

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке и трансферу технологий
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук

Л. Г. Сухих
2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертацию Нефедцева Евгения Валерьевича «Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Актуальность темы исследования

Достижения современной технической физики во многом связаны с использованием электроизоляционных свойств вакуума, а также с возможностью коммутирования в вакууме больших электрических токов. В то же время по данным направлениям остаются нерешенными ряд фундаментальных проблем, в частности, остаются открытыми вопросы о принципиальной возможности удержания в плоском вакуумном промежутке электрических полей вплоть до уровня напряженностей свыше 1 ГВ/м, о природе процессов, приводящих к резкому снижению импульсной электрической прочности вакуумных промежутков, о структуре взрывоэмиссионной плазмы, определяющей коммутацию разрядных промежутков, о механизмах импульсного пробоя формирующегося катодного ионного слоя в плазмонаполненных диодах. Ответы на данные вопросы важны для дальнейшего совершенствования электрофизических устройств и связанных с ними технологиями обработки материалов, поэтому выбранная тема исследований является актуальной.

Оценка содержания работы и ее завершенности

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы, включающего 392 наименования на 27 страницах. Общий объем диссертации составляет 287 страниц, включая 121 рисунок.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна результатов исследований, практическая и теоретическая значимость, изложены методы исследований, представлены выносимые на защиту научные положения, отмечен личный вклад автора.

Глава 1 представляет собой обзор научных работ по теме инициирования вакуумного электрического пробоя. Важной частью главы является изложение новых представлений об инициировании пробоя со стороны явлений, протекающих в самом теле электродов, в частности о том, что пробую вакуумного промежутка могут предшествовать интенсивные процессы генерации дислокаций в материале электродов. В главе сделаны важные обобщения и вывод о том, что совокупности имеющихся данных о явлениях в электродах,

инициирующих импульсный вакуумный пробой, обладающих изначально чистой и гладкой поверхностью, недостаточно.

В главе 2 дано описание технологического и экспериментального оборудования, которое использовались в исследованиях импульсного вакуумного пробоя. Описан оригинальный подход по очистке и полировке поверхности электродов вакуумных промежутков импульсной переплавкой электронным пучком на глубину порядка единиц микрометров. Описано экспериментальное оборудование, позволяющие осуществлять тестирование импульсной электрической прочности вакуумных промежутков и воздействие на катод вакуумной искрой, электрическим полем в режиме ограничения тока, использовать другие методы обработки поверхности электродов.

В главе 3 представлены результаты исследования влияния материала электродов и методов его обработки на электрическую прочность вакуумного промежутка, измеряемую при первом импульсном пробое. Показано, что метод импульсной переплавки поверхности является наиболее результативным в увеличении импульсной электрической прочности вакуумных промежутков по отношению к другим известным методам поверхности электродов. В режиме фиксации первого импульсного пробоя подтверждено ранее установленное правило роста электрической прочности вакуумного промежутка в ряду кристаллических структур материала электродов ГЦК-ОЦК-ГПУ, а также установлено значительное снижение импульсной электрической прочности в месте пересечения силовых линий локального магнитного поля с поверхностью катода, что согласуется с гипотезой дислокационного инициирования первого вакуумного пробоя. При воздействии электрического поля на металл со сравнительно высоким удельным сопротивлением, показано, что состояние поверхности металла и соответствующая ему эмиссионная способность необратимо изменяются при достижении значений напряженности поля ~ 1 МВ/см.

В главе 4 представлены результаты исследований предпробойной электронной эмиссии катода в режиме импульсного перенапряжения на основе оригинальной методики регистрации эмиссионных карт с помощью сцинтиллятора, размещенного за полупрозрачным (для электронов с энергией 200 кэВ) анодом и скоростной камеры, фиксирующей свечение. Продемонстрировано, что посредством импульсной переплавки формируется поверхность катода с качественно новым свойством: отсутствием локализованных центров электронной эмиссии. Таким образом, для возникновения пробоя в миллиметровом вакуумном промежутке при воздействии электрического поля с напряженностью 1–2 МВ/см наличие предпробойных эмиссионных центров необязательно – эмиссионный ток резко растет по параболическому закону вплоть до появления вакуумной искры. После первого пробоя появляются локальные эмиссионные центры, качественно схожие с теми, которые наблюдаются на механически обработанной поверхности электрода, а осциллограммы роста тока во время повторного пробоя имеют качественно иной вид.

