

На правах рукописи



**Кожевников Василий Юрьевич**

**ТЕОРИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ С НЕРАВНОВЕСНЫМИ ПОТОКАМИ  
ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ,  
ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ВАКУУМЕ**

01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Томск — 2019



## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Фундаментальный интерес к теоретическому и экспериментальному исследованию взаимодействия сильных электрических полей с потоками электронов в газах, полупроводниках и вакууме зародился в начале XX века. Этот интерес был обусловлен повышенным вниманием к физике плазмы, классической и квантовой электродинамике, теории конденсированного состояния и электрофизике. Для исследуемых взаимодействий частиц и полей характерны процессы быстрой трансформации энергии и существенно неравновесные нестационарные состояния ансамблей взаимодействующих частиц (электронов, позитронов, ионов). Рассматриваемые процессы имеют разнообразные проявления, различные по своим масштабам и особенностям протекания, но всем им свойственны общие физические механизмы. Этот факт позволяет исследовать их, пользуясь единым фундаментальным подходом, который применяется в качестве универсального инструмента.

Одной из обширных областей электрофизики является исследование быстропротекающих процессов в газовых разрядах. Для электронов в таких разрядах характерно наличие группы частиц, способных перейти в режим непрерывного ускорения из состояния начального столкновительного движения. Такие электроны принято называть “убегаящими” электронами (УЭ). Интерес к теоретическому и экспериментальному исследованию потоков УЭ зародился ещё в 1925 году, когда Уилсон<sup>1</sup> высказал предположение о существовании возможности генерации электронов высоких энергий в атмосфере Земли. В качестве одного из выводов работы утверждалось, что многие бета-лучи, возникающие в электрических полях над грозowymi облаками, могут иметь очень протяжённые треки. Лишь спустя 41 год с момента публикации Уилсона при лабораторном исследовании искрового разряда<sup>2</sup> были получены первые экспериментальные подтверждения высказанного ранее предположения. В работе было впервые зарегистрировано рентгеновское излучение при пробое газового промежутка в среде гелия. Данный факт оказался неожиданным из-за того, что электрические поля в газовом разряде были достаточно слабыми для генерации тормозного излучения.

Сегодня широкий спектр современных научных и прикладных проблем, тесно связанных с явлением перехода электронов в режим убегания, охватывает фундаментальные области управляемого термоядерного синтеза<sup>3</sup>, физики атмосферных газоразрядных явлений, сопряжённых с генерацией мощных потоков

<sup>1</sup>Wilson, C.T.R. The Acceleration of beta-particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. / C.T.R. Wilson // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. — 1925. — Vol. 22. — Pp. 534–538.

<sup>2</sup>Observation of X-rays from spark discharges in a spark chamber / S. Frankel, V. Highland, T. Sloan et al. // Nuclear Instruments and Methods. — 1966. — Vol. 44, no. 2. — Pp. 345–348

<sup>3</sup>Runaway electron generation during disruptions in the J-TEXT tokamak / L. Zeng, Z.Y. Chen, Y.B. Dong et al. // Nuclear Fusion. — 2017. — Vol. 57, no. 4. — P. 046001

рентгеновского и гамма излучения<sup>4</sup>, разработки мощных импульсных лазеров с накачкой активной среды пучками УЭ<sup>5</sup>, применения пучков УЭ для возбуждения импульсной катодолюминесценции в природных и синтетических кристаллах полупроводниковой и диэлектрической природы<sup>6</sup>. Развитие данных областей требует более глубокого теоретического понимания процессов, приводящих к генерации и дальнейшей эволюции пучков УЭ.

Среди существующих в настоящий момент теоретических подходов к решению проблемы УЭ, наиболее фундаментальным подходом стоит признать т.н. микроскопический метод описания. Однако на практике для низкотемпературной плазмы газового разряда он оказывается неприменимым из-за необходимости описывать движение и столкновения очень большого числа заряженных частиц. Применение же упрощённых теоретических подходов, которыми являются методы “крупных” частиц и макроскопические многогрупповые методы оказывается недостаточным, т.к. у данных подходов существуют теоретические ограничения для описания ансамблей частиц с немаксвелловским распределением по энергиям. Разработанность кинетического подхода к описанию проблемы УЭ<sup>7</sup> не выходит за рамки рассмотрения динамики электронов в стационарных полях без учёта пространственной структуры задачи. Асимптотические и стационарные решения кинетического уравнения дают ряд общих критериев, соответствие которым, в частности, обеспечивает переход электронов плазмы от столкновительного движения в режим непрерывного ускорения (убегания). Однако имеющиеся приближённо-аналитические решения не располагают информацией о динамике и эволюции быстропротекающего разряда с УЭ, а также не несут конкретной информации о геометрической конфигурации разрядного промежутка, что особенно актуально для исследования наносекундных и субнаносекундных электрических разрядов в газонаполненных диодах.

В связи с вышесказанным тематика диссертационной работы, направленной на теоретическое изучение явлений формирования потоков УЭ в пространственно неоднородных газовых разрядах атмосферного давления с помощью нестационарных методов неравновесной физической кинетики, представляется актуальной.

---

<sup>4</sup>Chilingarian, A. Comments on the models based on the concept of runaway electrons for explaining high-energy phenomena in the terrestrial atmosphere / A. Chilingarian // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, no. 2. — Pp. 234–237.

<sup>5</sup>Pumping of lasers and lamps by discharges based on the background-electron multiplication waves / V.F. Tarasenko, S.I. Yakovlenko, A.M. Boichenko et al. // Physics of Wave Phenomena. — 2008. — Vol. 16, no. 3. — Pp. 180–198.

<sup>6</sup>Бакшт, Е.Х. Импульсная катодолюминесценция алмаза, кальцита, сподумена и флюорита под воздействием электронного пучка субнаносекундной длительности / Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.Ф. Тарасенко // Письма в Журнал технической физики. — 2010. — Т. 36, № 21. — С. 102–110.

<sup>7</sup>Gurevich, A.V. Amplification and nonlinear modification of runaway breakdown / A.V. Gurevich, K.P. Zybin, Yu.V. Medvedev // Physics Letters A. — 2006. — Vol. 349, no. 5. — Pp. 331–339.

**Цель** данной диссертации - разработка и вычислительная реализация современных теоретических моделей формирования субнаносекундных электрических разрядов в газах высокого давления и детальное пространственно-временное описание процессов взаимодействия электрических полей с электронами в таких разрядах. Для достижения поставленной цели предполагалось решение следующих основных **задач**:

1. Разработка достоверных и универсальных методов математического описания нестационарных и пространственно-неоднородных процессов взаимодействия электрических полей с электронами в различных средах (плотный газ, полупроводник, вакуум);
2. Построение новых теоретических моделей субнаносекундного электрического разряда в газе высокого давления на базе фундаментальных принципов физической кинетики, позволяющих рассчитать пространственно-временную эволюцию функции распределения электронов по энергиям в газоразрядной плазме;
3. Проведение детальных численных расчётов всех этапов пробоя газонаполненного промежутка в условиях сильно неоднородного распределения электростатического поля и объяснение на этой основе основных физических параметров таких кинетических эффектов, например, как формирование потока УЭ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. На базе теоретического математически устойчивого метода обработки экспериментальных зависимостей ослабления электронных пучков в тонких фольгах математически корректно доказано наличие многомодовой структуры спектров УЭ в субнаносекундном газовом разряде высокого давления, а в ряде случаев – присутствие небольшой группы (до 10 % всего ансамбля быстрых электронов) с так называемыми “аномально высокими энергиями”;
2. Сформулирована и реализована на численно-аналитическом уровне математического описания гидродинамическая модель переноса тока в пространственно-одномерной неоднородной ионизационно-активной низкотемпературной плазме. На этой основе в рамках единого подхода впервые смоделирована на микроструктурном уровне работа полупроводникового диода Ганна в цепи наносекундного генератора СВЧ-колебаний и рассчитана детальная пространственно-временная картина развития электрического пробоя плоского газонаполненного диода. Модификация этой модели применительно к субнаносекундному пробую газонаполненного коаксиального промежутка позволила исключить из нее описание деталей формирования и функционирования слоя прикатодного падения потенциала, в том числе и эмиссионные

процессы на катоде, что резко упростило вычислительную реализацию модели быстрого разряда в плотном газе с УЭ;

3. В рамках гибридной модели описания разрядов с УЭ доказано, что кинетический расчёт зарождения и формирования потока УЭ с учётом только двух элементарных процессов даёт физически обоснованный теоретический прогноз количества быстрых электронов. Исходя только из известных параметров сечений ионизационных и упругих столкновений электронов, впервые удалось правильно оценить как количество, так и характерную энергию быстрых электронов, наблюдаемых в экспериментах по пробою азота, воздуха и гексафторида серы (давления от десятка до нескольких сотен кПа, длины зазоров от 0.5 до 10 см, степени начальной неоднородности поля от 5 до 50 раз);
4. В рамках гибридной модели показано, что поток УЭ в газовом разряде высокого давления естественным образом формируется за счёт экстракции (по импульсам) в сильном электрическом поле и последующего непрерывного ускорения электронов из хвоста энергетического спектра плотной плазмы на фронте волны ионизации газа. Электронная эмиссия с катода при таком механизме взаимодействия поля и плазмы в разрядах высокого давления не является главным фактором образования пучка УЭ;
5. Анализ электродинамического механизма ускорения единичного электрона бегущим доменом продольного электрического поля выявил необходимые и достаточные условия его реализации применительно к электронам в газовом разряде с неоднородной геометрией диода. Расчёты кинетики движения электронов и динамики электрического поля в газовом разряде в деталях демонстрируют то, как в неравновесной плазме естественным путем могут появляться электроны с “аномально высокими энергиями”. В расчётах наносекундного разряда “степень аномальности” (отношение максимальной энергии электронов в пучке к величине  $qU_{max}$ ), как правило, не превышает 150 %;
6. На базе последовательного кинетического подхода применительно к электронной компоненте плазмы впервые самосогласованным количественным расчётом продемонстрирована определяющая роль УЭ в инициировании процесса наработки объёмной плазмы в разрядах с прикатодной предыонизацией промежутка. Так, в коаксиальном промежутке немногочисленные вторичные электроны каскада, генерируемые даже небольшим потоком УЭ перед фронтом волны ионизации, обеспечивают быстрое заполнение плазмой межэлектродного пространства (скорости движения фронта плотной плазмы до  $5 \cdot 10^9$  см/с) и формирование группы электронов с “аномально высокими энергиями”. Применительно к экспериментальным условиям трёхмерной геометрии доля “аномально ускоренных электронов” должна кратно снижаться по сравнению с одномерными модельными расчётами.

