

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу *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

Одна из наиболее загадочных проблем в сильноточной электронике связана с явлением электрического пробоя. Несмотря на обилие исследований в этой области, проблема до настоящего времени в полной мере не решена. Это, очевидно, задано сложностью задачи, при решении которой необходим учет взаимосвязи физических явлений, развивающихся как в металлах электродов, так и в пробиваемом диэлектрике (вакууме). Если последняя сторона вопроса изучается вполне успешно, то природа физических эффектов в собственно металле электродов исследована гораздо хуже.

Именно комплексному аспекту проблемы пробоя посвящена диссертационная работа Нефедцева Е.В., в которой автор ставит целью связать явления, определяющие собственно электрический пробой вакуумного промежутка, с явлениями, протекающими при этом в материале металлического катода. Такой подход к феномену пробоя оригинален и физически обоснован, что следует поставить в заслугу автору диссертационного исследования.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертация Нефедцева Е.В. состоит из **Введения**, восьми **Гла**в, **Заключения** и **Списка литературы**. Кроме того, в нее включены также три **Приложения**. Общий объем диссертации составляет 287 страниц; список цитированной литературы насчитывает 392 наименования.

Во **Введении** сформулирована цель диссертационного исследования, которая, по утверждению автора, состоит в «*достижении нового уровня понимания физики иницирования и развития импульсного электрического пробоя в вакуумных промежутках, образованных электродными системами металл-металл и металл-плазма, а также формировании новых научно-*

технических подходов к дальнейшему повышению электрической прочности вакуумной изоляции и повышению стабильности генерации и однородности электронных пучков, формируемых в плазмонаполненных диодах». Подобное представление цели явно страдает неопределенностью и многословностью, но этот недостаток компенсируется конкретными и ясными формулировками задачи, решение которых необходимо для достижения цели.

Здесь же изложены сведения о научной новизне проведенных исследований, теоретической и прикладной значимости диссертационной работы, а также представлены **Положения, вынесенные на защиту**. Характеризуя последние, можно сказать, что их формулировки конкретны, ясны и допускают проверку, основанную на представленных материалах диссертационного исследования и в опубликованных статьях.

Глава 1 *«Механизмы инициирования вакуумного пробоя»* является обзорной. В ней автор диссертации критически проанализировал данные многочисленных исследований природы электрического пробоя и ряде сопровождающих его явлений. Обзор невелик (около 40 стр.), но вполне достаточен для строгого выбора и обоснования общего направления и деталей запланированных в диссертации научных исследований. Он определяет их актуальность и важность для понимания физики электрического пробоя.

В **Главе 2** *«Базовое экспериментальное оборудование для исследования импульсного вакуумного пробоя»* автор изложил основную информацию о принципах работы и характеристиках примененных при выполнении исследований экспериментальных методик. Оценивая форму подачи этих сведений, отмечу внимание автора к точности проводимых исследований и его стремление максимально исключить возможное влияние побочных факторов на экспериментальные результаты. Именно такое внимание позволило диссертанту получить в работе данные высокой степени надежности.

Глава 3. *«Исследование импульсной электрической прочности вакуумных промежутков»* посвящена изучению влияния материала электродов и его предварительной обработки на характеристики электрического

пробоя вакуумных промежутков. Материалы этой части исследования явились базой для формирования основных научных выводов по диссертационной работе.

В Главе 4. *«Электронно-эмиссионные центры при воздействии коротких импульсов напряжения»* описаны экспериментальные исследования предпробойной электронной эмиссии катодов вакуумных промежутков в условиях импульсного перенапряжения на основе оригинальной методики.

Глава 5. *«Морфологические и скрытые изменения на катоде при воздействии импульсов напряжения»* посвящена изучению физических явлений, происходящих в материале катода при воздействии коротких импульсов напряжения. Именно в этой главе получены и описаны основные данные о материаловедческой части исследования проблемы электрического пробоя.

Глава 6. *«Роль незакрепленных частиц в инициировании импульсного вакуумного пробоя»* является теоретической. В ней изучена динамика проводящей частицы сферической формы в меняющемся электрическом поле при электрическом пробое вакуумного промежутка.

Глава 7. *«Расширение взрывоэмиссионной плазмы в миллиметровый вакуумный промежуток»* содержит результаты теоретического анализа поведения плазмы взрывоэмиссионного центра в искровой стадии пробоя.

Глава 8. *«Инициирование импульсного пробоя между катодом и внешней плазмой»* завершает изложение оригинальных результатов, полученных автором в диссертационном исследовании. В ней представлены результаты анализа поведения катодного ионного слоя при короткоимпульсном смещении и критических условий на катоде, приводящих к пробоею слоя. Описаны возможности управления динамикой пробоя катодного ионного слоя и распределением вероятности пробоя по поверхности катода за счет внедрения в катод намагниченных тел.

В Заключение аргументировано и строго изложены важнейшие результаты диссертационной работы, квалифицирующие ее как современное научно обоснованное достижение в понимании физики электрического пробоя.