В главе 5 представлены результаты изучения первичных морфологических и скрытых изменений в поверхностном слое и на поверхностях поликристаллических и монокристаллических катодов после воздействия коротких импульсов напряжения на вакуумные промежутки. В режиме частичного искрового пробоя получены подтверждения участия дефектов кристаллографического уровня в инициировании и развитии вакуумного пробоя: 1) парные корреляции в цепочках микрократеров на поверхности титана; 2) совпадение основной части центров взрывной эрозии с выходами дислокаций, выявленных заранее на поверхности монокристаллов меди; 3) выявление вокруг взрывоэмиссионных центров областей, модифицированных термоударными нагрузками; 4) появление на

поверхности легированного монокристаллического кремния кратерных цепочек и розеток, ориентированных по кристаллографическим направлениям. В режиме безискрового электрофизического воздействия на монокристаллической меди выявлены цепочки зарождающихся локальных деформаций.

Экспериментальные результаты, изложенные в главах 3–5 подтверждают предположение о том, что пробой вакуумного промежутка может быть обусловлен не только изначально действующими источниками темновых токов, связанных с неровностями и неоднородностями поверхности электродов. В отсутствие таковых и, как следствие, дальнейшее увеличение напряженности электрического поля приводит к морфологическим изменениям поверхности электродов и создает, по мнению автора, «предпробойное состояние», характеризуемое преобразованием части энергии электрического поля в различного типа деформации поверхностных слоев. Рассмотрены два гипотетических механизма резкого освобождения запасенной энергии в результате пересыщения поверхности электродов дефектами, приводящих 1) к кратковременным эмиссионным ливням ионов и 2) поверхностным разрушениям (трещинам, отслоениям), которые в дальнейшем играют роль локальных центров автоэмиссии электронов.

В главе 6 представлены результаты теоретического исследования динамики проводящей сферической частицы вблизи проводящей плоскости в изменяющемся внешнем электрическом поле, позволяющие оценить условия инициирования вакуумного пробоя металлическими частицами на этапе их отлета от электрода после преодоления сил адгезии. Полученное общее выражение для силы электрического взаимодействия частицы с электродом включало как отталкивающие, так и притягивающие составляющие. Расчет показал, что при плавном увеличении электрического поля частица улетает в межэлектродное пространство. В случае резкого увеличения поля частица может совершать возвратные движения, обусловленные взаимодействием индуцированных зарядов. С учетом некоторых упрощений даны аналитические оценки критическим значениям крутизны нарастания напряжения, при котором возникает переход к обратному движению. Показано, что напряженность электрического поля между микрочастицей и электродом может в десятки раз превышать среднюю напряженность поля основного промежутка, что является важным фактором инициирования пробоя.

В главе 7 изложены результаты теоретического исследования характеристик плазмы взрывоэмиссионного центра в искровой стадии вакуумного пробоя на основе модели, в которой плазма представлена множеством взаимопроникающих и взаимодействующих заряженных жидкостей, соответствующих подсистемам электронов и ионов разной зарядности и массы. Из решений, полученных в приближении сферической симметрии, следует, что плазменное облако состоит из внутреннего слоя с распределением концентрации частиц обратно пропорциональному квадрату радиальной координаты и широкого наружного нестационарного слоя редкой плазмы, который обеспечивает собственно коммутацию вакуумного промежутка. Показано, что величины расчетной удельной эрозии катода и скорости расширения границы плазмы соответствуют экспериментальным данным. Исследованы условия возникновения и характер развития неустойчивости в плазменном облаке взрывоэмиссионного центра, которые, как полагает автор, связаны с появлением участка доминирования электрической силы объемных зарядов, действующих на подсистему ионов. Процесс завершается резким ростом ступени потенциала в области редкой плазмы, что согласуется с данными экспериментов. Показано, что в токнесущей плазме различные зарядовые фракции ионов движутся синхронно и совместно. В случае же рассмотрения плазмы без протекания тока ионы меньшей

зарядности отстают от ионов большей зарядности и даже создают внутри плазмы области с повышенной концентрацией. Этот факт может быть положен в основу объяснения противоречивости экспериментальных данных в вопросе о возможности разделения потоков частиц по ионным фракциям в расширяющемся плазменном облаке, который дискутируется в литературе.