### **Научная новизна работы:**

1. На численно-аналитическом уровне реализован метод решения некорректно поставленной (по Адамару) обратной задачи для восстановления спектров некогерентных пучков электронов на основании конечного множества экспериментальных данных об их ослаблении в металлических фольгах различной толщины. С использованием этой методики решения обратной задачи были рассчитаны непрерывные спектры потоков быстрых электронов в наносекундном газовом разряде высокого давления;
2. Сформулирована эффективная теоретическая модель, реализующая гибридное описание быстрого газового разряда высокого давления исходя из принципов физической кинетики для неравновесного потока УЭ и упрощённого “гидродинамического” описания для плазмы;
3. В рамках гибридной модели получены физические характеристики разряда высокого давления в одномерной осесимметричной конфигурации разрядного промежутка, а также впервые вычислена функция распределения быстрых электронов как в плазме разряда, так и за анодом из металлической фольги заданной толщины;
4. Построена теоретическая модель разряда высокого давления, полностью основанная на кинетическом описании плазмы разряда и УЭ. Она даёт исчерпывающее объяснение процессов, происходящих при формировании пучка УЭ, в частности, объясняет возможность появления электронов с энергиями, превосходящими максимальное падение напряжения на разрядном промежутке (электроны с “аномальными” энергиями);
5. В рамках полностью кинетической модели получены физические характеристики разряда высокого давления в одномерной осесимметричной конфигурации разрядного промежутка, включая полный энергетический спектр электронов в разряде и за анодом из алюминиевой фольги заданной толщины.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы определяется следующими факторами:

1. Разработан и реализован в виде прикладной программы метод восстановления исходных спектров быстрых электронов по дискретным экспериментальным данным об ослаблении их потока в металлических фольгах различной толщины. С его помощью были рассчитаны спектры пучков УЭ, формируемых в газовых разрядах высокого давления, без предварительных предположений о форме и ширине восстанавливаемого энергетического спектра. Практическое и теоретическое преимущество оригинальной методики состоит в том, что она позволяет выявлять неприемлемые ошибки в исходных массивах экспериментальных данных об ослаблении пучков в фольгах. Полученные данные

имеют большое прикладное значение с позиций применения газонаполненных диодов, работающих в наносекундном и субнаносекундном режимах для генерации сверхкоротких импульсов рентгеновского излучения и/или накачки активной среды газовых лазеров;

2. В рамках нестационарного гибридного и полного кинетического моделирования наносекундного разряда в газах высокого давления выяснены основные теоретические закономерности зарождения и дальнейшей эволюции потока УЭ в разрядах. В частности, теоретические выводы указывают на то, что пучок УЭ зарождается на фронте волны ионизации, распространяющейся из области усиленного поля. Также исследованы зависимости количества УЭ и характеристик пучка от скорости нарастания фронта напряжения на промежутке;
3. Разработана методика численного решения кинетического уравнения, которая 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 полевые уравнения (Максвелла или Пуассона). Предложенный подход подразумевает гибридное применение кинетического и гидродинамического описания аналогичных задач в различных пространственных размерностях. Например, решение трёхмерной гидродинамической (макроскопической) задачи о развитии разряда можно совместить с одномерным расчётом характеристик пучка УЭ, генерируемых данным разрядом. По сравнению с полностью трёхмерным моделированием такое описание значительно сокращает время вычислений и экономит вычислительные ресурсы;
4. Предложен оригинальный теоретический расчёт механизма появления группы УЭ, которые имеют средние энергии, превышающие мгновенное значение приложенного к промежутку напряжения (электроны с т.н. “аномальными” энергиями).

#### **Методология и методы исследования.**

Методология исследований, проведённых в диссертационной работе, основывается на сочетании общих и специальных научных методов, доминирующую роль среди которых занимают теоретические методы моделирования и обработки получаемых наборов данных. При построении теоретических моделей использовались как традиционные, так и новые методы макроскопического и детерминистического описания плазменных и газоразрядных явлений. Традиционные методы успешно адаптировались и усовершенствовались с учётом поставленных задач и имеющихся в распоряжении автора технических возможностей.



## **Степень достоверности и апробация результатов.**

Высокая степень достоверности результатов изложенных в диссертации определяется использованием наиболее современных методов теоретического исследования и внутренней непротиворечивостью полученных результатов. Они согласуются с выводами работ других исследователей, сделанными на основании иных теоретических методов. Также высокую степень достоверности представленных результатов подтверждает их хорошее согласие с результатами экспериментальных работ.

Основные результаты работы докладывались на: XI Международной конференции “Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул” (AMPL) (г. Томск, Россия, 2013 г.), Международной конференции “26th Symposium on Plasma Physics and Technology” (г. Прага, Чешская республика, 2014 г.), Международной конференции “International Congress Energy Fluxes and Radiation Effects” (EFRE) (г. Томск, Россия, 2014-2018 г.), Международной конференции по физике плазмы (ICOPS) (г. Белек, Турция, 2015 г.), 66-ом Ежегодном Форуме Австрийского Физического сообщества (г. Вена, Австрия, 2016 г.), Международной конференции “International Congress Energy Fluxes and Radiation Effects” (EFRE) (г. Томск, Россия, 2016 г.), Телекоммуникационном форуме (TELFOR) (г. Белград, Сербия, 2013-2017 гг.), Международной конференции “19th Conference on Plasma and its Applications” (г. Иерусалим, Израиль, 2017 г.), Международной конференции “42nd Conference of the Middle-European Cooperation in Statistical Physics” (MECO 42) (г. Лион, Франция, 2017 г.), Международной конференции “21st IEEE Pulsed Power Conference” (г. Брайтон, Великобритания, 2017 г.), Международной конференции “8th Plasma Physics by Laser and Applications Conference” (г. Мессина, Италия, 2017 г.), Международной конференции “International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications” (ICEAA) (г. Верона, Италия, 2017 г.), Международной конференции по проблеме космических лучей “COSMIC RAYS: the salt of the star formation recipe” (г. Флоренция, Италия, 2018 г.), 11-й Международной конференции по вычислительным проблемам тепло- и массопереноса “XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT)” (г. Краков, Польша), на Международной конференции “2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive” (Automotive 2018, г. Милан, Италия), на Международной конференции “28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)” (г. Грайфсвальд, Германия), на Международном симпозиуме по сильноточной электронике (г. Томск, Россия), а также на научных семинарах и отчётных сессиях Института сильноточной электроники СО РАН.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 12-08-31171, 15-08-03983, 15-

58-53031, 17-08-00932, 18-52-53003, а также программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

### **Публикации.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 64 источниках, в числе которых 2 коллективные монографии, 31 публикация и 31 тезис докладов на Международных и Российских симпозиумах, конгрессах и конференциях. При этом 23 статьи опубликованы в изданиях, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук. В опубликованных работах материалы диссертации изложены в достаточной полноте.

### **Личный вклад.**

Автор внёс определяющий вклад в создание теоретической базы диссертационной работы, в написании статей и монографий по тематике диссертации, в проведении расчётов и обработке экспериментальных результатов. Текст диссертации написан автором лично. Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором лично как в индивидуальных, так и в коллективных исследованиях. При выполнении всех работ автору полностью принадлежат постановка задач и анализ полученных результатов. Используемые в работе программные коды для численного решения систем интегро-дифференциальных уравнений всех теоретических моделей написаны автором лично.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет **235** страниц текста с **56** рисунками. Список литературы содержит **328** наименований.

### **Содержание работы**

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель и задачи работы, приводятся её научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту. В краткой форме излагается общая структура диссертации.

Первая глава представляет собой обзор физики быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей и заряженных частиц, происходящих в газовых разрядах высокого давления. Показано, что основной особенностью данного вида разрядов является генерация УЭ. В на-

чале главы приводится элементарная теория, объясняющая эффект убегания электронов. Она основывается на представлении о “критическом” значении электрического поля, при котором единичный электрон, взаимодействующий с веществом, преодолевает тормозящую силу, ассоциированную с неупругими электрон-атомными столкновениями. Данная элементарная теория предсказывает заниженное значение “критического” электрического поля. Подобные значения полей легко реализуются в современных импульсных разрядах, однако большая часть электронов разряда при этом не является УЭ. Далее показывается, что более достоверную оценку “критического” значения поля даёт элементарная модель, основанная на представлении о решающем вкладе упругих рассеяний на уход электрона из режима непрерывного ускорения. Такая оценка значения “критического” поля составляет 210 – 1400 В/(см·Тор) в зависимости от сорта газа.

В следующей части обсуждаются современные возможности исследования наносекундных и субнаносекундных газовых разрядов, в том числе возможности изучения явлений генерации УЭ. Подробно показано, что изучение характеристик быстрых разрядов и генерируемых ими пучков УЭ сопряжено со значительными экспериментальными и теоретическими трудностями. В области экспериментального исследования быстропротекающих газоразрядных процессов измерение детальных распределений электромагнитного поля и концентраций плазмы в фиксированные моменты времени оказывается достаточно проблематичным. Основные измеряемые параметры таких процессов представляют собой интегральные характеристики: например, осциллограммы тока и напряжения разряда, картина интегрального свечения плазмы разряда и пр. Измерение интегральных характеристик потоков УЭ сопряжено с ещё большими трудностями. Поскольку в быстрых разрядах характерные длительности импульсов тока УЭ, пришедших на анод, зачастую не превышают 10 – 15 пс, то необходимо, чтобы измерительный тракт токового коллектора обеспечивал бы пикосекундное разрешение, что на сегодняшний день недостижимо. Другой ключевой характеристикой пучка УЭ за анодной фольгой является его энергетический состав (спектр). На основании сравнения результатов измерения спектров УЭ полученных различными методами показано, что существующие подходы также имеют ряд недостатков.

