

## 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.

Многолетнее, начиная с 20-х годов прошлого столетия, исследование вакуумной изоляции парадоксально тем, что, несмотря на огромную массу научных работ, пока нет решения важной фундаментальной проблемы приближения к таким уровням напряженности поля в плоских вакуумных промежутках, которые определяются ограничениями, накладываемыми лишь со стороны барьера металл – вакуум, запирающего электроны в металле. В частности, к такому выводу, можно прийти и на основании изучения хорошо структурированного литературного обзора, который представил Нефедцев Е.В. в главе 1 своей диссертационной работы.

Для многих является аксиомой, что моментом начала вакуумного пробоя, является возникновение микровзрыва на катоде, особенно для специалистов, эксплуатирующих это явление в устройствах сильноточной электроники и коммутационной технике. Однако вопросы о природе процессов, предшествующих вакуумной искре, чрезвычайно сложны: до некоторого момента времени эти процессы практически никак не проявляют себя, а внезапно возникшая искра автоматически «заметает» их следы.

Как справедливо замечает автор, устойчивость вакуумного промежутка к воздействию электрических полей определяется не только локальными особенностями геометрии самой проводящей поверхности электрода, но и ее внутренним дефектным состоянием, скрытым от непосредственного визуального наблюдения. В 1960-1980 годах сотрудниками кафедры электровакуумной техники Рязанского радиотехнического института под руководством профессора П.В.Пошехонова, активно исследовавшими явления вакуумного пробоя, описаны странные явления резкого выброса «уса» из гладкой поверхности электрода, или напротив, выравнивания микроцарапины на поверхности электрода под действием электрического поля достаточно высокой напряженности, которые, не укладываются в схему классических представлений.

Исследования, изложенные в диссертации, являются весьма актуальными и интересными.

Хотел бы особо выделить результаты, которые могут иметь большое практическое значение, но которым в автореферате уделено мало внимания. Речь идет о контролируемом «извлечении» из матрицы металла поверхностных включений примесных фаз под действием электрического поля, создаваемом в вакуумном зазоре с помощью высокоомного анода (раздел 3.4), а также в катодном ионном слое между катодом и плазменным анодом в ходе ионной бомбардировки (раздел 8.4). Такого рода процедуры, сопровождающиеся импульсным переплавлением поверхности, в том числе с переформатированием кристаллической структуры электродов в мелкоструктурную и даже аморфную, могут не только поднять уровень импульсной электрической прочности, но и увеличить стабильность длительного удержания высоких напряженностей поля в условиях высоких температур, что, в частности, важно для малогабаритных рентгеновских трубок и ускорительной техники.

В главе 6 теоретическое исследование условия инициирования пробоя многоатомными частицами вылилось в решение сложной динамической задачи, которая, по-видимому, имеет самостоятельное фундаментальное и практическое значение. В высоковольтных

устройствах случайно попавшая в область сильного поля частица может сыграть роковую роль и привести к необратимому электрическому ослаблению вакуумного промежутка. Теории инициирования вакуумного пробоя частицами в основном сформулированы для постоянных напряжений, где частица является снарядом, пролетающим от одного электрода к другому и вызывающим микровзрыв. При короткоимпульсном воздействии, как показал автор, динамика частицы может оказаться весьма сложной и привести к аномально высоким электрическим полям в зазоре между отлетающей частицей и электродом.

В главе 7 даны результаты теоретического исследования структуры и свойств плазмы центров взрывной эмиссии. Расчеты показывают неэлементарный характер распределения концентрации и скорости ионов в ходе ее расширения. Электрическое поле в области редкой плазмы направлено противоположно направлению среднего поля промежутка, что отвечает общим физическим теориям катодного факела. Расчет показывает стабильность величины скорости границы плазмы на уровне  $\sim 10$  км/с по отношению к варьированию напряжения и интенсивности источника плазмы, что соответствует экспериментально установленному факту слабой зависимости скорости расширения границы плазмы (при том, того же порядка величины) от экспериментальных условий.

В главе 8 теоретически исследована динамика эрозии плазмы вблизи поверхности катода, на который резко подается отрицательное напряжение. В ходе формирования катодного ионного слоя возникают значительные переходные всплески напряженности электрического поля и плотности ионного тока на поверхности катода, которые инициируют взрывоэмиссионные центры. Расчет их амплитуд проведен для плоского катода и катода многоторцевой геометрии, широко используемой в генераторах низкоэнергетических сильноточных электронных пучков. На основе этих расчетов, а также экспериментальных данных, представленных в главах 3–5, автор отрицает возможность доминирования механизмов импульсного пробоя катодного ионного слоя, связанных с достижением чрезвычайно высоких полей  $\sim$  ГВ/м или высоких плотностей зарядов на диэлектрических фрагментах и полагает, что пробой связан с нарушением структуры поверхностного слоя катода вследствие совместного воздействия полей напряженности  $\sim 0,1$  ГВ/м и ионного тока плотностью свыше  $1\text{--}10$  А/см<sup>2</sup>.

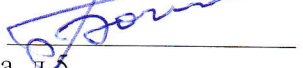
К автору имеются вопросы, перемежающиеся с замечаниями.

1. Следуя современным концепциям в вопросе об инициировании вакуумного пробоя, автор предполагает, что одной из основных причин низкого уровня электрической прочности вакуумного промежутка является возникновение локальных пластических явлений, вызванных действием электрического поля. В таком случае, очевидным шагом к достижению предельно высоких электрических полей в вакуумном промежутке является создание слоя аморфного материала на поверхности электрода, в котором отсутствует атомный порядок и, соответственно, системы скольжения дислокаций. В автореферате об экспериментах с подобными электродами не упоминается. Однако полагаю, такую работу можно запланировать при проведении дальнейших исследований с целью расширения данного направления.

2. Проведение электростатической и токовой тренировки электродов через вакуумный промежуток при использовании высокоомного катода можно считать оригинальным приемом выявления и удаления микровключений в приповерхностном слое. С другой стороны, такая тренировка – это возможность затормозить предпробойные явления в металле на различных этапах развития и исследовать их динамику «покадрово», более детально, например, с помощью электронного микроскопа. Однако в автореферате лишь констатируется малое влияние токовой тренировки уровня  $10^{-5}\text{--}10^{-4}$  А на импульсную электрическую прочность вакуумных промежутков. А что мешает усилить эффект путем повышения силы тренировочного тока до уровня  $10^{-3}$  А и выше, подобрав оптимальное его значение?

Несмотря на сделанные замечания, судя по автореферату, диссертация Нефедцева Е. В. оставляет впечатление солидного фундаментального труда, где в равной степени используются приемы экспериментального и теоретического исследований. Актуальность и значимость полученных результатов в ходе развития электрофизики и физической электроники несомненна. Публикационная активность автора находится в соответствии с нормативами ВАК. Считаю, что Нефедцев Евгений Валерьевич достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовил  
Бочков Виктор Дмитриевич,  
кандидат технических наук,

директор ООО «Импульсные технологии»  В.Д. Бочков  
Адрес: 390023, г. Рязань, проезд Яблочкова, д.5  
Тел.: +7(4912)24-05-19,  
Факс: +7(4912)24-92-17  
E-mail: pulsetech@mail.ru

Подпись директора ООО «Импульсные технологии» кандидата технических наук Бочкова Виктора Дмитриевича удостоверяю

Инспектор отдела кадров





Крутова С.П.