В главе 8 представлены результаты исследований условий короткоимпульсного пробоя катодного ионного слоя. Особое внимание уделено свойствам ионного слоя, формирующегося в плазмонаполненных источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков при ступенчатых смещениях катода амплитудой 20–40 кВ с крутизной фронта $3 \cdot 10^{11}$ В/с и выше. Условия возникновения пробоя ионного слоя, как и пробоя вакуумного промежутка, во многом определяются состоянием поверхности катода, поэтому при формулировке критериев импульсного пробоя катодного ионного слоя автором учтены данные, полученные в экспериментах с вакуумными промежутками. Особенности ионного слоя является неоднородное распределение электрического поля, обусловленное объемным зарядом ионов, а также бомбардировка ионами поверхности катода. На этом основании, автор выбрал целевыми параметрами численных расчетов амплитуду переходных всплесков напряженности электрического поля и плотности ионного тока вблизи поверхности катода. На основе расчетов исследована динамика плазмы вокруг проволочных торцов, являющихся элементами взрывоэмиссионного катода. Показано, что по мере расширения и смещения чашеобразной границы плазмы в пределах фронта импульса возникает фокусировка эмитируемого ей ионного тока на точку вершины торца. В то же время на вершине достигается напряженность поля, превышающая критические значения 1–2 МВ/см, которые согласно данным главы 3 достаточны для инициирования взрывной эмиссии на поверхности металла. Несмотря на эффект фокусировки ионного потока, показана несостоятельность реализации механизма короткоимпульсного пробоя ионного слоя, связанного с накоплением критического заряда на каких-либо гипотетических диэлектрических фрагментах поверхности катода (в отличие от пробоя стационарного ионного слоя). В то же время, роль ионного тока в инициировании пробоя, по мнению автора, значительна и связана с его эрозионным воздействием на поверхность металла. В экспериментальной части главы автор приводит данные модельных экспериментов, которые подтверждают данную точку зрения, как на примере проволочно-торцевого катода, так и на примере плоских катодов.

В заключении отмечены основные результаты диссертационной работы, соответствующие ее цели, научной новизне и защищаемым положениям, а также некоторые дальнейшие, особо важные, на взгляд автора, направления развития представленных в диссертационной работе результатов.

На основе изучения диссертации, можно сделать заключение о качественном изложении научного материала, представляющем собой логически завершенный кластер теоретической и экспериментальной работы, соответствующей специальности 01.04.04 – физическая электроника. Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений выводов и рекомендаций

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием современных методов экспериментального и теоретического исследования, а также внутренней непротиворечивостью полученных научных результатов. Сформулированные научные положения не противоречат данным, полученным в других работах, но в то же время дают возможность переосмыслить и расширить трактовку механизмов

короткоимпульсного пробоя вакуумных промежутков и катодного ионного слоя, а также понять суть процессов, происходящих в граничной области плазмы сравнительно низкой плотности, коммутирующей разрядные вакуумные промежутки в искровой стадии пробоя.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

В работе применены оригинальные подходы к экспериментальному исследованию физических явлений, связанных с электрическим пробоем плоских вакуумных промежутков, в частности метод импульсной переплавки поверхности электродов, (электро)химические методы выявления скрытых нарушений кристаллической структуры, фиксация предпробойных эмиссионных явлений в условиях импульсного перенапряжения.

Установлена возможность возникновения первого импульсного электрического пробоя вакуумного промежутка под действием электрического поля напряженностью $\sim 10^8$ В/м при отсутствии локальных эмиссионных центров, связанных с микроостриями, инородными микровключениями, микропорами, микротрещинами и другими локальными неоднородностями поверхности электродов. Получены свидетельства того, что в данных условиях роль инициаторов пробоя переходит к линейным дефектам кристаллической структуры и связанным с ними микропластическим явлениям.

Установлено снижение импульсной электрической прочности вакуумных промежутков в электродных системах металл–металл и металл–плазма под действием локального магнитного поля с индукцией порядка десятых долей Тесла и выше в области сгущения силовых линий магнитного поля на поверхности катода.

Показана возможность возвращения частицы на электрод под влиянием составляющей силы притяжения между индуцированными зарядами на поверхностях частицы и электрода, что объясняет некоторые физические явления, наблюдаемые в высоковольтных устройствах переменного и импульсного напряжения.

Проведено численное моделирование токнесущей расширяющейся плазмы взрывоэмиссионного центра без применения упрощений в отношении электронной компоненты плазмы (условие электронейтральности, адиабатичности движения и др.). Показана возможность нарушения устойчивости расширения плазменного облака, приводящего к разрыву потенциала электрического поля, которая не связана с нестабильностью поступления материала катода из взрывоэмиссионного центра в плазменное облако.

Теоретически исследована эволюция ионного слоя между выступом взрывоэмиссионного катода и заранее созданной плазмой с концентрацией заряженных частиц $10^{18}-10^{19}$ м⁻³ на стадии роста электрического смещения на катоде. Рассчитаны амплитуды всплесков напряженности прикатодного поля и плотности ионного тока, соответствующие наносекундному пробоею катодного ионного слоя. Экспериментально продемонстрировано разрушительное воздействие всплесков ионного потока на поверхность металлов на этапе формирования катодного ионного слоя.