В продолжении главы приводится обзор методов теоретического моделирования быстропротекающих газовых разрядов. Показано, что для построения адекватных физических моделей необходимо учитывать резко-нестационарный характер изменения электромагнитного поля системы заряженных частиц. Ещё одним важным свойством модели является потенциальная возможность описания сравнительно малых групп электронов, представленных “хвостом” функции

распределения. В электрических разрядах высокого давления такими электронами являются УЭ. Далее показано, что наилучшей способностью учитывать специфические требования, предъявляемые к моделям быстрых разрядов с УЭ, обладают методы физической кинетики плазмы, многогрупповые методы и методы “макрочастиц”. Приводятся основные особенности и недостатки указанных подходов.

В завершении главы подчёркивается актуальность и формулируется основная цель исследования теоретических проблем динамики быстропротекающих процессов взаимодействия (наносекундных и субнаносекундных временных масштабов) сильно неоднородных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных средах газовых разрядов.

**Вторая глава** посвящена теоретическим методам и подходам, используемым для исследования быстрых разрядов и их реализации на примерах модельных задач. Первая часть главы описывает методику восстановления спектральных энергетических распределений пучков УЭ по данным кривых ослабления интенсивности пучка в фольгах различной толщины. Показано, что основная проблема, связанная с “восстановлением” спектра УЭ заключается в необходимости решения обратной задачи рассеяния, которая является некорректно поставленной задачей математической физики (согласно критерию Адамара). Из-за того, что данные кривой ослабления всегда содержат значительные погрешности измерения, “восстановление” спектра УЭ без предъявления различных априорных предположений о его структуре становится невозможным.

Для решения данной проблемы в диссертации предлагается использовать метод регуляризации некорректно поставленной задачи, выполняемой согласно алгоритму Арсенина-Тихонова: из всего многообразия решений с неточной правой частью выбирается функция, минимизирующая т.н. “стабилизирующий” функционал. При этом к решению предъявляется только два требования - непрерывность и гладкость всюду в рассматриваемом интервале энергий. В итоге задача восстановления спектра УЭ сводится к решению интегро-дифференциального уравнения с заданными граничными условиями.

Для апробации методика восстановления спектров электронных пучков по данным кривых ослабления была применена для изучения пучков электронов, генерируемых в импульсных вакуумных и газонаполненных диодах. При восстановлении энергетического спектра электронного пучка в вакуумном диоде в качестве исходных данных используются результаты измерения кривых ослабления в серии экспериментов, где к малогабаритному генератору импульсных напряжений наносекундной длительности подсоединялась отпаянная электронная трубка (вакуумный диод). Для восстановления спектра электронного пучка была использована кривая ослабления заряда пучка (рисунок 1 (а)), значе-

ния которой регистрировались в зависимости от толщины алюминиевой фольги. Спектр электронного пучка в диапазоне энергий от 50 до 500 кэВ представлен на рисунке 1 (б)).

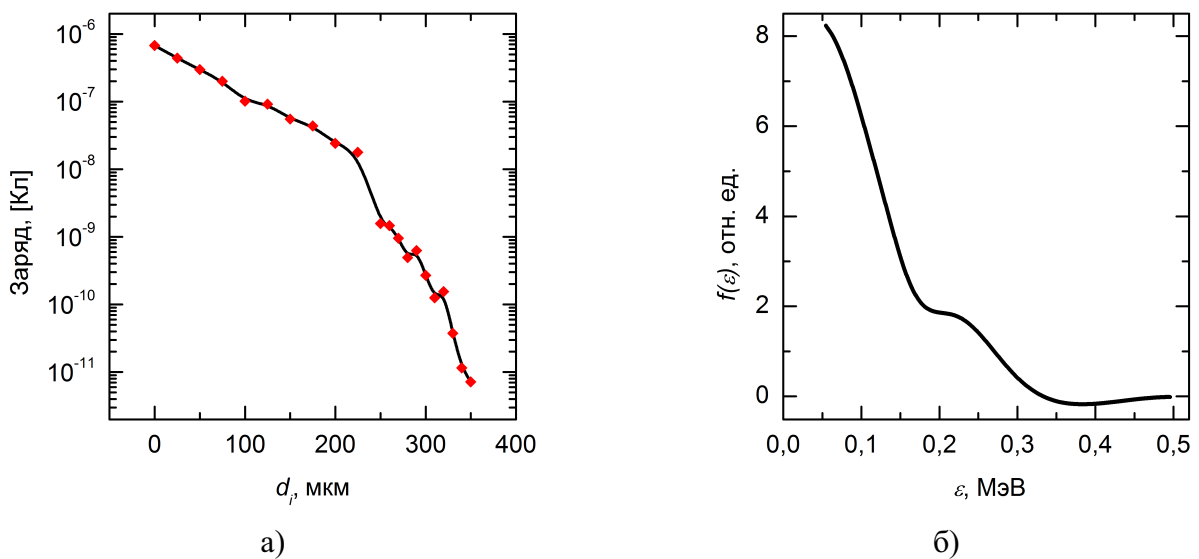


Рис. 1 — Экспериментальная кривая ослабления заряда пучка электронов от толщины алюминиевого фильтра (а) и восстановленный спектр пучка (б).

Анализ полученного спектра показывает, что в падающем на фильтр пучке можно условно выделить две группы электронов: основную низкоэнергетичную, характеризующуюся монотонным спадом энергий до 200 кэВ, и высокоэнергетичную, максимум распределения которой соответствует энергии 220 кэВ, а “хвост” простирается вплоть до значения 320 кэВ.

В продолжении приводятся результаты восстановления спектров пучков УЭ по данным кривых ослабления в экспериментах с газонаполненными диодами. Подключаемые к наносекундному генератору газовые диоды представляли собой двухэлектродную систему, состоящую из плоского анода, выполненного из алюминиевой фольги для регистрации пучка УЭ коллектором тока, и катода в виде острия, благодаря которому в прикатодной области создаётся значительное усиление электрического поля. В качестве катода выступали трубка из нержавеющей стали и стальной шарик, закреплённые на металлическом стержне центрального проводника передающей линии высоковольтного генератора.

В результате измерений для шарового и трубчатого катодов были получены кривые ослабления тока УЭ (рисунок 2 (а)), приходящего на коллектор для анода, изготовленного из алюминиевых фольг, толщины которых изменялись в диапазоне 10 – 400 мкм.

На рисунке 2 (б) показаны восстановленные интегральные спектры пучков УЭ по измеренным кривым ослабления. В обоих случаях спектр представлен несколькими энергетическими группами. Как и для вакуумного диода, при таком подходе критерием выбора максимальной точности восстановления спектра яв-

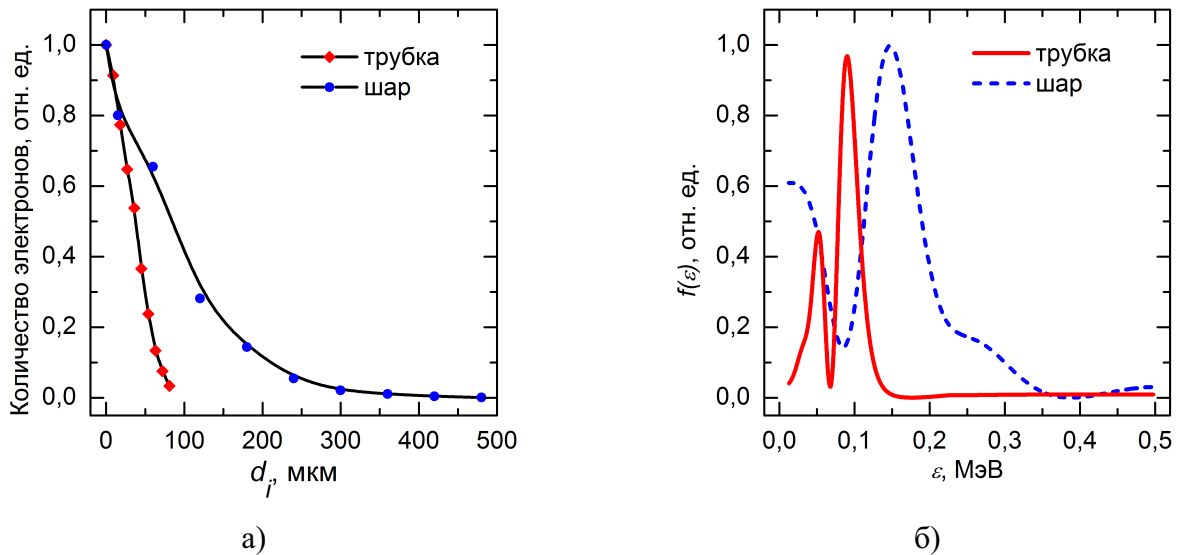


Рис. 2 — Экспериментальные кривые ослабления для шарового и трубчатого катодов газового диода (а) и реконструированные спектры быстрых электронов для них (б).

ляется неотрицательность получаемой функции плотности. В качестве проверки полученных спектров приводятся результаты непосредственных измерений спектрального состава пучка УЭ методом времяпролётной спектрометрии.

Второй раздел второй главы систематизирует возможности детерминистического макроскопического моделирования многокомпонентных неравновесных систем заряженных частиц, которые преимущественно находятся в сильных электромагнитных полях. Последовательно излагаются базовые формулировки макроскопического (или “жидкостного”) описания газовых разрядов высокого давления. В краткой форме описываются актуальные проблемы применения данного подхода. В частности то, что дифференциальные уравнения модели представляют собой обобщённые уравнения переноса, относящиеся к уравнениям в частных производных гиперболического типа. Особенностью решений подобных уравнений является тот факт, что одновременно решение может быть гладким в одной области определения и разрывным в другой. Весь спектр современных численных методов для решения систем уравнений гиперболического типа направлен именно на корректное описание данной особенности решения.

Следующая часть раздела содержит последовательное описание численных схем решения уравнений переноса макроскопической модели газоразрядной плазмы. Автор подробно останавливается на описании численного алгоритма дискретизации данных уравнений т.н. “методом линий”, основная идея которого заключается в замене в уравнениях пространственных производных их алгебраическими аппроксимациями. В диссертации для этого используются методы конечных разностей и конечных объёмов. В результате рассматриваемое уравнение в частных производных преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, определяемыми задачей

Коши для первоначального уравнения. Окончательная система уравнений, полученная в результате применения метода линий, может быть решена с использованием современных библиотек функций, реализующих высокопроизводительные явные или неявные методы численного решения. Здесь же определяются понятия равномерного и квазиравномерного сеточных разбиений одномерного счётного пространства задачи. Показывается, что квазиравномерное разбиение позволяет формировать удобные представления одномерных интервалов с выборочным сгущением сетки в регионах, где требуется достигнуть более высокого разрешения используемого численного метода.

