

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Кожевникова Василия Юрьевича** «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки

Актуальность темы. Одним из магистральных направлений развития современной физики плазмы и электрофизики является продвижение в область меньших временных масштабов исследуемых явлений, в частности процессов связанных с генерацией и движением пучков заряженных частиц в разрядах наносекундного и субнаносекундного диапазона в вакууме и газовой среде. Для электронов в последнем случае характерно наличие группы частиц, способных перейти в режим непрерывного ускорения из состояния начального столкновительного движения, так называемых «убегающих электронов». С этим явлением связан широкий спектр современных фундаментальных и прикладных проблем в различных областях физики, в частности, в области управляемого термоядерного синтеза, физики атмосферных газоразрядных явлений, разработки мощных импульсных лазеров с накачкой активной среды электронными пучками и др.

Несмотря на тот факт, что основные физические механизмы генерации пучков убегающих электронов в плотной газовой среде были разработаны в классических работах А.В. Гуревича, детальная картина этих процессов, а главное, количественные заключения о зависимости параметров пучков от конкретных экспериментальных условий, еще далеки от завершения. В связи с указанными причинами, круг задач, решаемых в данной работе, посвященной теоретическому исследованию процессов формирования и распространения в вакууме и газовых средах атмосферного давления потоков убегающих электронов с помощью нестационарных методов неравновесной физической кинетики, представляется весьма актуальным.

Представленная диссертационная работа включает Введение, пять Глав, Заключение и Список литературы, включающий 32S наименований, полный объём диссертации составляет 235 страниц, включая 56 рисунков.

Во **Введении** дано обоснование актуальности темы исследования, формулируются основные цели и задачи работы, определена научная новизна полученных в работе результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена аннотация диссертационной работы.

Глава 1 диссертации посвящена краткому литературному обзору теоретических и экспериментальных методов изучения физической природы быстропротекающих процессов в плазменных разрядах. На основании проведенного анализа процесса взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов. Основное внимание уделяется рассмотрению вопросов динамики наносекундных и субнаносекундных газовых разрядов высокого давления, а также генерации интенсивных потоков убегающих электронов в таких разрядах,

В **Главе 2** изложены теоретические методы и подходы к описанию процессов взаимодействия электрических полей с потоками заряженных частиц. Первый раздел посвящён методу восстановления энергетических спектров пучков быстрых электронов по данным кривых ослабления пучка в алюминиевых фольгах различной толщины путём регуляризации решения некорректно поставленной задачи математической физики. Приводятся примеры восстановления спектров электронов, прошедших анодную фольгу в вакуумных и газовых диодах, Второй раздел главы представляет собой описание методов численного решения уравнений переноса, для апробации которых приводится пример решения макроскопических уравнений, описывающих формирование доменов сильного поля в СВЧ-диодах Ганна. В третьем разделе описаны численные методы решения кинетических уравнений Больцмана и Власова, В качестве примера применения предложенных методов приведены решения задачи о генерации релаксационных колебаний объёмного заряда в диоде Чайлда-Ленгмюра, а также при инжекции электронного пучка в эквипотенциальный плоский зазор.

Макроскопическое моделирование разрядов в плотных газах изложено в **Главе 3**. Рассматриваются одномерные задачи о развитии квазистационарного и быстрого (субнаносекундного) газового разряда в среде азота и элегаза, как в плоском диоде, так и в диоде коаксиальной конструкции.

Глава 4 посвящена описанию методов гибридного моделирования газовых разрядов, генерирующих потоки убегающих электронов. Подобных модели основаны на согласованном сочетании принципов макроскопического и кинетического моделирования процессов. Благодаря данному подходу, в главе полностью решены задачи генерации убегающих электронов в планарном и коаксиальном газовых диодах в рамках одномерной геометрии задачи. Здесь же вычисляются нестационарные спектральные энергетические характеристики и ток пучка убегающих электронов с учётом поглощения в анодных фольгах.

