

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича», член-корреспондент РАН


« 23 » 09 2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук о диссертации Кожевникова Василия Юрьевича «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Актуальность темы исследования

Теоретические исследования быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме представляют собой значительный фундаментальный интерес и имеют обширные практические приложения. Особое значение имеет изучение процессов перехода электронов из режима первоначального столкновительного движения в режим непрерывного ускорения. Данное явление принято называть «убеганием» электронов. Широкий спектр современных научных и прикладных проблем тесно связан с этим явлением. Среди них можно отметить проблемы управляемого термоядерного синтеза, физики высотных газоразрядных явлений в земной атмосфере, сопряжённых с генерацией потоков рентгеновского и гамма излучений, вопросы генерации мощного лазерного излучения с накачкой активной среды пучками убегающих электронов, возбуждение импульсной катодолюминесценции в природных и синтетических кристаллах полупроводниковой и диэлектрической природы и другие. Особое место занимает теоретическое изучение генерации убегающих электронов в разрядах повышенного давления и их влияние на протекание разрядных явлений, чему посвящена диссертационная работа В.Ю. Кожевникова. Она направлена на построение теоретических моделей разрядов данного вида на основании фундаментальных принципов физической кинетики и их согласованному сочетанию с применением более простой теоретической базы, основанной на макроскопическом описании плотной плазмы. С одной стороны, используемый подход позволяет получать численные решения задач, чья физическая постановка представляет собой существенно нестационарную проблему взаимодействия основного объёма плазмы газового разряда с генерируемой малой фракцией электронов, переходящих в режим убегания. С другой стороны, в диссертационной

работе рассматриваются сравнительно простые одномерные теоретические модели, в которых влиянием избыточных геометрических особенностей можно пренебречь, делая акцент только на роль основных параметров.

Оценка содержания работы и её завершенности

Представленная диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературных источников, включающего 328 наименований. Суммарный объём диссертации составляет 235 страниц, включая 56 рисунков.

Во введении показана актуальность исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведён список защищаемых положений. Также введение содержит сведения о достоверности результатов, об апробации работы, и общую информацию о структуре работы.

Глава 1 диссертации посвящена краткому литературному обзору теоретических и экспериментальных методов изучения физической природы быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов. Основной акцент делается на рассмотрение вопросов динамики наносекундных и субнаносекундных газовых разрядов высокого давления, а также на генерации интенсивных потоков убегающих электронов в таких разрядах.

Глава 2 представляет собой описание теоретических методов и подходов к описанию электродинамических процессов взаимодействия электрических полей с потоками заряженных частиц. Глава разделена на три большие части, посвящённые методу восстановления энергетических спектров пучков убегающих электронов по данным кривых ослабления, методам численного решения уравнений макроскопических моделей разряда и методам численного решения системы уравнений Максвелла-Больцмана. В первой части излагаются основы методики восстановления спектров быстрых электронов на основании данных кривых поглощения пучка быстрых частиц в алюминиевых фольгах различной толщины путём регуляризации решения некорректно поставленной задачи математической физики. Приводятся примеры восстановления энергетических спектров электронов, прошедших анодную фольгу в вакуумных и газовых диодах. Вторая часть 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. Последняя часть главы посвящена численным методам решения кинетических уравнений Больцмана и Власова. В качестве примера применения отработанных методов демонстрируются решения задачи о генерации релаксационных колебаний объёмного заряда в диоде Чайлда-Ленгмюра и при инжекции электронного пучка в эквипотенциальный плоский зазор.

Глава 3 посвящена макроскопическому моделированию газовых разрядов в плотных газах. Последовательно рассматриваются одномерные пространственные постановки одномерных задач о развитии квазистационарного и быстрого (субнаносекундного) газовых разрядов в среде азота и элегаза как в плоском диоде, так и в диоде коаксиальной конструкции.

Глава 4 занимает центральное место диссертационной работы. В ней излагается методология гибридного моделирования газовых разрядов, генерирующих потоки убегающих электронов. В подобных моделях описание 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.

Глава 5 посвящена построению теоретических моделей быстрых разрядов с полным кинетическим описанием всего ансамбля электронов. В рамках предложенной полностью кинетической модели на примере разряда в коаксиальном диоде, заполненном азотом атмосферного давления, показано сравнение характеристик убегающих электронов с результатами моделирования в рамках гибридной модели. Сравнение позволяет очертить границы применимости метода гибридного моделирования. 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.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Развиваемый автором теоретический подход представляет собой последовательное, чётко сформулированное и обоснованное изложение основных идей и вытекающих из них выводов. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием и тщательной апробацией современных методов теоретического исследования, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов. Сформулированные научные положения хорошо согласуются с выводами работ других исследователей, полученных в рамках иных теоретических методов и подходов, а также подтверждаются количественным согласием с результатами известных экспериментов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

Реализован метод решения т.н. некорректно поставленной обратной задачи восстановления спектров некогерентных пучков электронов на основании конечного множества экспериментальных данных об их ослаблении в металлических фольгах различной толщины. Благодаря использованию данной методики, были рассчитаны энергетические спектры потоков быстрых электронов в наносекундном газовом разряде высокого давления.

Построена теоретическая методология гибридного описания быстрых газовых разрядов высокого давления на основании принципов физической кинетики для потока убегающих электронов и гидродинамического описания для плазмы.