Далее в разделе излагаются базовые принципы метода конечных разностей, широко применяемого для аппроксимации частных производных. Для произвольного сеточного разбиения приводятся представления первой и второй частных производных как в сжатой разностной форме, так и в матричном виде. Также даются понятия  $h$ - и  $p$ - вариантов уточнения выбранной схемы представления производных. Отдельно приводится сжатое описание группы методов WENO, которые широко применяются в современной вычислительной газо- и гидродинамике. Даются подробные выражения для аппроксимации производной конвективного потока общего вида методами WENO третьего и пятого порядков точности. Наконец, отмечается, что в данной диссертации дискретизации методом WENO подвергаются только дрейфовые (конвективные) слагаемые полного потока частиц в уравнениях переноса. Диффузионный член всегда записывается через соответствующие отношения центральных конечных разностей.

Для апробации совокупности комплекса описанных численных методов приводится решение научно-прикладной задачи моделирования процессов возникновения, движения и гашения доменов сильного поля в полупроводниковых структурах СВЧ-диодов Ганна сантиметрового диапазона. Решение задачи направлено на поиск возможности фиксации фазы полупроводникового диода Ганна путём стабилизации амплитуды импульса модулирующего напряжения. Для проведения анализа зависимости характеристик СВЧ-колебаний от вариации параметров импульса модулирующего напряжения была использована локально-полевая модель. Её система дифференциальных уравнений сводится к уравнению переноса для напряжённости электрического поля  $E(x, t)$  в активной области устройства. Для решения полученного уравнения была применена численная схема, сочетающая в себе метод линий с методом конечных разностей. На рисунке 3 представлены основные результаты расчётов: эволюция домена сильного электрического поля (а), приводящая к возникновению СВЧ-колебаний (б) тока диода.

В результате проведения цикла моделирования было показано, что фаза СВЧ-колебаний устанавливается моментом перехода полупроводниковой струк-

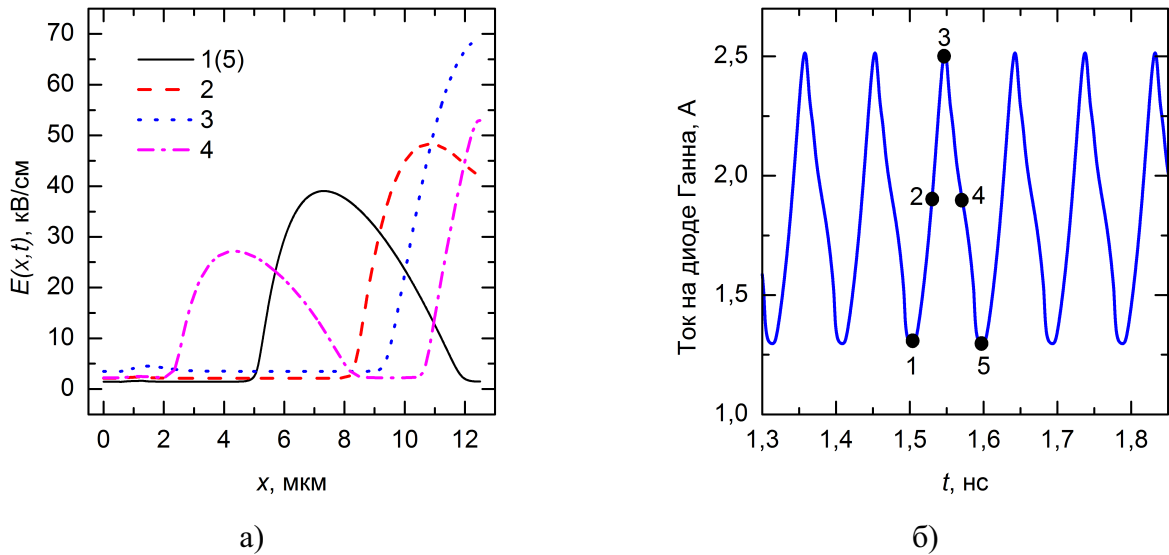


Рис. 3 — Результаты моделирования физических процессов в диоде Ганна в пролётном режиме: а) распределение электрического поля по длине активной области в различные моменты времени, указанные на осциллограмме тока диода б).

туры диода Ганна с локальной неоднородностью профиля легирования вблизи катода в режим отрицательного дифференциального сопротивления с образованием доменов сильного поля. Полупроводниковая структура обладает способностью стабилизации фазы колебаний, а начальная фаза колебаний жёстко привязана к моменту достижения порогового напряжения генерации на диоде. Амплитуда колебаний тока уже в первом периоде достигает величин, близких к типичным значениям для режима установившихся колебаний

Заключительный третий раздел второй главы посвящён подробному обсуждению методов численного решения кинетического уравнения Больцмана. В частности, указывается, чем отличается процедура его численного решения от традиционных методов решения уравнений математической физики, а также приводятся актуальные численные схемы, использованные в диссертации. Последовательно излагается общая стратегия численного счёта: расщепление уравнения Больцмана на транспортную и столкновительную части на заданном дискретном временном шаге, способы изолированного решения транспортной части уравнения (уравнения Власова) и согласованный учёт влияния столкновений.

В качестве апробации методик численного решения уравнения Больцмана приводятся решения одномерных тестовых задач вакуумной электроники о диоде Чайлда-Ленгмюра и об инжекции электронного пучка в эквипотенциальный плоский зазор. В обоих случаях решение уравнения Пуассона может быть выражено в квадратурах, а столкновениями можно пренебречь. Решение задачи о диоде Чайлда-Ленгмюра представляет собой осциллограмму тока диода в виде последовательности релаксационных колебаний. В задаче о токопротекании при инжекции электронного пучка в эквипотенциальный промежуток



рассматривались случаи, когда инжектируемый “сверхкритический” пучок был квазимоноэнергетическим и немонаэнергетическим. В первом случае возникали незатухающие колебания тока коллектора, вызванные наличием осцилляций виртуального катода. Второй случай представлял собой квазистационарный режим токопротекания без осцилляций. Величина относительного энергетического разброса энергий электронов в пучке варьировалась в диапазоне 0.1 – 30 %. Полученные результаты численного решения находятся в хорошем согласии с аналитическими оценками и некоторыми результатами моделирования методом “макрочастиц”.

В третьей главе рассматриваются теоретические детерминистические модели объёмных газовых разрядов, основанные на макроскопическом подходе к моделированию плазмы при высоких давлениях газа. Математически они представляют собой уравнения непрерывности для электронной и ионных концентраций, записанные совместно с уравнениями для электромагнитного или электростатического поля (уравнениями Максвелла или уравнением Пуассона). В работе подробно изучаются только простые одномерные модели разрядов высокого давления в диодах планарной и коаксиальной геометрии.

В качестве отправной точки рассматривается задача о зажигании тлеющего разряда в азоте при давлении газа равном 10 Тор, а затем исследуется импульсный разряд атмосферного давления, формируемый при подаче на газоразрядный промежуток длиной 0.5 см наносекундного импульса напряжения с амплитудой, значительно превосходящей статическое пробивное значение.

В результате моделирования было показано, что картина формирования тлеющего разряда в целом хорошо согласуется с известными теоретическими и экспериментальными представлениями, положенными в основу современной физики газового разряда. Наряду с этим, моделирование позволило выявить некоторые детали распределения концентраций ионов и электронов, экспериментальное определение которых представляет значительные трудности. Изучение наносекундного разряда в планарном промежутке также показало широкие возможности визуализации пространственно-временной структуры разряда. Было установлено, что в планарном разряде между двумя плоско-параллельными электродами в разные моменты времени наблюдается чередование порядка слоёв плазмы с различным уровнем ионизации.

Второй раздел главы посвящён моделированию газоразрядных явлений в одномерном газовом диоде коаксиальной геометрии. Отличие данной постановки задачи от предыдущего случая состоит в том, что осесимметричная модель позволяет варьировать в широких пределах как величину межэлектродного зазора, так и фактор неоднородности поля, определяемый тем, насколько электрическое поле у катода превосходит значение поля вблизи анода.

Рассматриваемые физические ситуации представляют собой быстро протекающие разрядные явления, которые моделируются в рамках т.н. “минимальной” модели разряда. В ней переносом ионов пренебрегают, учитывая только их рождение и гибель. Данное приближение ограничивает область применения модели на случай разрядов, имеющих длительности, не превышающие нескольких наносекунд. В наиболее общем виде система дифференциальных уравнений “минимальной” модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \vec{\Gamma}_e = \alpha |\vec{v}_e| n_e, \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} = \alpha |\vec{v}_e| n_e, \\ \nabla^2 \phi = \frac{q}{\varepsilon_0} (n_e - n_i), \end{cases} \quad (1)$$

где  $q$  - элементарный заряд,  $\vec{\Gamma}_e$  - поток электронов в дрейфово-диффузионном приближении,  $n_e$  и  $n_i$  - концентрации электронов и ионов, соответственно,  $\phi$  - электростатический потенциал,  $\vec{v}_e$  - дрейфовая скорость электронов,  $\alpha$  - ионизационный коэффициент Таунсенда,  $\varepsilon_0$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

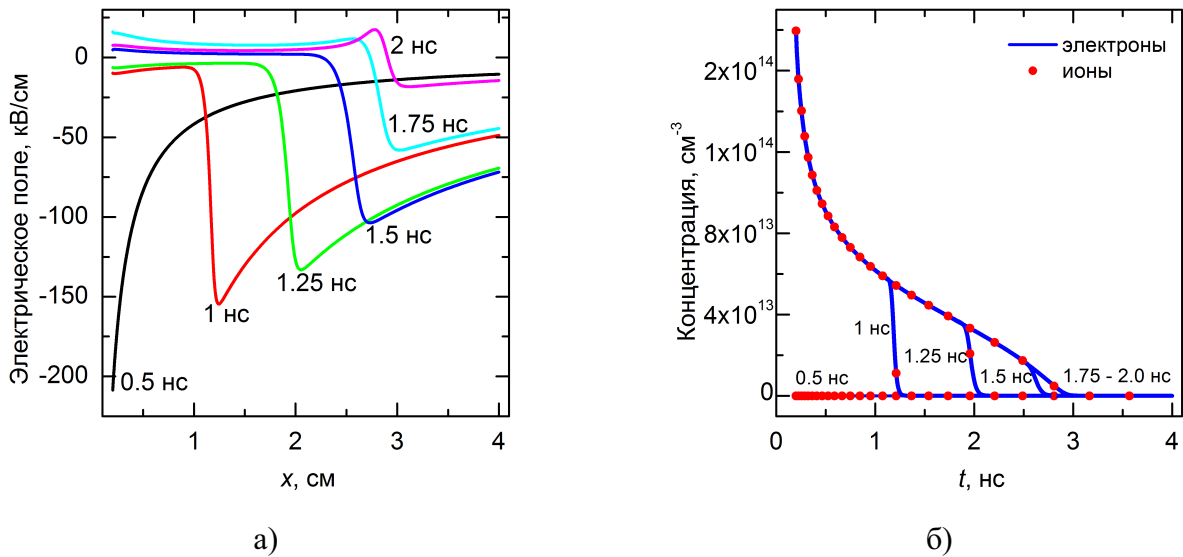


Рис. 4 — Пространственные распределения: а) напряжённости электрического поля, и б) профилей концентраций ионов и электронов в различные моменты времени для импульсного газового разряда в среде азота.

