

На правах рукописи



Семенюк Наталья Степановна

**Нестационарная кинетика начальной стадии
высоковольтного пробоя
газоразрядных промежутков**

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Научный руководитель:

Козырев Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Коваль Тамара Васильевна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор
Астрелин Виталий Тимофеевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет

Защита состоится 18 мая 2022 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.031.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук по адресу 634055, г. Томск, пр-кт Академический, 2/3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <https://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>

Автореферат разослан 28 марта 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Г. Е. Озур

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Исследования движения заряженных частиц в сильных электромагнитных полях в газах и вакууме тесно связаны с такими областями применения как управляемый термоядерный синтез, поверхностная модификация материалов, релятивистская плазменная СВЧ электроника, плазмохимия, медицина и др. Рассматриваемые явления традиционно описываются хорошо разработанными методами классической электродинамики, квантовой физики атомов и молекул, статистической физики.

Развитие современных методов скоростной диагностики и вычислительных технологий сильно продвинули понимание физики газовых разрядов, и особенно нестационарных процессов, при которых формируются направленные потоки высокоэнергетичных электронов и ионов. К таким разрядам относятся, например, разряды высокого давления с убегающими электронами и разряды в источниках ионов на основе вакуумных дуг, в которых извлечение положительных ионов происходит со стороны анода [1]. Интересной особенностью этих источников ионов является превышение кинетической энергии частиц над анодным напряжением дугового разряда [2]. Этот эффект чаще всего объясняется с двух, во многом, альтернативных точек зрения: наличие «горба электрического потенциала» в зазоре [3] и ускорение ионов «электронным ветром» [4]. Представляется актуальным развитие новых подходов к теоретическому описанию этого явления на основе кинетического уравнения Больцмана.

История исследований убегающих электронов началась в 1925 году, когда Вильсоном было высказано предположение, что разряд молнии сопровождается ускорением электронов на фронте лидера. Уже в 1926 году Эддингтон вводит термин «убегающие электроны». Убегающими были названы те электроны, которые приобретают от электрического поля на единице длины пути энергию направленного движения большую, чем ту, которую они расходуют при столкновениях. В результате эти электроны переходят в режим непрерывного ускорения [5].

Убегающие электроны играют важную роль при формировании разрядов в неоднородном электрическом поле, определяя форму разряда и пробивное напряжение. Сверхкороткий электронный пучок в данное время применяется для инициирования объемного разряда в CO₂-лазере [6] и возбуждения люминесценции в кристаллах [7]. Поскольку ток убегающих электронов генерируется в коротком временном интервале в момент пробоя, то при торможении электронов будет сформирован короткий импульс рентгеновского излучения [8]. Это открывает возможность создания рентгеновских приборов нового поколения на основе высоковольтного разряда с убегающими электронами.

Большой массив разносторонних данных по убегающим электронам содержится в монографии [9], которая обобщает современные результаты экспериментальной и теоретической работы в данной области. Однако слож-

ность изучения данного явления связана с трудностью регистрации параметров тока убегающих электронов из-за малой длительности и крутых фронтов импульса. Помимо этого, экспериментальные исследования не всегда способны ответить на такие вопросы, как место возникновения убегающих электронов, их роль в формировании разряда, энергетический спектр. Когда возникают подобные затруднения, часто прибегают к компьютерному моделированию, которое позволяет рассмотреть процесс с большим временным разрешением и отвлечься от технических сложностей регистрации.

Таким образом, выяснение ключевых механизмов генерации заряженных частиц на ранних стадиях нестационарного электрического разряда современными методами теоретического анализа является актуальной задачей, особенно полезной при разработке приборов плазменной электроники нового поколения. В данной работе представлено теоретическое моделирование пробоя газонаполненных промежутков в рамках кинетического подхода к описанию плазмы.