Актуальность проблемы, разработке которой посвящена диссертация Нефедцева Е.В., после анализа ее содержания не вызывает сомнений. Прежде всего, ее важность связана с широким применением электрических полей и электрических высоковольтных разрядов в физике плазмы, физике конденсированного состояния, физике полупроводников и ряде областей техники. Изучаемая проблема находится на стыке двух, на первый взгляд очень удаленных друг от друга физических областей: физики электрического пробоя и физики твердого тела. За многие годы исследований в каждой из этих областей сложились свои подходы к решению возникающих задач и адекватные им приемы интерпретации получаемых результатов. Тем не менее, существует тесное единство таких эффектов. Оно состоит в том, что пробой возникает в области диэлектрика, заключенной между двумя металлическими электродами, а состояние металла, как известно, чувствительно к электромагнитным полям высокой напряженности. Этот тезис стал отправной точкой к изучению пробоя в диссертации Нефедцева Е.В. В ее названии слова *явления на катод*е следует, безусловно, отнести к физике твердого тела, а слова *в прикатодной плазме*, соответственно, к физике электрического пробоя. Можно сказать, что счастливая мысль о согласованном рассмотрении двух взаимосвязанных сторон вопроса о природе и закономерностях пробоя, которая пришла в голову диссертанту, определила актуальность диссертационной работы.

Каждый из аспектов проблемы важен как в теоретическом, так и прикладном планах и относится к давно изучаемым по отдельности физическим эффектам. Однако, если собственно пробой диэлектриков исследован достаточно хорошо, то закономерности поведения вещества в сильных электрических полях до сих пор остаются не вполне ясными. Эта сторона дела представляет собой важную научную и техническую проблему, тесно связанную с важным эффектом электропластичности, уже давно и успешно используемым в технике, например, для пластификации трудноформируемых материалов.

Совершенно ясно, что проблемы, определяющие электрическую прочность и развитие электрических разрядов, оказываются граничащими с проблемами физики конденсированного состояния, контролирующими поведение металлов в сильных импульсных электрических полях.

Научная новизна исследований, проведенных в диссертации Нефедцева Е.В., очевидна, поскольку это практически одна из первых в мировой литературе работ, где объединены подходы, свойственные физике пробоя и физике электропластического эффекта в металлах. Обычно при изучении пробоя диэлектрика или вакуумного промежутка основной интерес исследователей направляется на развитие собственно пробоя (искры). В то же время состояние металлического электрода, имеющего высокий электрический потенциал, влияет на кинетику пробоя, главным образом, через состояние поверхности металла, электронную эмиссию и изменение рельефа поверхности, которые могут существенно меняться перед пробоем и в его ходе. Очевидная взаимосвязанность названных эффектов требует создания научной базы для адекватного описания электрического пробоя вакуумного промежутка с учетом ведущей роли явлений в металле электродов. Диссертанту в своем исследовании удалось оценить вклад таких явлений, как рождение дефектов кристаллической структуры металла и формирование рельефа поверхности электрода в сильном предпробойном электромагнитном поле.

Теоретическая значимость работы определяется тем, что ее результаты формируют принципиально новый взгляд на природу электрического пробоя как комплексного явления, развивающегося при взаимном согласовании электрических эффектов в электродах и пробиваемом вакуумном промежутке. В этой связи особенно важную роль играют соображения автора диссертации о природе пластификации металла электродов и особенно изменения состояния их поверхности в сильных электрических полях. Очень важным является полученное им экспериментальное подтверждение возможности рождения дислокаций в сильных электрических полях на катоде и доказательства реальности таких процессов. Этот результат следует рассмат-

ривать как серьезный аргумент в пользу точки зрения, согласно которой электропластический эффект в проводниках определяется прямым силовым действием электрических полей и токов на подвижность элементарных носителей пластического течения – дислокаций и их ансамблей.

Практическая значимость диссертационной работы определяется содержащимися в ней оригинальными соображениями о возможности управления кинетикой электрического пробоя за счет варьирования материала катода по типу кристаллической решетки и выбора кристаллографических параметров. Самостоятельную ценность имеют выработанные в диссертационном исследовании соображения о зависимости характеристик электрической прочности вакуумных промежутков от энергетических характеристик электронной структуры металла катода.

Обоснованность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Они определяются последовательностью и логичностью заключений и выводов, представленных в диссертации. Отмечу, что это в полной мере относится как к общим выводам по диссертационной работе, так и частным выводам, сформулированным при обсуждении каждого из отдельных результатов. Автор везде обращает внимание на соответствие полученных результатов и заключений по ним имеющимся в литературе данным других исследователей. Экспериментальные результаты, полученные в работе, проверены на повторяемость значений. В необходимых случаях для оценки доверительных интервалов применены методы математической статистики.

Доказанность положений, вынесенных на защиту, и выводов по диссертации, точно также выглядит вполне убедительно. Она полностью определяется объемом и надежностью полученных результатов. Это выясняется при анализе материалов, представленных в диссертации Нефедцева Е.В. в которых отчетливо прослеживается логика рождения заключений и выводов.

