

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Нефёдцева Е. В. «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.

Диссертационная работа Нефёдцева Е.В. посвящена исследованию физических процессов, приводящих к инициированию наносекундного пробоя вакуумных промежутков. Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы работы; сформулированы основная цель и задачи проведенных исследований, применяемые методы и защищаемые положения; обсуждается научная новизна и практическая ценность полученных результатов; показан личный вклад автора в достижение этих результатов. Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений в связи с разработкой сверхмощных ускорителей заряженных частиц, источников микроволнового и лазерного излучения и т.д. Важность исследований в данном направлении можно проиллюстрировать следующим примером. ЦЕРНом разрабатывается проект создания линейного электрон-позитронного коллайдера - Компактный Линейный Коллайдер (CLIC), в котором ускорение частиц осуществляется в поле радиочастотной электромагнитной волны. Основное ограничение на величину ускоряющего градиента электрического поля связано с вакуумным пробоем ускорительной структуры. Планируемая в настоящее время длина ускоряющих структур CLIC составляет примерно 40 км. Повышение их электрической прочности в 2 раза, и соответствующее увеличение ускоряющего поля, привело бы к двукратному уменьшению длины структур.

В литературном обзоре (**глава 1**) проанализированы и систематизированы результаты почти векового исследования механизмов инициирования вакуумного пробоя. Представленный в диссертации литературный обзор заслуживает самой высокой оценки, имеет самостоятельное научное значение и, на мой взгляд, может быть опубликован с учетом новых результатов, в т. ч. изложенных в диссертации, в виде обзорной статьи в авторитетном научном журнале. Основной вывод, который сделан в результате анализа современного состояния исследований механизмов вакуумного пробоя, состоит в том, что огромные финансовые затраты и усилия, направленные на повышение электрической прочности вакуумных промежутков, не привели к заметным достижениям в этой области, и величина пробивного электрического поля для плоских электродов остается в пределах 1 МВ/см. Это более чем на порядок ниже теоретического предела, соответствующего началу интенсивной автоэлектронной эмиссии. При этом в течение последних десятилетий

резко возросло количество статей по данной тематике, что лишний раз свидетельствует об актуальности диссертационной работы Нефёдцева Е.В.

Во **второй главе** диссертации приведено описание установок и экспериментальных методик, использованных при исследовании импульсного вакуумного пробоя. Значительное внимание уделено также описанию методов обработки поверхности электродов. В частности, подробно описан метод импульсного плавления поверхности низкоэнергетическим сильноточным пучком. Этот метод разработан в лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН и является, возможно, наилучшим на сегодняшний день методом очистки поверхности.

В **главах 3-5** представлены результаты экспериментальных исследований предпробойных и пробивных процессов, направленных на выявление причины появления первого пробоя вакуумного промежутка. Для исследования предпробойных процессов с максимально возможным уровнем тока разработана и применена оригинальная методика с использованием высокоомного анода. Установлено, что при характерных величинах пробивного электрического поля ~ 1 МВ/см первый пробой может развиваться даже в отсутствие ярко выраженных микронеоднородностей на поверхности катода, а предпробойный ток растет по параболическому закону. Показано, что причиной пробоя в этом случае являются дефекты кристаллического строения материала электродов и микропластические явления в поверхностных слоях под действием внешнего электрического поля. Эти изменения структуры приповерхностных слоев возможно и являются основными ограничительными факторами, препятствующим достижению предельной величины электрической прочности вакуумных промежутков с плоскими электродами. Продемонстрировано снижение электрической прочности вакуумного промежутка при наложении внешнего магнитного поля. Пробой в этом случае происходит в местах максимальной индукции магнитного поля на поверхности катода. Полученные экспериментальные результаты вносят значительный вклад в понимание физических процессов, приводящих к пробоям вакуумных промежутков.