В качестве примера рассматривался разряд в азоте в коаксиальном промежутке ( $r_c = 0.2$  см,  $r_a = 4$  см), к которому приложен монополярный импульс напряжения с амплитудой 250 кВ и длительностью  $\sim 2$  нс. Моделирование показало, что за короткие времена порядка сотен пикосекунд промежуток разделяется на часть, занятую плазмой волны ионизации (область высокой концентрации

плазмы  $\sim 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) и часть, имеющую низкую концентрацию плазмы, которая соответствует начальному уровню предыонизации. Дальнейшее увеличение напряжения на промежутке способствует росту протяжённости высокоионизованного региона, сопровождающегося движением локального максимума поля в направлении от катода к аноду (на рисунке 4).

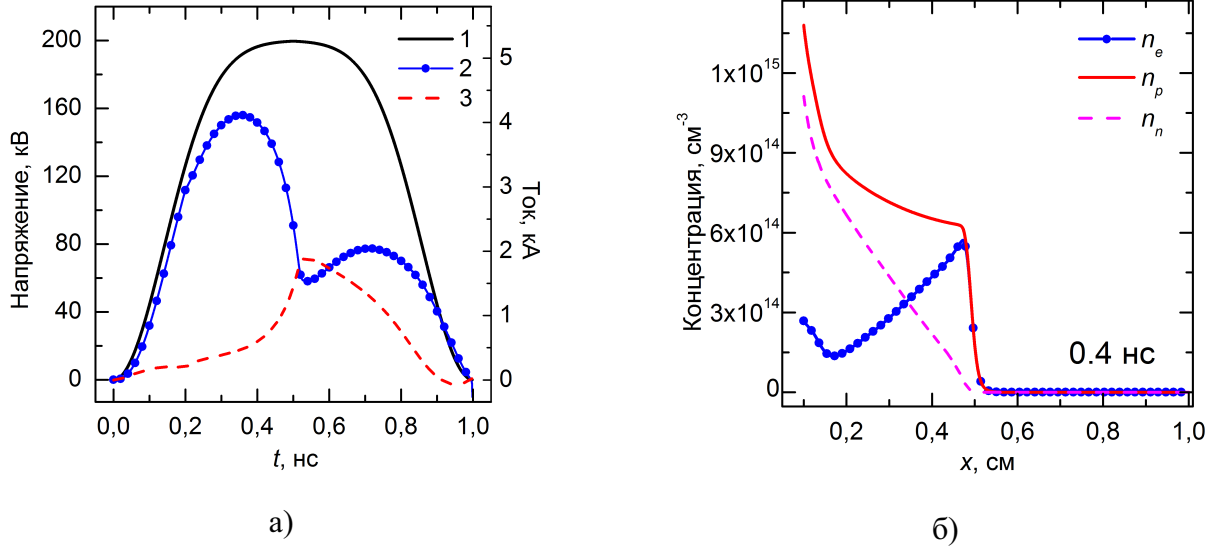


Рис. 5 — а) Зависимости напряжения на источнике  $U_0(t)$  1, падения напряжения на промежутке 2 и полного тока в цепи 3 в модели импульсного газового разряда в элегазе, и б) пример мгновенной структуры трёхкомпонентной плазмы разряда в элегазе.

Аналогичная задача решена для газового разряда наносекундной длительности в среде электроотрицательного газа (элегаза). Помимо дополнительного уравнения непрерывности для отрицательных ионов данная модель также включает закон сохранения полного тока для более точного учёта быстро изменяющегося электромагнитного поля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n_e}{\partial t} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \left[ \mu_e E_r n_e + D_e \frac{\partial n_e}{\partial r} \right] \right) = (\alpha - \eta) \mu_e E_r n_e \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_r}{\partial t} - q \left[ \mu_e E_r n_e + D_e \frac{\partial n_e}{\partial r} \right] = \frac{U_0(t) - \int_{r_c}^{r_a} E_r(r, t) dr}{2\pi r L R} \\ n_p = n_0 + \int_0^t \alpha(E_r) \mu_e E_r n_e dt, \quad n_n = n_p - n_e - \frac{\varepsilon_0}{qr} \frac{\partial}{\partial r} (r E_r) \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $E_r \equiv E_r(r, t)$  - радиальная компонента напряжённости электрического поля,  $\mu_e$  и  $D_e$  - постоянные величины подвижности электронов и коэффициента диффузии,  $R$  - балластное сопротивление,  $L$  - протяжённость диода в осевом направлении,  $U_0(t)$  - импульс напряжения источника питания.

Благодаря балластному сопротивлению максимальное амплитудное значение падения напряжения на газоразрядном промежутке составляет 160 кВ, что значительно превышает статическое пробивное значение (рисунок 5). Пробой газа развивается на переднем фронте импульса напряжения, однако фаза коммутация промежутка наступает значительно позже и характеризуется относительно более высоким падением напряжения на диоде вследствие низкой проводимости ион-ионной плазмы. Также установлено, что временное изменение электрического поля представляет собой распространение фронта бегущей волны переменной амплитуды от катода к аноду ( $r_c = 1$  мм,  $r_a = 10$  мм). Следует отметить, что подобное моделирование разрядных явлений в данной главе диссертации проводилось без использования многофакторных приёмов инициирования разряда, широко применяемых в работах других авторов.

**Четвёртая глава** целиком посвящена последовательному построению методологии гибридного моделирования газовых разрядов высокого давления. Суть гибридного моделирования заключается в согласованном объединении двух детерминистических подходов, макроскопического (гидродинамического) и кинетического, для исследования быстропротекающих процессов. При изучении газовых разрядов высокого давления, которые являются источниками УЭ, принципы гибридного моделирования позволяют независимо рассчитывать характеристики разряда и потоков УЭ, поскольку доля последних в общем количестве электронов мала.

В начале главы приводятся основные теоретические положения гибридных моделей газовых разрядов высокого давления, которые в значительной степени базируются на экспериментальных представлениях о потоках УЭ, генерируемых такими разрядами. Предлагаемый подход гибридного моделирования разделён на два последовательных этапа. Сначала осуществляется решение макроскопических уравнений, описывающих динамику газоразрядной плазмы без учёта быстрых частиц, а затем решается кинетическое уравнение Больцмана только для УЭ, которые двигаются в согласованном электромагнитном поле, создаваемом потоками частиц в макроскопическом рассмотрении. Изначально предполагается, что все электроны, рождённые в разряде (вторичные), обладают потенциальной возможностью перейти в режим убегания. Рождение и гибель электронов определяются соответствующими сечениями столкновений. Если электрон по каким-либо причинам перестаёт быть убегающим, то он не пополняет вновь группу плазменных электронов в силу малочисленности группы УЭ.

На начальном этапе применения предложенной методологии рассматривается гибридная модель наносекундного разряда в планарном газовом диоде, заполненном азотом атмосферного давления. На основе результатов моделирования эволюции разрядной плазмы из предыдущей главы для вычисления функции

распределения УЭ  $f(x, v, t)$  численно решалось следующее одномерное кинетическое уравнение:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{qE(x, t)}{m} \frac{\partial f}{\partial v} = \left( \frac{\partial n_e(x, t)}{\partial t} \right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{\pi}} \exp(-\xi v^2) - N\sigma^*(v)vf, \quad (3)$$

где  $E(x, t)$  и  $n_e(x, t)$ - нестационарные распределения электрического поля и концентрации электронов, определяемые макроскопическими уравнениями,  $N$  - концентрация нейтральных атомов (молекул),  $\sigma^*(v)$  - транспортное сечение рассеяния электронов,  $\xi$  - числовой коэффициент, характеризующий тепловой разброс энергий вторичных электронов (в диапазоне  $\sim 1 - 50$  эВ).