1. *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology / R. L. Boxman, D. M. Sanders, P. J. Martin. New York, USA: Park Ridge, Noye, 1996. 773 p.*
2. *Cathodic Arcs. From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders. New York, USA: Springer Inc., 2008. 544 p.*
3. *A. Bolotov // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. V. 23. No. 6. P. 884–892.*
4. *I. A. Krinberg // Vacuum. 2005. V. 77. No. 4. P. 407–411.*
5. *A. S. Eddington // Nature. 1926. V. 117. No. 2948. P. 25–32.*
6. *Накачка газовых лазеров убегающими электронами, генерируемыми в открытом разряде // В сб. Газовые и плазменные лазеры / Под ред. С.И. Яковленко. М.: Наука, 2005. С. 316–330.*
7. *А. Г. Бураченко // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. № 6. С. 861–865.*
8. *Л. В. Тарасова // ЖТФ. 1969. Т. 39. № 8. С. 1530–1533.*
9. *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / Под редакцией В. Ф. Тарасенко. Томск: STT, 2015. 568с*

Цель работы

Целью исследования является выявление на базе нестационарной кинетики заряженных частиц ключевых закономерностей электрического пробоя, сопровождающегося формированием направленных потоков ионов и электронов в приборах плазменной электроники.

Основные задачи

Для достижения основной цели были сформулированы следующие задачи исследований:

1. Разработать численную модель самосогласованного описания кинетики заряженных частиц и электрического поля на основе одномерного кинетического уравнения Больцмана и уравнений для электрического поля с учетом внешней цепи, содержащую минимально достаточный набор элементарных процессов и позволяющую рассчитывать внутренние (пространственно-временные распределения заряженных частиц и электрического поля) и внешние (ток и напряжение во внешней цепи разряда) характеристики нестационарных процессов.

2. Протестировать и оптимизировать эффективные вычислительные алгоритмы решения модельных уравнений.
3. Используя разработанную одномерную модель наносекундного разряда высокого давления, рассчитать кинетику электронов, движущихся в режиме непрерывного ускорения, и выявить основные факторы, влияющие на характеристики потока таких электронов.
4. Сформулировать и реализовать кинетическую модель электронной подсистемы в субнаносекундном разряде высокого давления с резко неоднородным начальным распределением электрического поля, исследовать возможность ее адаптации к расчетам основных параметров плазмы и пучков электронов в газоразрядных приборах.
5. Разработать подход на основе кинетического уравнения к описанию двухкомпонентной электрон-ионной плазмы нестационарного разряда низкого давления с целью выявления механизма возникновения анодонаправленного потока ионов, наблюдаемого в вакуумных и плазменных электроразрядных устройствах.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. На основе кинетического уравнения Больцмана для электронов и уравнения полного тока для напряженности электрического поля описана одномерная нестационарная кинетика электронов газа субнаносекундном газовом разряде высокого давления в условиях первоначально однородного и сильно неоднородного электрического поля. Модель позволила рассчитать все характеристики малочисленной фракции убегающих электронов и учесть их влияние на динамику разряда в целом.
2. С использованием численной модели на основе кинетического уравнения выполнено моделирование радиального пробоя газонаполненного коаксиального промежутка в поле бегущей волны длинной линии. При этом учтены дискретность автоэлектронной эмиссии с катода, объемная ионизация газовой среды как плазменными, так и убегающими электронами. Продемонстрировано согласие рассчитанных параметров потока убегающих электронов с имеющимися экспериментальными данными.
3. Решена одномерная задача нестационарной кинетики электронов и ионов в начальной стадии разряда низкого давления, прослежен механизм формирования ионного потока на анод, в том числе с кинетическими энергиями ионов, превышающими величину, соответствующую приложенному к промежутку напряжению.

Теоретическая и практическая значимость работы

Представленная работа позволяет детально исследовать механизмы генерации заряженных частиц в сильных нестационарных электрических полях, рассмотреть пространственно-временную структуру как разрядов низкого давления, так и разрядов повышенного давления с убегающими электронами при вариациях условий задачи: давление и сорт газа, геометрия проме-

жутка, условия предварительной ионизации, эмиссионная способность катода и т.п. Эти расчеты дают теоретически обоснованные ответы на многие вопросы, возникающие в технической и экспериментальной практике данных разрядов (критерии появления убегающих электронов в разрядах с крутым или пологим фронтом импульса напряжения, влияние эмиссионных свойств катода, особенности регистрации пучка электронов, прошедшего через фольги разной толщины).

