволяет сделать вывод, что все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично.

По результатам выполненных исследований опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах. Материалы 9 докладов опубликованы в трудах профильных международных симпозиумов и научно-практических конференций.

Замечания

1. Не описана позиция двойного зонда относительно электродной системы при определении электронной температуры и концентрации плазмы в течение горения сильноточной вакуумной дуги до нуля тока. Не описана осевая у-позиция одиночного зонда при определении концентрации плазмы после перехода тока дуги через ноль (см. таблица 2.1).

2. Одним из основных факторов пробоя межэлектродного промежутка после нуля тока при восстановлении на промежутке высокого рабочего напряжения предполагается наличие паров материала анода вследствие его высокой температуры, которые формируют анодный факел. Было бы интересно прямое измерение температуры анода после нуля тока с помощью методики представленной в третьей главе не только в зависимости от тока дуги (как это там сделано), но и от его длительности, контролируемой моментом размыкания контактов. В этом случае была бы получена и исследована, может быть, более универсальная зависимость температуры анода от полной энергии разряда до нуля тока, а положение, выносимое на защиту по результатам четвертой главы, было бы обосновано прямыми экспериментальными измерениями.

3. В тексте диссертации встречаются описки и стилистические неточности, к счастью не мешающие понять суть изложения материала. Например, использование сочетания "плазма ... эродировать" во второй главе несколько "не типично", т.к. термин эрозия обычно применяется для описания разрушения (разъедания) объектов в твердом агрегатном состоянии. Затрудняет чтение работы отсутствие условного обозначения главного исследуемого элемента *VCB* на принципиальной электрической схеме экспериментального стенда Рис. 2.1., как это сделано далее на модернизированной схеме Рис. 4.2.

Заключение. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научно-исследовательских и научно-технических задач по совершенствованию коммутационных и эксплуатационных характеристик сильноточных вакуумных прерывателей тока среднего класса напряжений и поиска путей решения проблемы дугообразования в системах электропитания космических аппаратов. Полученные результаты, несомненно, важны как для фундаментальной составляющей физики вакуумного разряда, так и для дальнейшего совершенствования коммутационной высоковольтной техники, имеющей широкое практическое применение во всем мире. Диссертация представляет собой целостную научную работу, содержит совокупность выносимых на защиту научных результатов и положений, опубликованных в профильной отечественной и международной печати, и свидетельствует о большом личном вкладе автора. Замечания, которые отмечены в данном отзыве, в принципе, не снижают высокую оценку выполненных исследований. Считаю, что диссертация соответствует всем требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", а ее автор Шнайдер Антон Витальевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Официальный оппонент

Старший научный сотрудник ИЭФ УрО РАН
Доцент по кафедре электрофизики УрФУ, к. ф.-м. н.



И.В. Уйманов

Подпись Уйманова И.В. заверяю
Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН
к. ф.-м. н.



Е.Е. Кокорина

7 декабря 2016 г.