

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Кожевникова Василия Юрьевича** на тему «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы исследования.

В настоящее время тематика исследований быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей и неравновесных потоков заряженных частиц в различных средах представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес. Отдельное место здесь отводится исследованию «убегания» электронов, т.е. переходу электронов из режима столкновительного движения к непрерывному ускорению. Следует отметить, что генерация убегающих электронов представляет большой интерес при изучении управляемого термоядерного синтеза, широкомасштабных высотных газоразрядных явлений, вопросов генерации вспышек рентгеновского и гамма излучений, а также проблем возникновения катодolumинесценции в кристаллах. Диссертационная работа Кожевникова В.Ю. посвящена исследованию теоретических основ влияния потоков убегающих электронов на условия протекания быстрых (субнаносекундных) газовых разрядов. Основной упор делается на использование фундаментальных принципов физической кинетики и на разработку теоретических моделей, которые сочетают более простую теоретическую базу макроскопического описания плотной плазмы с моделированием методами уравнения Больцмана.

Выше обозначенное позволяет заключить, что диссертация Кожевникова В.Ю. соответствует паспорту специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа Кожевникова В.Ю. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературных источников, включающего 328 наименований. Суммарный объем диссертации составляет 235 страниц и включает 56 рисунков.

Во **Введении** показана актуальность исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведен список положений, выносимых на защиту. Во введение также содержатся сведения об апробации работы и личном вкладе соискателя.

Первая глава работы представляет собой актуальный литературный обзор теоретических и экспериментальных методов, предназначенных для изучения физики наносекундных и субнаносекундных взаимодействий электрических полей с потоками свободных электронов.

Во второй главе систематизируется описание теоретических методов и подходов рассмотрения процессов электродинамического взаимодействия электрических полей с группами заряженных частиц. Материал данной главы можно условно разделить на три раздела. В первом разделе излагаются основы получения энергетических спектров убегающих электронов на основании данных кривых ослабления пучков электронов металлических фольгах различной толщины. Такая задача представляет собой обратную задачу рассеяния, корректное решение которой возможно осуществить только при использовании специальных алгоритмов «регуляризации решения». Впервые данная методика решения обратной задачи применяется для восстановления энергетических спектров электронов, прошедших анодную фольгу в вакуумных и газовых диодах. Во второй

части главы автор подробно останавливается на описании методах численного решения уравнений переноса. В качестве апробации приводится решение макроскопических уравнений, описывающих работу СВЧ-диода Ганна в т.н. пролётном режиме. Последний раздел главы содержит систематизированное последовательное описание численных методов решения уравнения Больцмана. Комплекс численных методов апробируется на решении задачи о возникновении релаксационных колебаний объёмного заряда в вакуумном диоде и задачи об инжекции электронного пучка в эквипотенциальный зазор «эмиттер-коллектор».

Третья глава посвящена построению макроскопических моделей газовых разрядов в плотных газах. Рассмотрение ограничивается одномерными задачами о разрядных явлениях, протекающих в плоских и осесимметричных газовых диодах. Моделируются случаи, в которых плазма разряда электроположительная и электроотрицательная.

Четвёртая глава диссертации содержит описание гибридной методики построения моделей газовых разрядов высокого давления, в которых необходимо учитывать малочисленные группы электронов, составляющие «хвост» функции распределения. Такие частицы представлены в реальных разрядах убегающими электронами. Гибридное моделирование базируется на согласованном сочетании принципов макроскопического и кинетического моделирования процессов. Благодаря данному подходу, в главе полностью решены задачи о генерации убегающих электронов в планарном и коаксиальном газовых диодах одномерной пространственной конфигурации. Здесь же вычисляются нестационарные спектральные энергетические характеристики и ток пучка убегающих электронов с учётом поглощения в алюминиевых анодных фольгах. Автором достоверно показано, что именно гибридные модели впервые позволили рассчитать, как ток пучка убегающих электронов, так и мгновенный энергетический состав пучка. Показано, что в осесимметричном газовом диоде пучок убегающих электронов зарождается на фронте волны ионизации, который распространяется от катода с малым радиусом кривизны к аноду. В плоском диоде доля убегающих электронов исчезающе мала по сравнению с коаксиальным диодом. Также для плоского диода характерна генерация убегающих электронов в различных частях газоразрядного промежутка. Для разряда в среде элегаза приводятся некоторые сопоставления характеристик пучка убегающих электронов с экспериментальными данными. Далее в главе проводится сравнение воспроизводимости известных экспериментальных тенденций влияния параметров разрядного промежутка на характеристики пучка убегающих электронов с теоретическими выводами, сделанными в рамках модели.