В рамках гибридной модели рассчитаны все основные физические характеристики разряда высокого давления в одномерно-осесимметричной конфигурации разрядного промежутка. Также вычислена нестационарная функция распределения быстрых электронов в плазме разряда и за анодом из металлической фольги заданной толщины.

Построена теоретическая модель газового разряда высокого давления, полностью основанная на кинетическом описании всех электронов. Она даёт исчерпывающее объяснение процессов формирования и динамики убегающих электронов. В рамках данной модели получены физические характеристики разряда высокого давления в одномерной осесимметричной конфигурации газового диода, в том числе полный энергетический спектр электронов.

Дано детальное объяснение механизма появления групп убегающих электронов с энергиями, превышающими мгновенное значение приложенного к промежутку напряжения, умноженное на значение элементарного заряда (электроны с т.н. «аномальными» энергиями).

Данные положения изложены в опубликованных автором работах и докладах на научных конференциях, симпозиумах и конгрессах. Работы В.Ю. Кожевникова известны в научном сообществе, занимающемся теоретическими и экспериментальными исследованиями явления убегания электронов в плотных газах. По теме диссертации, начиная с 2006 г. по настоящее время было опубликовано 23 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а также представлен 31 доклад на международных конференциях.

Практическая ценность полученных результатов:

При выполнении работы разработан и реализован метод восстановления исходных спектров быстрых электронов по дискретным экспериментальным данным об ослаблении их потока в металлических фольгах различной толщины. Программная реализация метода позволила рассчитать спектры пучков убегающих электронов, которые генерируются разрядах высокого давления. Метод не требует каких-либо априорных предположений о форме и ширине восстанавливаемого энергетического спектра. Оригинальная методика позволяет выявлять грубые ошибки в получаемых исходных массивах экспериментальных данных ослабления пучков электронов в фольгах. Разработанная методика была успешно применена в работах других авторов для исследования пучков убегающих электронов, генерируемых в разрядах различных давлений и пространственных конфигураций.

Благодаря разработанным нестационарным гибридным и полностью кинетическим моделям наносекундного разряда в газах высокого давления полностью исследованы основные теоретические закономерности динамики потоков убегающих электронов в плотных газах. Теоретическое моделирование указывает на то, что убегающие электроны могут зарождаться на фронте бегущей волны ионизации, распространяющейся из области усиленного поля. Исследованы зависимости количества убегающих электронов и характеристик их пучков от скорости нарастания фронта напряжения на промежутке и параметров начальной ионизации промежутка, которые могут быть положены в основу разработок новых плазменных технологий на основе разряда высокого давления.

Общая методика гибридного моделирования может быть применена для решения аналогичных вычислительных задач вакуумной электроники, физики плазмы и физики полупроводников, теоретические модели которых содержат уравнение Больцмана, уравнения непрерывности потоков частиц и уравнения Максвелла или Пуассона. Такое описание, по сравнению с трёхмерным кинетическим моделированием, значительно экономит вычислительные ресурсы.

Рекомендации по использованию результатов работы:

Результаты, полученные в диссертационной работе В.Ю. Кожевникова можно рекомендовать к использованию в организациях, занимающихся моделированием быстропотекающих физических процессов взаимодействия электрических полей с заряженными частицами в газах, полупроводниках и вакууме. Этими организациями являются Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, *Институт лазерной физики* СО АН, *Институт теоретической и прикладной механики* им. С.А. Христиановича СО РАН.

Критические замечания:

- 1) В диссертационной работе рассматриваются исключительно одномерные модели газовых разрядов. На основании предложенных моделей делаются выводы о локализации области зарождения убегающих электронов разряда, тенденциях трансформации энергетического спектра и тока пучка убегающих электронов в зависимости от геометрических параметров диода и пр. Однако данные эксперимента, приводимые на стр. 162 приводятся для газового диода двумерно-осесимметричной конструкции. Желательно было бы получить пояснения, насколько обоснованы сравнения результатов одномерных расчетов с экспериментами?
- 2) Большинство расчетов проведено при задании объемной предварительной ионизации промежутка. Как изменятся прогнозы параметров УЭ если промежуток не будет иметь объемной ионизации? Как скажутся на расчетах эмиссионные процессы на катоде?
- 3) Благодаря использованию граничных условий типа Неймана в одномерно-осесимметричных моделях не учитывается прикатодное падение потенциала, где есть условия для ускорения электронов. Насколько обосновано пренебрежение этим фактом?

Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей научной и практической ценности работы.

В использовании полученных считаем целесообразным:

продолжить работу по разработке 2D и 3D моделей и проведению расчетов формирования электронных пучков в реальных плазменных устройствах со сложной геометрией.

Заключение

Исследования, изложенные в диссертации, проведены на высоком научном уровне и свидетельствуют о высокой квалификации автора. Главным результатом работы явилось создание и развитие нового научного направления – гибридного кинетического моделирования быстропротекающих неравновесных процессов в физике электрического пробоя газов.

На основании изложенного можно констатировать, что диссертация В.Ю. Кожевникова отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв о диссертации В.Ю. Кожевникова рассмотрен и одобрен на совместном семинаре «Математическое моделирование в механике» в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 4 от 19.09.2019).

Отзыв подготовила ведущий научный сотрудник

Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН

д.ф.-м.н.

Ирина Вячеславовна Швейгерт, доктор физико-математических наук

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Телефон: (383) 330-42-68

Наименование организации: ИТПМ СО РАН

Должность: ведущий научный сотрудник Лаборатории вычислительной аэродинамики.

Адрес электронной почты: ischweig@itam.nsc.ru

И.В. Швейгерт

