

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Нефедцева Евгения Валерьевича
«Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя
миллиметровых вакуумных промежутков», представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая
электроника.

Исследования вакуумного пробоя имеют почти вековую историю. Несмотря на это, не потерял своей актуальности вопрос о том, почему в плоских миллиметровых вакуумных промежутках не удается удерживать электрические поля напряженностью свыше ~ 0.1 ГВ/м без пробоя. В первой части диссертационной работы Нефедцевым Е. В. представлены новые результаты исследований первичных предпробойных процессов в вакуумных промежутках с использованием особых методов подготовки поверхности электродов, выявления скрытых дефектов, а также фиксации карт импульсной электронной эмиссии. Продемонстрировано, что после импульсного оплавления широким электронным пучком поверхность катода обретает новое качество, характеризующееся отсутствием тех локальных центров электронной эмиссии, с которыми можно было бы связать место будущего пробоя. Этот факт указывает на то, что непосредственно перед пробоем в материале катода, лишенного острий и других концентраторов поля, должны произойти быстрые и необратимые изменения, характеризующие подготовительную стадию развития пробоя, которую автор условно называет "холодной". Интересные результаты в этом направлении получены в экспериментах с монокристаллическими электродами. Среди них: выявление периодических групп локальных предпробойных микродеформаций на зеркально ровной поверхности; установление важной роли линейных дефектов кристалла в инициировании первых взрывоэмиссионных центров; обнаружение кристаллографической анизотропии в распределении кратерной эрозии. "Холодную" стадию развития пробоя автор связывает с конвертацией некоторой части энергии электрического поля в энергию упругих полей дислокаций, а начало искровой стадии – с освобождением этой энергии в процессах эмиссии частиц и образованием локальных отслоений поверхности, которые автоматически становятся перегретыми автоэммитерами. Обнаруженный в ходе выполнения работы эффект стимулирования пробоя локальным магнитным полем дополнительно подтверждает дислокационную гипотезу вакуумного пробоя, которая в последнее время начинает обсуждаться специалистами.

Актуальной проблемой также является снижение импульсной электрической прочности вакуумного промежутка при появлении на электродах микроскопических частиц. Изложенные в литературе данные о необычном поведении частиц в переменных и импульсных электрических полях и их влиянии на уровень утечек и вероятность возникновения пробоя в вакуумных и газонаполненных промежутках, привели автора к выводу о необходимости постановки и решения общей задачи о динамике проводящей частицы в окрестности электрода. Им впервые доказана возможность и рассчитан критерий возвратного движения заряженной сферической частицы, стартующей с электрода после преодоления сил адгезии в условиях нарастающего внешнего электрического поля. Расчеты показали, что между частицей и электродом возможно возникновение локального электрического поля напряженностью до 3–4 ГВ/м, которое, в свою очередь, может инициировать локальный пробой, а вслед за ним – пробой основного промежутка.

В контексте диссертационной работы возникновение вакуумной искры на катоде и ее развитие выглядит как процесс, завершающий этап инициирования вакуумного пробоя. Идея автора использовать для теоретического моделирования плазмы

взрывоэмиссионного центра классическую модель многих жидкостей, не связанных условием квазинейтральности, оказалась плодотворной. На основе решений, автору удалось детализировать в пространстве и времени характер расширения плазмы взрывоэмиссионного центра в области разрежения, показать согласованность решения с экспериментально измеряемыми параметрами, а также продемонстрировать нарушение устойчивости расширения плазмы на определенном этапе эволюции, что также согласуется с экспериментальными данными.

Материал заключительной главы актуален в отношении развития метода генерации низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, основанного на импульсном пробое промежутка катод–плазменный анод. Проведенное теоретическое исследование динамики формирования катодного ионного слоя, а также расчет сопутствующих переходных всплесков напряженности электрического поля и ионного тока вблизи поверхности катода могут быть использованы и в других практических приложениях. При анализе предпробойного состояния расширяющегося катодного ионного слоя автор учитывает результаты исследований, изложенных в первой части диссертации в отношении вакуумных промежутков. В частности, продемонстрировано, что эффект снижения электрической прочности вакуумного промежутка локальными магнитными полями может быть использован для управления распределением взрывоэмиссионных центров по поверхности катода плазмоннаполненной электронной пушки. Важными результатами экспериментальной части главы является установление факта разрушительного воздействия переходного всплеска ионного тока на материал катода и его влияния на процесс инициирования короткоимпульсного пробоя катодного ионного слоя наряду с электрополевым воздействием.

Замечания по автореферату.

1) На стр. 14 сказано, что вакуумный пробой инициируется “в месте пересечения пучком силовых линий поверхности катода”. Это очень неудачная формулировка, под это определение подходит вся поверхность катода.

2) На стр. 18 про различные следы эрозии сказано следующее: одни типы кратеров “преимущественно совпадают с местами маркеров”, другие типы кратеров субмикронных размеров “не совпадают с исходными положениями предварительно выявленных выходов линейных дефектов”. Здесь нужны количественные оценки среднего расстояния между центрами кратеров и маркерами с соответствующей статистической обработкой. Без этого статистическая достоверность одного из основных результатов диссертации выглядит несколько легковесной.

3) Главы 7 и 8 диссертации посвящены численному моделированию разлета плазмы и коротко-импульсного пробоя соответственно. Автор, видимо (явно это в тексте не сказано), использовал для расчетов самостоятельно написанные компьютерные программы. Однако, ни в реферате, ни в тексте диссертации не сказано ни слова об использованных при этом численных методах и схемах. Это существенный недостаток диссертации.

4) В главе 7 много внимания уделяется тонким деталям решения вблизи внешней границы плазменного факела. При этом нужно было упомянуть, что в этой области гидродинамическое приближение находится особенно далеко за границами физически обоснованного применения. Тонкие детали решения – лишь любопытное свойство данной математической модели. Похожее замечание относится и к расчету второго этапа развития неустойчивости (п. 7.3.7). В рамках гидродинамической модели с приемлемой достоверностью можно определить место возникновения неустойчивости в начальный момент ее развития. Это то, что в диссертации называется первым этапом развития неустойчивости, дальнейшие расчеты в рамках данной модели физического смысла не имеют.

Несмотря на замечания, диссертационная работа Нефедцева Е. В. характеризуется высоким уровнем решения сложных актуальных проблем физической электроники (специальность 01.04.04) на основе комплексного научного подхода.

В автореферате достаточно ясно обозначена актуальность темы работы, четко поставлены задачи, конкретно выделены элементы научной новизны и однозначно сформулированы положения, выносимые на защиту.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Нефедцев Евгений Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Шмелев Дмитрий Леонидович

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук
Адрес: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена,
106
Сайт: ier.uran.ru
Телефон: +7 (343) 267-87-96
Электронный адрес: admin@ier.uran.ru

Подпись Шмелева Д.Л. удостоверяю:
ученый секретарь,

Кокорина Елена Евгеньевна

«29» августа _____ 2022 г.