Теоретическому исследованию динамики движения макрочастиц вблизи поверхности электрода в изменяющемся электрическом поле посвящена **6 глава** диссертационной работы. Появление макрочастиц на электродах резко снижает импульсную электрическую прочность вакуумных промежутков. В результате проведенного моделирования показана возможность многократного возвращения частицы на электрод. Установлено, что при определенных условиях, инициирование вакуумного пробоя с участием частиц возможно не только при их ударе о противоположный электрод,

но и в результате возникновения локального сверхсильного электрического поля при их отрыве от поверхности электрода.

Результаты моделирования процесса разлета взрывоэмиссионной плазмы в рамках нестационарной многожидкостной модели приведены в **главе 7**. Показано, что расширяющееся плазменное облако состоит из небольшого внутреннего слоя с падением концентрации $\sim 1/r^2$, и широкого наружного слоя с более крутым спадом концентрации. В ходе расширения плазмы возникают условия, при которых развивается плазменная неустойчивость, приводящая к росту потенциала внешних слоев плазмы, что приводит к инициированию новых взрывоэмиссионных центров. В отсутствие напряжения на промежутке скорость разлета плазмы увеличивается и появляется возможность разделения ионов в зависимости от их зарядности, что соответствует условиям разлета плазмы при лазерной абляции.

Заключительная **8 глава** диссертации посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию динамики развития импульсного пробоя катодного ионного слоя. Выявлена ключевая роль потока ионов из плазмы в развитии пробоя на проволочно-торцевом взрывоэмиссионном катоде, используемом в источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (НСЭП). Объемный заряд ионов на стадии формирования ионного слоя обеспечивает достижение величины прикатодного поля пробойной величины 1 МВ/см и, кроме этого, кратковременное повышение плотности ионного тока на катод приводит к развитию на его поверхности термомеханических напряжений. Экспериментально определены пороговые для стабильной работы источников НСЭП значения электрического поля на катоде и плотности тока ионов. Установлено, что эти пороговые значения достигаются при диаметре проволочного катода не более 0.2 мм.

Несмотря на высокий уровень проведенных экспериментальных и теоретических исследований необходимо отметить и некоторые недостатки диссертационной работы Нефёдцева Е.В.

1) Как отмечалось выше, автором диссертационной работы была разработана оригинальная методика использования высокоомного анода для исследования предпробойных процессов (**глава 3**). Результаты этих экспериментов (вольтамперные характеристики) с катодом из титана при токах на уровне десятков мкА приведены на рис. 3.10. На мой взгляд, следовало бы также привести микрофотографии сформировавшегося после токовой тренировки рельефа поверхности.

2) В **главе 5** представлены очень интересные результаты исследования возникновения взрывоэмиссионных центров и вызываемых ими изменениями структуры поверхности

кремниевых катодов. Однако обобщение полученных результатов на случай металлических катодов, на мой взгляд, требует более строгого обоснования, с учетом существенных различий в их свойствах: слоистая структура кремния, его высокое электросопротивление, проникновение внешнего электрического поля в катод.

3) Проблема любой гидродинамической модели (**глава 7**) состоит в ее ограниченной применимости при резком изменении параметров, в данном случае речь идет о границе разлетающейся плазмы. Поэтому результаты моделирования на границе плазмы следует интерпретировать как «полученные в рамках данной модели».

Указанные недостатки, впрочем, не затрагивают существо защищаемых положений и не влияют на общую высокую оценку проделанной соискателем работы. Не вызывает также сомнений научная новизна и практическая ценность полученных результатов. В целом диссертация Нефёдцева Е.В. может быть квалифицирована как завершенная научная работа, которая вносит значительный вклад в изучение физических процессов, приводящих к инициированию вакуумного пробоя. Автор продемонстрировал высокую научную квалификацию и безусловно заслуживает присвоения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Баренгольц Сергей Александрович, д.ф.-м.н, и.о. вед. науч. сотр.
ФГБУН ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, sabarengolts@mail.ru

Подпись заверяю
зам. директора ИОФ РАН



Кучков Д.П.