Соответствие диссертационной работы специальности 01.04.04 – физическая электроника определяется понятийным и методологическим соответствием предмета исследований, содержания работы и используемых

методов пунктам 1 (Эмиссионная электроника, включая процессы на поверхности, определяющие явления эмиссии, эмиссионную спектроскопию и все виды эмиссии заряженных частиц) и 4 (Физические явления в твердотельных микро- и наноструктурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях) Паспорта заявленной специальности.

Замечания по диссертационной работе Нефедцева Е.В. сводятся к следующему.

1. Прежде всего, вынужден отметить не вполне современный анализ автора проблемы генерации и идентификации дефектов кристаллической структуры в металлах, находящихся в сильных электрических полях. Микроскопическое наблюдение рождающихся в материале катода в предпробойных электрических полях дислокаций и их ансамблей выполнено на уровне, не отвечающем современным представлениям о природе дефектов кристаллического строения и известным возможностям экспериментальной техники.

2. Сомнения вызывает упрощенная трактовка данных о связи импульсной электрической прочности с типом кристаллической решетки материала катода (Глава 3, рис. 3.4; автореферат, рис. 5). Для более уверенного заключения о том, что именно гексагональные металлы (Zr, Ti) обеспечивают большую электрическую прочность, чем кубические, явно необходимо привлечение более обширного экспериментального материала. Кроме того, на этом же рисунке график изменения микротвердости в ряду металлов построен путем соединения точек без необходимой аппроксимации уравнением.

3. Представленные в Главе 6 расчеты поведения частиц в вакуумном промежутке при действии предпробойных электрических полей, вообще говоря, имеют оценочный характер и далеки от современного уровня рассмотрения подобных задач, представленного, например, работой Макарова В.П. и Рухадзе А.А. «Сила, действующая на вещество в электромагнитном поле» (УФН. 2009. Т. 179. № 9. С. 995-1001). Автору сле-

довало бы оценить полученные им результаты с помощью этого более общего и точного подхода к проблеме.

4. Представляется, что автор диссертации при анализе поведения металла катода в сильном электрическом поле неоправданно мало внимания уделил принятым в физике конденсированного состояния характеристикам электронного газа в металлах, в частности, энергии Ферми, форме поверхности Ферми металлов и физическим свойствам этого газа. В то же время твердо установлено, что именно электроны с энергией близкой к энергии Ферми контролируют подвижность дефектов кристаллической решетки, в том числе, и при электропластическом эффекте, как это было показано в статье Каганова М.И., Кравченко В.Я., и Нацика В.Д. «*Электронное торможение дислокаций в металлах*» (УФН. 1973. Т. 111. № 4. С. 655-682) и книгах Фикса В.Б. «*Ионная проводимость в металлах и полупроводниках*» (М.: Наука, 1969) и Матаре Г. «*Электроника дефектов в полупроводниках*» (М.: Мир, 1974).

Сделанные замечания, конечно, серьезны, но, по мнению оппонента, они не снижают сколько-нибудь существенным образом высокого качества диссертационной работы Нефедцева Е.В. Очевидно, что причины их появления оправданы как сложностью решаемых задач, так и нелегкой необходимостью согласования фундаментальных понятий физической электроники и физики конденсированного состояния (физике металлов) и различной терминологии, используемой в этих науках. Тем не менее, хотелось бы, чтобы сделанные замечания инициировали новые исследования в этой области физики.

Диссертация Нефедцева Е.В. написана грамотно и ясно. В ее тексте хорошо прослеживается логика авторских рассуждений, а все вводимые понятия и термины четко определены, обоснованы и доказаны. **Автореферат** полностью отражает содержание диссертации, давая представление как о полученных результатах, так и об их физическом смысле. Приведенные в автореферате **Публикации автора** в отечественной и зарубежной печати в полной мере характеризуют качество, уровень и оригинальность диссертации.

Общая оценка диссертационной работы, основанная на анализе полученных в диссертационном исследовании результатов, их интерпретации и обсуждении, сводится к утверждению, что в целом диссертация Нефедцева Е.В. «Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная научная проблема установления природы взаимосвязи физических закономерностей электрического пробоя вакуумных промежутков и процессов структурных изменений состояния металла катода. С учетом объема полученных данных, качества их объяснения, достоверности и новизны выполненных исследований, научного и практического значения достигнутых результатов можно утверждать, что диссертационная работа Нефедцева Е.В. соответствует требованиям п. II.9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021) «О порядке присуждения ученых степеней». В ней на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. На этом основании считаю, что автор работы Нефедцев Е.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики прочности Института физики прочности и материаловедения СО РАН

Зуев
Лев Борисович

Зуев Лев Борисович, д.ф.-м.н., профессор.
Адрес: 634055, Томск, пр-т Академический, 2/4. ИФПМ СО РАН.
Тел.: 3822-491-360. Факс: 3822-492-576. E-mail: lbz@ispms.ru

Подпись профессора Зуева Л.Б. заверяю

Катюкова А.В.
Матолыгина Н.Ю.

И.О. Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
канд. физ.-мат. наук