Модель быстрого разряда с полным кинетическим описанием всего ансамбля электронов построена в **Главе 5**. Основные результаты расчётов в рамках этой модели сравниваются с результатами, полученными в рамках гибридной модели описанной в главе 4. На примере разряда в азоте атмосферного давления, проведено сравнение характеристик убегающих электронов с результатами, полученными в рамках гибридной модели, что позволило очертить рамки применимости метода гибридного моделирования. Приведена элементарная теория появления в разряде «аномально» ускоренных электронов с энергиями, превосходящими максимальное напряжение на разрядном промежутке.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием автором современных методов теоретического исследования, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов, которые хорошо согласуются с выводами работ других исследователей, полученных в рамках иных теоретических методов и подходов. Существенным обстоятельством также является удовлетворительное количественное согласие результатов расчетов с известными экспериментальными данными.

Отметим **научную новизну и ценность наиболее существенных результатов**, полученных автором диссертации, **их фундаментальное и прикладное значение**.

Прежде всего, отметим реализованный автором метод восстановления сложной многокомпонентной энергетической структуры пучка электронов, ускоренных в газовом или вакуумном разряде по набору сигналов с датчиков с различными поглотителями путем решения т.н. некорректно поставленной обратной задачи. Благодаря этому, удалось получить ряд интересных, порой неожиданных, физических результатов, в частности, появление в пучке при определенных условиях заметной доли «аномально» ускоренных электронов.

Разработана методика гибридного описания быстрых газовых разрядов высокого давления на основании принципов физической кинетики для потока убегающих электронов и гидродинамического описания плазмы. В рамках данной методики рассчитаны основные физические характеристики разряда высокого давления в одномерно-осесимметричной конфигурации разрядного промежутка. Кроме того, рассчитана нестационарная функция распределения быстрых электронов в плазме разряда и за анодом из фольги заданной толщины.

Построена полностью кинетическая модель газового разряда высокого давления, которая даёт исчерпывающее описание процессов формирования и динамики убегающих электронов. В рамках модели получены основные физические характеристики разряда высокого давления в одномерной осесимметричной конфигурации диода, в том числе полный энергетический спектр.

Результаты диссертационной работы являются серьезным продвижением в построении полной картины физических процессов, протекающих в быстрых высоковольтных разрядах в вакууме и газовой среде. Наряду с фундаментальным характером результатов, они имеют также важное прикладное значение, далеко выходящее за рамки данной задачи. В частности, разработанная методика восстановления энергетических спектров ускоренных пучков электронов по набору сигналов датчиков с различными поглотителями, найдет применение в широком круге экспериментальных исследований, связанных с генерацией и применением высокоэнергичных электронных пучков. Кроме того, на основе найденных зависимостей характеристик пучков убегающих электронов в разрядах высокого давления от скорости нарастания фронта напряжения на промежутке могут быть разработаны новые плазменные технологии.

Данные положения изложены в опубликованных автором работах и докладах на научных конференциях, симпозиумах и конгрессах. В.Ю. Кожевников является признанным специалистом в области исследования быстрых высоковольтных разрядов в газовых и вакуумных диодах, его работы широко известны в научном сообществе, занимающемся теоретическими и экспериментальными исследованиями явления убегания электронов в плотных газах. По теме диссертации, опубликованы 23 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также представлен 31 доклад на международных конференциях.

Как всякое серьезное научное исследование, диссертационная работа не свободна от **недостатков**.

1. В качестве одного из основных результатов работы автор указывает разработанную методику восстановления спектра ускоренных электронов по набору экспериментальных данных об ослаблении их потока в металлических фольгах различной толщины. Это - хорошо известная обратная задача, принадлежащая к так называемому классу некорректных задач математической физики. На с. 57 автор пишет, что для регуляризации процедуры восстановления спектра им используется известный метод Тихонова-Арсенина. Из дальнейшего текста остается неясным, в чем заключается новизна предложенного подхода, кроме очевидных априорных

требований о непрерывности, гладкости и неотрицательности полученного решения. Необходимы пояснения автора.