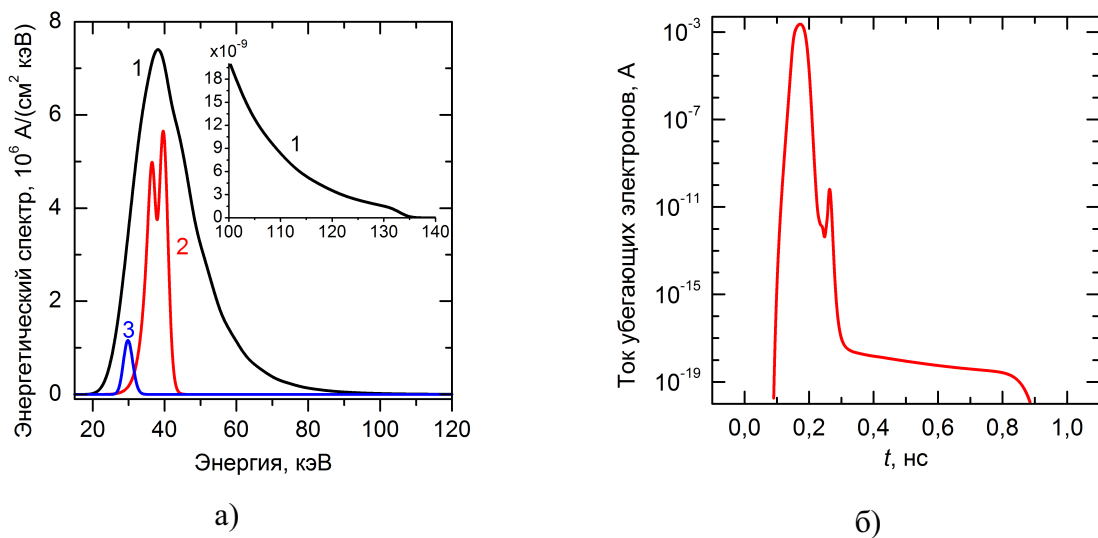


Рис. 6 — Характеристики УЭ за анодом: а) спектры в моменты времени: 1 - 148 пс, 2 - 236 пс (функция домножена на  $10^7$ ), 3 - 710 пс (функция домножена на  $10^{13}$ ), и б) ток пучка УЭ.

Малый график представляет детализацию “хвоста” функции распределения 1.

Характеристики пучка УЭ (рисунок б) даются с учётом ослабления в алюминиевой фольге толщиной 10 мкм согласно формулам Табата-Ито. Определённая часть мгновенного спектра пучка имеет значения, превосходящие соответствующее значение напряжение на промежутке (умноженное на заряд электрона), т.е. приобретает “аномальные” энергии, однако на интегральной (за полный импульс напряжения) спектральной характеристике такая часть УЭ отсутствует. Модель убедительно показала, что двухпиковая структура функции тока УЭ - следствие появления нескольких поколений УЭ, генерируемых с запаздыванием по времени.

В третьем разделе главы рассматривается гибридная модель наносекундного разряда в одномерном коаксиальном диоде. Общая методология построения гибридной модели аналогична планарной модели, однако из-за достаточно высоких значений электрических полей в данной модели используется релятивистское уравнение Больцмана.

Предметом изучения в рамках данной модели были наносекундные разряды в элегазе. Параметры промежутка широко варьировались с целью сохранения высокого значения перенапряжения зазора при значительной неоднородности электростатического поля. Было показано (рисунок 7), что увеличение радиуса катода приводит к резкому уменьшению значения амплитуды тока за фольгой и, одновременно, к увеличению длительности импульса тока. В данной конфигурации промежутка УЭ возникают на фронте волны ионизации. Было также отмечено наличие “аномальности” энергий УЭ в их интегральном спектре. Результаты хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, полученными для аналогичных физических условий.

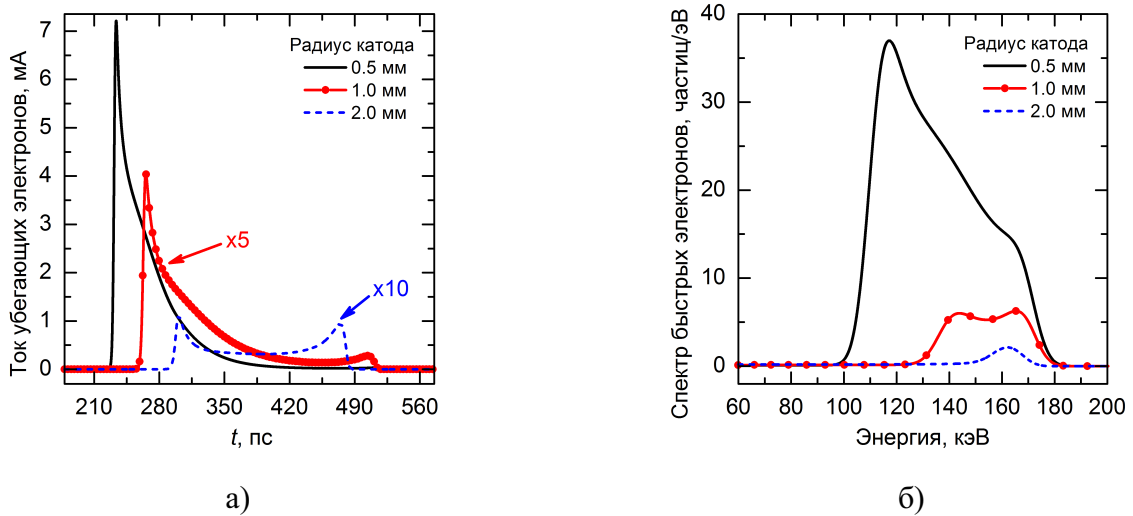


Рис. 7 — Ток УЭ а) и функция распределения быстрых электронов б) при различных значениях радиуса катода.

Также данная модель использовалась в исследованиях влияния характера начальной предыонизации газа на параметры УЭ. Сравнивались влияния двух типов условий: с однородным распределением концентрации квазинейтральной плазмы и существенно прикатодное начальное распределение, которое является имитацией слабой эмиссии с катода при отсутствии объёмной предыонизации. Подобные различия коренным образом сказываются на амплитуде и форме импульса тока быстрых электронов. При прикатодном инициировании разряда импульс тока быстрых электронов имеет на два порядка бóльшую амплитуду, а время появления основного импульса приходится на стадию спада диодного напряжения. Для однородной предыонизации импульс тока существенно короче и он весь сосредоточен на переднем фронте диодного падения напряжения. Также показано, что в режиме прикатодного инициирования спектр быстрых электронов довольно широкий и, в отличие от других режимов предыонизации, имеет двухмодовую структуру.

**Пятая глава** посвящена формулировке полностью кинетической теории газовых разрядов высокого давления с УЭ. В отличие от гибридного моделирования (Глава 4) в данной методологии все электроны разряда описываются кинетическим уравнением Больцмана. Такой подход позволяет самосогласованно учитывать высокоэнергетическую часть электронного спектра в разряде при любых давлениях газа. Несмотря на возможности использования полностью кинетических моделей для решения широкого круга теоретических проблем, в данной главе полностью кинетическая модель используется только с целью уточнения результатов гибридного моделирования.

Вначале главы приводятся основные теоретические положения полностью кинетической модели быстропротекающего газового разряда. Кинетическое уравнение для функции распределения электронов  $f(\vec{x}, \vec{p}, t)$  содержит интегралы столкновений, описывающие процессы, которые вносят существенный вклад только в быстрые процессы наносекундной длительности:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\vec{p}}{m\gamma} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - q\vec{E}(\vec{x}, t) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = (Q_+ - Q_- + S_t)/\gamma, \quad (4)$$

где  $Q_-$  и  $Q_+$  - источники гибели и генерации электронов в данном элементе фазового пространства за счёт неупругих процессов,  $S_t$  - источник изменения функции распределения электронов под действием упругих процессов рассеяния электронов на нейтральных атомах/молекулах,  $\vec{E}(\vec{x}, t)$  - напряжённость электрического поля.

В данной главе изучаются разряды в неэлектроотрицательных газах, поэтому считается, что плазма разряда состоит только из электронов и положительных ионов одного типа, движением которых можно пренебречь. Эволюция электрического поля определялась законом Ампера:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + q \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vec{p}}{m\gamma} f d\vec{p} = \frac{I(t)}{S}, \quad (5)$$

где  $I(t)$  - ток в электрической цепи подключения газоразрядного промежутка,  $S$  - площадь поперечного сечения газового диода. Система (4)-(5) дополняется уравнениями Максвелла для согласованного учёта изменения электромагнитного поля.

Во втором разделе обсуждаются различные формы выражений интегралов упругих и неупругих столкновений электронов. Для учёта упругих столкновений производится разложение общего выражения интеграла столкновений в ряды по полиномам Лежандра. После чего ограничиваются двумя первыми слагаемыми: слагаемым вида Фоккера-Планка и слагаемым “тау-приближения”.

Интегралы неупругих столкновений представлены в виде аддитивной комбинации, состоящей из слагаемых с сечением Резерфорда для описания рассеяния налетающего быстрого электрона, сечением обменного взаимодействия между быстрым налетающим и медленным (атомным) электронами и слагаемого, ответственного за генерацию новых быстрых электронов.

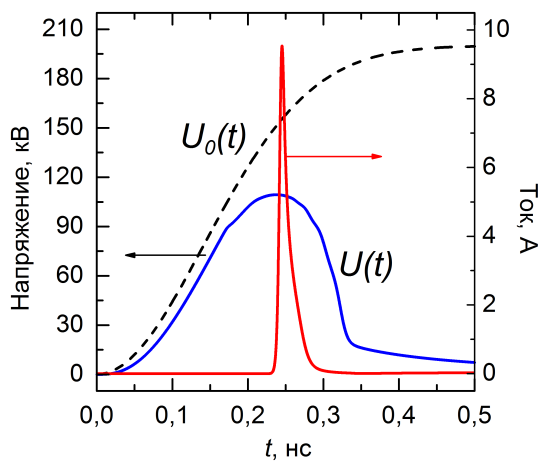


Рис. 8 — Временные зависимости напряжения источника  $U_0(t)$ , напряжение на диоде  $U(t)$  и тока пучка быстрых электронов (на один погонный сантиметр).

Третий раздел главы описывает применение полностью кинетического подхода к моделированию газового разряда наносекундной длительности с УЭ в среде азота атмосферного давления. Моделировался коаксиальный газоразрядный промежуток, подключенный к источнику питания через балластное сопротивление. Начальное распределение квазинейтральной плазмы выбиралось однородным или неоднородным с преобладанием основной доли зарядов вблизи катода. На рисунке 8 показаны полученные в результате моделирования временные зависимости напряжений на источнике и на диоде, а также зависимость импульса тока пучка быстрых электронов за анодной фольгой 10 мкм. Данные зависимости находятся в хорошем согласии с аналогичными кривыми гибридной модели, в том числе, по значению электрического поля в завершающей стадии пробоя ( $\sim 20$  кВ/см) и по характеристике импульса тока УЭ. Вычисленная динамика функции распределения (рисунок 9) подтверждает основные наблюдения гибридной модели: УЭ зарождаются на фронте волны ионизации, распространяющейся в направлении от катода с малым радиусом кривизны. Поток УЭ значительно опережает движение фронта волны ионизации, а энергетический состав в основном представлен “аномальными” энергиями, что справедливо как для мгновенного, так и для интегрального распределений. Учёт упругих столкновений формирует характерную форму функции распределения с долей электронов, летящих в направлении, противоположном движению волны ионизации.