Практическая ценность полученных результатов

Полученные научные результаты являются основой для постановки вопроса о предельных возможностях вакуумной изоляции и поиску новых подходов к повышению эксплуатационных характеристик электрофизических устройств.

На основе теоретического исследования динамически сложного поведения многоатомных проводящих частиц вблизи проводящей плоскости в нарастающем

электрическом поле могут быть разработаны новые принципы электростатического сепарирования частиц и их использования в микро- и нано-механике.

Исследование электрофизических условий пробоя вакуумного промежутка и катодного ионного слоя в рамках единой работы имеет большое практическое значение, поскольку плазмонаполненные электронные пушки с взрывоэмиссионным катодом служат инструментом импульсной переплавки поверхностного слоя электродов (глава 2), обеспечивая предельно высокое качество вакуумной изоляции.

В работе отмечены перспективные практические направления, связанные с очисткой поверхности нержавеющей стали от включений, возможностью управления распределением взрывоэмиссионных центров по поверхности катода путем размещения в теле катода намагниченных тел малых размеров.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты, полученные в диссертационной работе Е. В. Нефедцева можно рекомендовать к изучению и использованию в научных группах и организациях, занимающихся проектированием, созданием и эксплуатацией импульсного высоковольтного оборудования, сильноточных источников электронных и ионных пучков, генераторов электромагнитного излучения, двигателей малых космических аппаратов, моделировании энергетических воздействий высокой импульсной мощности на прочность металлических материалов.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертация представляет собой логически законченную работу, содержащую новые результаты фундаментального и прикладного характера в области исследования инициирования и развития импульсного электрического вакуумного пробоя.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации, содержит обоснованные выводы и рекомендации, отвечает требованиям ВАК РФ.

Критические замечания

1) П.1 раздела «Научной новизны», (с.11) сформулирован не совсем корректно: «Разработан и создан оригинальный комплекс методик.....», а в чем заключается оригинальность и, собственно, новизна не отражено в формулировке данного пункта.

2) Формулировка П.2 раздела «Научной новизны», (с.11) также требует доработки «Экспериментально установлено, что возникновение *первого* импульсного электрического пробоя может развиваться...при отсутствии эмиссионных центров связанных с..... Переход к искровой стадии первого пробоя в этом случае начинается с момента появления эмиссии с катода....», но за счет чего появляется эмиссия не указано в формулировке данного пункта. Этот вывод является очень важным в работе и автор посвящает ему значительную часть диссертации.

3) На страницах 64-65 диссертации приведена типовая процедура испытания ВП на импульсную электрическую прочность:

«1. Установление исходного межэлектродного зазора $d_0 \approx 10$ мм;

.....

4. Повторение пп. 2 и 3 до возникновения пробоя;»

О проведении контрольных испытаний на заведомо установленных зазорах, соответствующих найденному значению электрической прочности промежутка,

информации не содержится. Таким образом, к испытываемому вакуумному промежутку до возникновения первого пробоя в разных экспериментах может быть приложено разное количество импульсов испытательного напряжения и, соответственно, каждый раз по электродной системе протекает ток заряда ёмкости амплитудой «порядка сотен ампер», как отмечает сам автор работы (стр. 101 диссертации). Перечисленные факторы не учитываются в типовой процедуре испытания ВП на импульсную электрическую прочность и обсуждении результатов.

4) Есть несколько замечаний по оформлению диссертационной работы: порядок ссылок по тексту не всегда соответствует последовательности нумерации цитируемых научных работ в списке литературы (например, после ссылки [7] (стр.8) следует [139] или после [143] (стр.46) следует ссылка [203], [204]; рисунки на страницах 116 и 119 приведены под одним номером 5.13, также как и рисунки на страницах 117 и 119 под номером 5.14.

Заключение

Указанные недостатки не влияют на высокую научную ценность диссертации, а совокупность представленных результатов исследований может быть квалифицирована как решение крупной научной задачи, имеющей принципиальное значение для научного и практического использования электроизоляционных свойств вакуума, коммутации больших электрических токов.

Диссертационная работа соответствует, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» ВАК требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Нефедцев Евгений Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв рассмотрен и одобрен на семинаре научно-производственной лаборатории Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий. Протокол №75 от 08.07.2022г.

Председатель семинара, доктор технических наук, профессор

Ремнев Геннадий Ефимович

Секретарь семинара

Баранова Александра Александровна

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Юридический адрес: пр. Ленина, д. 30, г. Томск

e-mail: remnev@tpu.ru

Тел.: +7 (3822) 606405

Подписи Ремнёва Г.Е. и Барановой А.А. заверяю.
Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Кулинич Екатерина Александровна