Пятая глава описывает построение теоретических моделей быстрых разрядов с полным кинетическим описанием всего ансамбля электронов. Достаточно подробно обсуждаются формы представления интегралов столкновений, которые в данной трактовке модели представлены более сложными выражениями, чем при гибридном моделировании. Исходя из предложенной методологии полностью кинетического подхода на примере разряда в коаксиальном диоде, заполненном азотом атмосферного давления, показано сравнение характеристик убегающих электронов с результатами моделирования в рамках гибридной модели. Показано, что метод гибридного и полностью кинетического моделирования дают сходные характеристики разряда и пучка убегающих электронов для случаев квазиоднородно предыонизованных промежутков. Также в главе даётся элементарная теория, объясняющая возникновение убегающих электронов с «аномально» высокими энергиями, превосходящими максимальное падение напряжение на промежутке.

В Заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

Можно заключить, что работа хорошо выстроена логически, материал изложен последовательно, а работа в целом соответствует специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки. Научные выводы и защищаемые положения хорошо

согласованы с результатами работ, полученных в рамках использования иных теоретических подходов, а также с основными тенденциями физического эксперимента. Все полученные автором диссертации научные результаты обладают несомненной практической ценностью и научной новизной. Без сомнения данные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения взаимодействия потоков заряженных частиц с веществом, которое проводится в таких научных центрах как Институт электрофизики УРО РАН, Институт прикладной физики РАН (г.Нижний Новгород), НИ ТПУ (г.Томск).

По диссертационной работе можно сделать ряд **замечаний**:

1. На стр.66 утверждается, что максимальная точность восстановления спектра определяется выбором параметра оригинальные α при отсутствии отрицательных значений функции плотности. При этом остается неясным влияние экспериментальных ошибок измерений на результаты восстановления.
2. На рис. 2.8 а), б) приведены реконструированные спектры быстрых электронов для шарового и трубчатого катодов, которые отличаются на 2 порядка по величине, хотя исходные кривые ослабления (рис.2.7 а),б)) нормированы на единицу.
3. В параграфе 2.3.4 получен временной профиль плотности тока, найденный из решения системы уравнений Власова – Пуассона с граничным условием, совпадающим с Максвелловским распределением с параметром $kT_0 = 10$ эВ. Однако в диссертации не приведено обоснование такого выбора.
4. На рис. 3.1 г) приведено полученное распределение ионов в момент времени $t = 0.5$ мкс с «провалом» вблизи максимума при $x = 0.05$ см. Считаю, что вывод автора «...распределение концентраций ионов в некоторый момент времени имеет два максимума...» выглядит слабо обоснованным и нуждается в дополнительных исследованиях.
5. На стр. 134 приводится значение абсолютной точности вычислений 10^{-6} без указания размерности.
6. В формуле (4.10) используются два обозначения энергии W и W_0 без пояснений в чем различие между ними.

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности работы, не затрагивают положений выносимых на защиту и носят сугубо рекомендательный характер.

Заключение

Диссертационная работа Кожевникова В.Ю. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком научном уровне. В работе получены научные результаты, развивающие оригинальные численные методы расчета характеристик газового разряда. Полученные автором работы результаты достоверны, цели и выводы обоснованы. Работа написана понятно и профессионально грамотно, подходящим образом оформлена. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Опубликованные статьи отражают результаты на должном уровне.

Таким образом, представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Кожевников Василий Юрьевич, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв составлен официальным оппонентом, ведущим научным сотрудником исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), доктором физико-математических наук, профессором Потылицыным Александром Петровичем.

Официальный оппонент

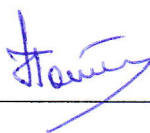
Профессор, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»,

ведущий научный сотрудник
Исследовательской школы физики
высокоэнергетических процессов
Томского политехнического
университета.

Адрес: Россия, 634050, г. Томск, пр.
Ленина, 30

Телефон: +8 913 800 5225

E-mail: potylitsyn@tpu.ru



Потылицын Александр Петрович

Подпись доктора физ.-мат. наук,

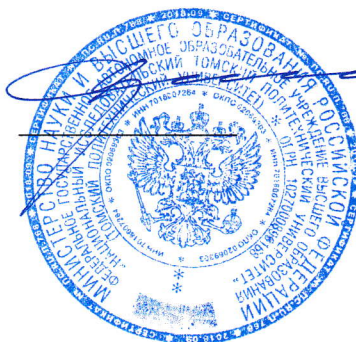
в.н.с. ИШФВП ТПУ

Потылицына А.П.

заверяю

Учёный секретарь

Учёного Совета ТПУ



Ананьева Ольга Афанасьевна