На рисунке 10 показаны функции мгновенного спектра УЭ, их полный (интегральный) спектр за всё время рассмотрения разряда, а также интегральный спектр за анодной фольгой. Спектральное распределение можно условно разделить на низкоэнергетичную (плазменную) часть и высокоэнергетичную часть (пучок УЭ). По характеру трансформации полного спектра видно, как происходит нагрев электронов. Следует отметить, что практически весь диапазон энергий электронов пучка (рисунок 10 (б)) лежит в области “аномальных”



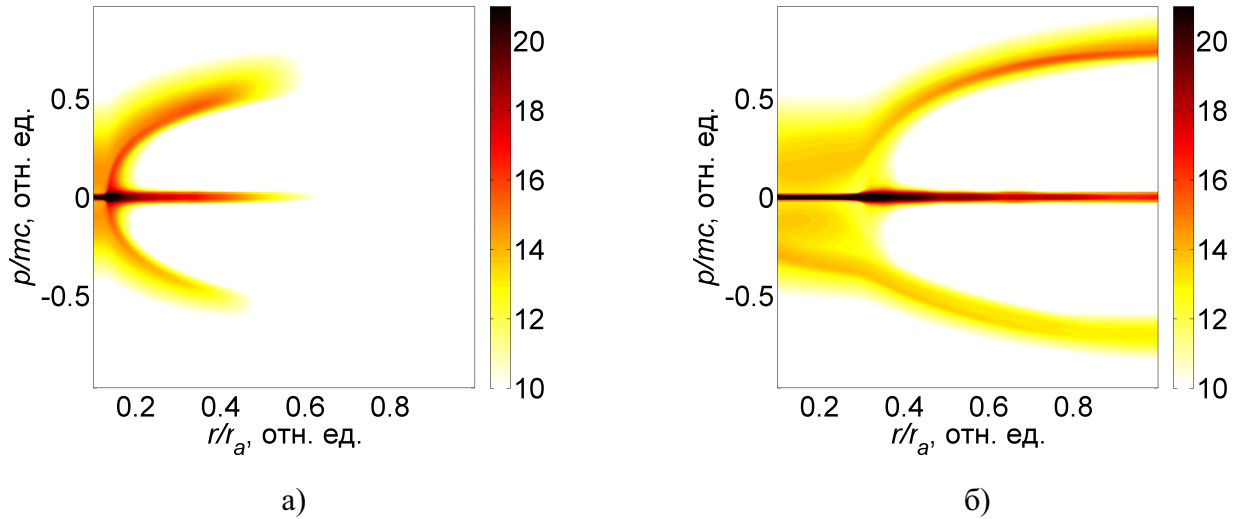


Рис. 9 — Денситограммы мгновенных функций распределения электронов в логарифмическом масштабе, соответствующие моментам времени: а) 200 пс; б) 250 пс.

значений, что характерно только для рассматриваемой модели цилиндрической геометрии разрядного промежутка.

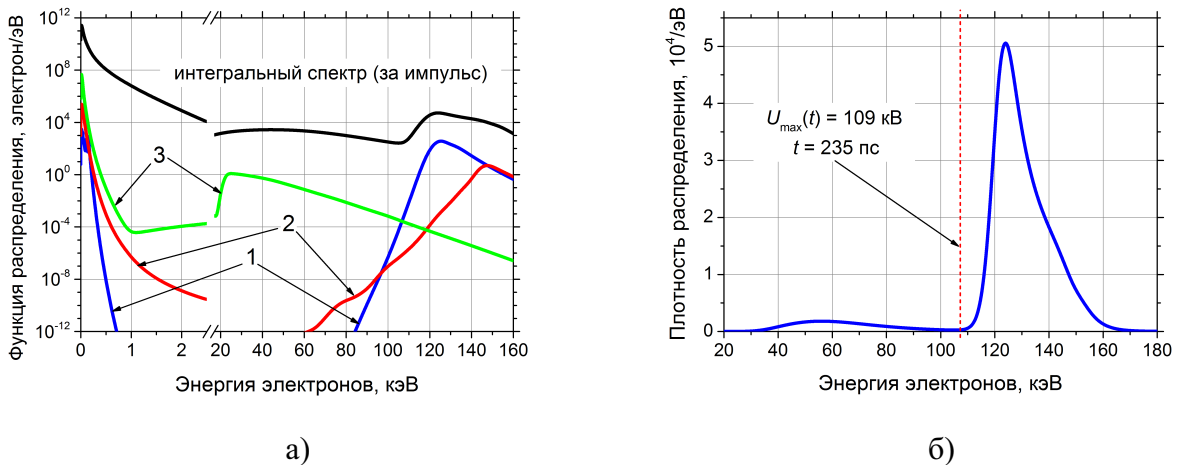


Рис. 10 — Спектральные характеристики УЭ: в разряде а) 1 - 250 пс, 2 - 300 пс, 3 - 350 пс и суммарная (интегральная), и за 10 мкм анодом б) (интегральный спектр).

Более детальные сравнения гибридной и кинетической моделей для начальных условий с сильно неоднородной, преимущественно прикатодной пре-дыонизацией приводятся дальше. Временные профили напряжения и тока оказываются сходными, однако формы импульсов тока УЭ существенно разнятся: в гибридной модели ток имеет двухпиковую структуру и бóльшую длительность, что объясняется различием динамики электрического поля. Спад амплитуды электрического поля в полностью кинетической модели связан с активной ионизацией газа потоком УЭ, локализованным перед фронтом волны ионизации. В завершении раздела приводятся весомые аргументы в пользу того, что, несмотря на высокую точность полученных результатов, возможности применения полно-

стью кинетических моделей разрядов высокого давления фактически ограничены только одномерными задачами, в то время как гибридное моделирование позволяет рассматривать решение задач более высоких размерностей.

Четвёртый раздел главы посвящён подробному объяснению физической природы явления формирования в газовых разрядах высокого давления электронов, имеющих энергии выше мгновенных значений приложенного напряжения  $U_0$  (умноженного на заряд электрона  $q$ ). Их принято называть электронами с “аномальными” значениями энергии. Показывается, что данный феномен вызван взаимодействием вторичных электронов разряда с сильным электрическим полем на фронте волны ионизации, профиль которого имеет вид бегущей волны. С помощью элементарной теории было установлено, что в нерелятивистском случае единичный электрон может таким образом набирать энергии вплоть до  $\sim 4qU_0$ , а в ультрарелятивистском - до  $\sim 2\gamma \cdot qU_0$ , что многократно превышает значение  $qU_0$ .

В **заключении** диссертации приведены основные выводы работы:

1. Предложена и реализована (в виде прикладной программы на языках высокого уровня) самосогласованная математическая методика восстановления спектров быстрых электронов по дискретному набору экспериментальных данных кривой ослабления пучка в металлических фольгах различной толщины путём численного решения некорректно поставленной задачи для соответствующего уравнения Фредгольма первого рода;
2. С помощью предложенной методики впервые были восстановлены энергетические спектральные распределения пучков быстрых электронов за анодом из фольги для газонаполненных и вакуумных диодов различной конструкции без каких-либо априорных предположений о форме и ширине исследуемых спектров;
3. В рамках единого подхода построения теоретических моделей и сопряжённого с ним подхода к решению получающихся дифференциальных уравнений переноса заряженных частиц, совмещённых с уравнениями эволюции электромагнитного поля, была успешно смоделирована работа активной области полупроводникового диода Ганна в цепи наносекундного генератора сверхвысокочастотных колебаний, а также были изучены нестационарные структуры классического тлеющего разряда и наносекундного газового разряда высокого давления в азоте и гексафториде серы;
4. Благодаря систематизированному применению численных методов для решения кинетического бесстолкновительного уравнения (Власова) совместно с уравнением Пуассона для электрического поля, были впервые решены две классические задачи вакуумной электроники: задача о релаксации объёмного заряда в диоде Чайлда-Ленгмюра и задача об инжекции электронного пучка в

эквипотенциальный одномерный межэлектродный промежуток. Новизна данного подхода обусловлена тем, что принципы физической кинетики впервые задействованы для рассмотрения задач, в которых столь фундаментальный подход ранее считался избыточным;

5. Впервые предложен гибридный теоретический подход для описания динамики электрических разрядов высокого давления наносекундной длительности, который основан на сочетании гидродинамического моделирования эволюции разрядной плазмы с кинетическим описанием динамики УЭ;
6. Благодаря использованию гибридного кинетического подхода впервые была рассчитана динамика наносекундного газового разряда высокого давления в различных одномерных конфигурациях разрядного промежутка. Предложенная методология позволила получить коммутационные характеристики исследуемых диодов, пространственно-временные профили распределения концентрации плазмы и электрического поля, а также импульсы тока УЭ и их спектральные распределения с учётом ослабления в металлических фольгах. Впервые показано, что поток УЭ в газовом разряде высокого давления естественным образом формируется за счёт экстракции (по импульсам) в сильном электрическом поле и последующего непрерывного ускорения электронов из хвоста энергетического спектра плотной плазмы на фронте волны ионизации газа. Электронная эмиссия с катода при таком механизме взаимодействия поля и плазмы в разрядах высокого давления не является главным фактором образования пучка УЭ;
7. Впервые предложена полностью кинетическая модель электрического разряда высокого давления, в которой электронная составляющая рассматривалась единым образом на основании решения уравнения Больцмана. Сформулированная полностью кинетическая модель позволила уточнить физические характеристики пучков УЭ, получаемых в рамках гибридной модели для одномерной и одномерно-осесимметричной конфигураций. В частности, уточнению подверглись параметры длительность и амплитуды тока пучка, а также энергетический спектр электронов после прохождения ими порога отсечки металлического фильтра. На базе кинетического подхода впервые самосогласованным расчётом продемонстрирована определяющая роль УЭ в процессе наработки объёмной плазмы в разрядах с резко неоднородной начальной ионизацией промежутка. Доказано, что в коаксиальной одномерной задаче именно УЭ обеспечивают быстрое заполнение плазмой межэлектродного пространства и формирование группы электронов с “аномально высокими энергиями”. Также полностью кинетическая модель позволяет точно указать границы применимости гибридного подхода;