2. Вызывает вопросы также процедура верификации полученной методики, предложенная автором в п.2.1.4, т.е. проверки устойчивости полученного решения относительно возмущения исходных данных, что является основной проблемой некорректных обратных задач. Вместо стандартной в таких случаях процедуры задания коридора ошибок данных, определяемого условиями эксперимента, и оценки разумности восстановленных по этим данным спектров, автор использует ту же процедуру восстановления спектра по сигналам с фольгами большей толщины. При этом он сам же отмечает, что «полученные спектры не могут считаться достоверными». В таком случае остается непонятным смысл предложенной верификации.

3. В силу исключительной важности полученного результата, т.е. восстановления спектра наносекундного пучка ускоренных электронов в вакуумном диоде, следовало провести анализ этого результата, в частности, привести физические соображения о его разумности, например, обсудить наличие основной низкоэнергетичной части спектра и наличие электронов с энергиями, превышающими приложенное напряжение, а также сравнить спектр с данными других научных групп (если такие имеются) и т.д.

4. На с. 66 приведены результаты восстановления спектров ускоренных электронов в газонаполненном диоде, которые также вызывают вопросы. В частности, автор пишет, что «количество ускоренных электронов растет с увеличением фактора неоднородности катода». Однако, вопреки этому утверждению, из рис. 2.8. следует, что в восстановленном спектре для сферического катода энергия основной части электронов существенно (почти в два раза) превосходит энергию в случае трубчатого, тонкостенного, катода. Кроме того следовало пояснить возможные физические причины появления в первом случае «аномально ускоренных» электронов с энергией, превышающей напряжение разряда, и их отсутствие - во втором случае.

5. Многокомпонентная структура восстановленного спектра в газонаполненном диоде требует серьезного физического обоснования, поскольку предложенная автором верификация результата по сигналам времяпролетного анализатора выглядит весьма неубедительно. Так, на рис. 2.9 сложно выделить 2 группы электронов с разными энергиями, а в тексте отсутствует сравнение восстановленного спектра с экспериментальным, и кроме того, как справедливо замечает автор, времяпролетная спектрометрия является «ненадежной...вследствие низкой достоверности осциллографирования сигналов коллектора».

6. На рис. 5.10 представлены энергетические спектры электронов, ускоренных в газонаполненном диоде и регистрируемых за анодной фольгой, полученные в различных моделях разряда. Из рисунка видно, что в рамках кинетической модели все электроны являются аномально ускоренными, т.е. имеют энергию, превышающую напряжение разряда. Этот результат существенно отличается от полученного в Главе 2 и требует пояснений. Отмеченные замечания носят, в основном, характер рекомендаций и не снижают, в целом, высокой оценки диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

В диссертационной работе представлены результаты теоретических исследований быстрых высоковольтных разрядов в вакуумных и газонаполненных диодах, и проведено сравнение полученных результатов с данными эксперимента. Большое внимание уделяется методическому обоснованию предложенных подходов.

В соответствии с паспортом специальности такие работы относятся к специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

Заключение

Диссертационная работа В.Ю. Кожевникова выполнена на высоком научном уровне, является завершенным исследованием, результаты работы представляют существенный вклад в развитие фундаментальных представлений и прикладных аспектов физики быстрых разрядов. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных в диссертации результатов несомненны. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором диссертации, является вполне обоснованной.

Таким образом, диссертационная работа «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ, а ее автор Кожевников В.Ю. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

Заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович.

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

Телефон: 8- (3952)-521-254; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

07.10.2019 года, г. Иркутск

 Паперный В.Л.

Отзыв заверяю, ученый секретарь совета  Кузьмина Н.Г.