8. Был проведён анализ электродинамического механизма ускорения единичного электрона бегущим доменом продольного электрического поля, который выявил необходимые и достаточные условия его реализации применительно к электронам в газовом разряде с неоднородной геометрией диода. Была показана принципиальная возможность ускорения единичного электрона до кинетических энергий, многократно превосходящих значение максимального приложенного к диоду напряжения  $U_{max}$ , умноженному на элементарный заряд  $q$ . Полностью кинетическая модель непрерывного ускорения электронов в газовом разряде с коаксиальной геометрией подробно демонстрирует появление электронов с такими “аномально высокими энергиями”. Она также позволяет оценить “степень аномальности” (отношение максимальной энергии электронов в пучке к величине  $qU_{max}$ ), которая не превышает 150 %.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

1. *Кожевников, В.Ю.* Дрейфовая модель прикатодных областей тлеющего разряда / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Ю.Д. Королёв // *Физика плазмы*. — 2006. — Т. 32, № 11. — С. 1027–1038.
2. *Кожевников, В.Ю.* Теория нормального тлеющего разряда повышенного давления / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Ю.Д. Королёв // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2006. — Т. 49, № 2. — С. 71–77.
3. *Кожевников, В.Ю.* Расчет вольтамперной характеристики объемного разряда высокого давления с внешней ионизацией газа / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2007. — Т. 50, № 8. — С. 37–41.
4. *Кожевников, В.Ю.* Вольт-амперная характеристика объемного разряда в газе высокого давления / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // *Теплофизика высоких температур*. — 2008. — Т. 46, № 4. — С. 625–628.
5. *Baksht, E.H.* Spectrum of fast electrons in a subnanosecond breakdown of air-filled diodes at atmospheric pressure / E.H. Baksht, A.G. Burachenko, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2010. — Vol. 43, no. 30. — P. 305201.
6. *Козырев, А.В.* Восстановление спектра электронного пучка наносекундной длительности из данных по его ослаблению в тонких фольгах / А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.Ф. Тарасенко // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2010. — Т. 53, № 4. — С. 33–39.
7. *Shao, T.* Runaway electrons and x-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air / T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang, D.V. Rybka, I.D. Kostyrya, A.V. Kozyrev, P. Yan, V.Yu. Kozhevnikov // *New Journal of Physics*. — 2011. — Vol. 13, no. 11. — P. 113035.

8. *Козырев, А.В.* Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления / А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, И.Д. Костыря, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц // *Оптика атмосферы и океана*. — 2011. — Т. 24, № 11. — С. 1009–1017.
9. *Baksht, E.H.* Spectrum of fast electrons in subnanosecond breakdown of air-filled diodes at atmospheric pressure / E.H. Baksht, I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko, A.G. Burachenko, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev // *Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International, Atlanta, USA*. — 2010. — Pp. 405–408.
10. *Конев, В.Ю.* Эффект стабилизации фазы СВЧ-колебаний наносекундных генераторов Ганна / В.Ю. Конев, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.П. Губанов, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.А. Торхов // *Письма в Журнал технической физики*. — 2013. — Т. 39, № 21. — С. 45–51.
11. *Рыбка, Д.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс / Д.В. Рыбка, И.В. Андроников, Г.С. Евтушенко, А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко, М.В. Тригуб, Ю.В. Шутько // *Оптика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 26, № 1. — С. 85–90.
12. *Кожевников, В.Ю.* Численное моделирование процесса формирования газового разряда высокого давления / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2014. — Т. 57, № 3/2. — С. 134–137.
13. *Кожевников, В.Ю.* Теоретическое 0-D-моделирование субнаносекундного газового разряда высокого давления / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.М. Дмитриева // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2014. — Т. 57, № 3/2. — С. 130–133.
14. *Рыбка, Д.В.* Влияние давления азота на характеристики рентгеновского излучения при переходе от диффузного к коронному разряду / Д.В. Рыбка, А.Г. Бураченко, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, В.Ф. Тарасенко // *Оптика атмосферы и океана*. — 2014. — Т. 27, № 4. — С. 311–315.
15. *Козырев, А.В.* Simulation Of High-Pressure Nanosecond Gas Discharge In Coaxial Gap / А.В. Козырев, В.Ю. Кожевников, Н.М. Дмитриева // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2014. — Vol. 57, no. 12/2. — Pp. 59–61.
16. *Kozhevnikov, V.Yu.* 1D simulation of runaway electrons generation in pulsed high-pressure gas discharge / V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk // *EPL (Europhysics Letters)*. — 2015. — Vol. 112, no. 1. — P. 15001.
17. *Kozyrev, A.V.* Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, M.S. Vorobyov, E.Kh. Baksht, A.G. Bu-

- rachenko, N.N. Koval, V.F. Tarasenko // *Laser and Particle Beams*. — 2015. — Vol. 33, no. 02. — Pp. 183–192.
18. Конев, В.Ю. Стабилизация фазы СВЧ-колебаний наносекундной длительности в генераторе на диоде Ганна / В.Ю. Конев, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, В.П. Губанов, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев // *Журнал технической физики*. — 2015. — Т. 85, № 3. — С. 103–109.
  19. Kozyrev, A.V. Zero-Dimensional Theoretical Model of Subnanosecond High-Pressure Gas Discharge / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, N.S. Semeniuk // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2015. — Vol. 43, no. 12. — Pp. 4077–4080.
  20. Kozyrev, A.V. Theoretical Simulation of a Gas Breakdown Initiated by External Plasma Source in the Gap With Combined Metal-Dielectric Electrodes / A.V. Kozyrev, V.Y. Kozhevnikov, N.S. Semeniuk, L.A. Zyulkova // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2015. — Vol. 43, no. 8. — Pp. 2294–2298.
  21. Kozhevnikov, V.Yu. Kinetic Modelling of the One-dimensional Planar Virtual Cathode Oscillator / V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk // *Telecommunications Forum (TELFOR), 2016 24st, Belgrade, Serbia*. — 2016. — Pp. 554–557.
  22. Kozyrev, A. Theoretical simulation of the picosecond runaway-electron beam in coaxial diode filled with  $SF_6$  at atmospheric pressure / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, M. Lomaev, D. Sorokin, N. Semeniuk, V. Tarasenko // *EPL (Europhysics Letters)*. — 2016. — Vol. 114, no. 4. — P. 45001.
  23. Kozyrev, A.V. Theoretical simulation of high-voltage discharge with runaway electrons in sulfur hexafluoride at atmospheric pressure / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, N.S. Semeniuk // *Matter and Radiation at Extremes*. — 2016. — Vol. 1, no. 5. — Pp. 264–268.
  24. Tarasenko, V. Current and spectra of runaway electron beams in  $SF_6$ , nitrogen and air / V. Tarasenko, Ch. Zhang, A. Kozyrev, E. Baksht, A. Burachenko, T. Shao, M. Lomaev, P. Yan, V. Kozhevnikov, N. Semeniuk // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2016. — Т. 59, № 9/2. — С. 119–122.
  25. Кожевников, В.Ю. Влияние способа предварительной ионизации газа на параметры пучка убегающих электронов в разрядах высокого давления / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2016. — Т. 59, № 12. — С. 3–10.
  26. Kozhevnikov, V.Y. The physical nature of electrons with “anomalous” energies in fast atmospheric discharges / V.Y. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, E.M. Baranova, E.Kh. Baksht, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, A.G. Burachenko // *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2017 International Conference on, Verona, Italy*. — 2017. — Pp. 489–492.
  27. Kozhevnikov, V.Yu. Modeling of Space Charge Effects in Intense Electron Beams: Kinetic Equation Method Versus PIC Method / V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev,

- N.S. Semeniuk // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2017. — Vol. 45, no. 10. — Pp. 2762–2766.
28. Кожевников, В.Ю. Физическая кинетика электронов в высоковольтном импульсном разряде высокого давления с цилиндрической геометрией / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2017. — Т. 60, № 8. — С. 148–158.
29. Козырев, А.В. Вариации параметров пучка убегающих электронов в газовом разряде в условиях неоднородной предварительной ионизации / А.В. Козырев, Е.М. Баранова, В.Ю. Кожевников, Н.С. Семенюк // *Письма в Журнал технической физики*. — 2017. — Т. 43, № 17. — С. 56–63.
30. Tarasenko, V.F. Influence of electrode spacing and gas pressure on parameters of a runaway electron beam generating during the nanosecond breakdown in SF<sub>6</sub> and nitrogen / V.F. Tarasenko, C. Zhang, A.V. Kozyrev, D.A. Sorokin, X. Hou, N.S. Semeniuk, A.G. Burachenko, P. Yan, V.Yu. Kozhevnikov, E.Kh. Baksht, M.I. Lomaev, T. Shao // *High Voltage*. — 2017. — Vol. 2, no. 2. — Pp. 49–55.
31. Kozyrev, A. Why do Electrons with “Anomalous Energies” appear in High-Pressure Gas Discharges? / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, N. Semeniuk // *EPJ Web of Conferences*. — 2018. — Vol. 167. — P. 01005.
32. Кожевников, В.Ю. Теория высоковольтного импульсного разряда в газе высокого давления: гидродинамический и кинетический подходы / В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк, А.О. Коковин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2018. — Т. 61, № 4. — С. 3–10.
33. Kozhevnikov, V.Yu. Influence of Runaway Electrons on the Formation Time of Nanosecond Discharge / V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, A.O. Kokovin // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2018. — Vol. 46, no. 10. — Pp. 3468–3472.
34. Kozhevnikov, V. Hybrid Numerical Simulation of the Nanosecond Discharge in Gas-Filled Diode with Plane-Grid Cathode / V. Kozhevnikov, A. Kozyrev, N. Semeniuk, A. Kokovin // 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Greifswald, Germany. — IEEE, 2018. — Pp. 483–486.
35. Kokovin, A. Theoretical Modelling of Fast Atmospheric Pressure Discharge in Gas Diode with Plane-Grid Cathode System / A. Kokovin, N. Semeniuk, V. Kozhevnikov, V. Goliak, A. Kozyrev // 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE), Tomsk, Russia. — IEEE, 2018. — Pp. 200–203.