Методология и методы исследования

Автором созданы и протестированы оригинальные программы для численных расчетов в среде Matlab. В программах реализовано гидродинамическое и кинетическое описание низкотемпературной плазмы совместно с решением уравнения непрерывности тока в газоразрядном промежутке. Численное решение связано с использованием дискретизации по времени и на сетке координат и импульсов; осуществляется переход от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе алгебраических уравнений. Для дискретизации уравнений применяется метод конечных объемов (Finite-Volume Method) [10]. Каждый из потоков конструируется согласно схеме WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) третьего порядка точности [11]. Частная производная заменяется алгебраической аппроксимацией согласно методу линий (Method of Lines) [12].

В работе применялся метод полуаналитического решения уравнения кинетического Больцмана на неоднородной сетке. Используется декомпозиция этого уравнения на одномерные уравнения переноса раздельно по координате и импульсу. Используемая декомпозиция аналогична методу Странга [13] для уравнения Власова и обеспечивает второй порядок точности по времени. Каждое из полученных в результате декомпозиции уравнений имеет точное общее решение типа бегущей волны с постоянной скоростью, которое в численной модели описывалось методом сдвига. Для получения новых значений функции распределения в узлах координатно-импульсной сетки на каждом шаге сдвигового алгоритма использовалась интерполяция 2-3 порядков.

10. *An Introduction to computational fluid dynamics: The finite volume methods* / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. – New York: Longman Scientific & Technical, 1996. 257 p.
11. X.-D. Liu // *Journal of Computational Physics*. 1994. V. 115. No. 1. P. 200–212.
12. *Adaptive Method of Lines* / A. Vande Wouwer, P. Saucez, W. Schiesser. New York: Chapman and Hall/CRC, 2001. 432 p.
13. G. Strang // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 1968. V. 5. No. 3. P. 506–517.

Положения, выносимые на защиту

1. В результате кинетического одномерного численного моделирования коаксиальных разрядов высокого давления в гексафториде серы и азоте показано, что характеристики возникающего пучка убегающих электронов высоко чувствительны к условиям инициирования пробоя. Изменение начального распределения затравочных электронов по длине промежутка от однородного к резко неоднородному распределению (со сгущением в прикатодной области) приводит к изменению количества убегающих электронов в десятки раз,

а их среднюю энергию и ширину энергетического спектра – на десятки процентов.

2. Сформулирована адаптированная к реальным экспериментам кинетическая вычислительная модель радиального пробоя коаксиального газового промежутка высокого давления в электрическом поле бегущей волны. Показано, что в коаксиальном диоде, заполненном воздухом атмосферного давления, при длительности импульса напряжения менее 500 пс реализуется незавершенный пробой, при котором импульс тока убегающих электронов на аноде не сопровождается стадией коммутации, то есть переключением промежутка плотной плазмой разряда.

3. Результаты кинетического моделирования электронной компоненты низкотемпературной плазмы свидетельствуют о необходимости учета рассеивающих столкновений электронов с атомами и/или молекулами газовой среды для адекватного моделирования потока убегающих электронов при субнаносекундном пробое газонаполненного диода высокого давления. Учет рассеивающих столкновений в корне изменяет теоретический прогноз по приведенной напряженности электрического поля (в 2–5 раз в сторону увеличения в зависимости от сорта газа), обеспечивающего появление заметного количества убегающих электронов в субнаносекундных разрядах, по сравнению с известными стационарными моделями этого явления.

4. На основе самосогласованного кинетического описания электронов и ионов в нестационарном продольно неоднородном электрическом поле исследован физический механизм генерации анодонаправленного потока положительных ионов в плоскопараллельном диоде при низком давлении азота ($pd = 0.5\text{--}5.0$ Па·см). Установлено, что на стадии заполнения промежутка плазмой она заряжается до высокого электрического потенциала с образованием «горба», что приводит к выбросу на анод положительных ионов, средняя энергия которых может кратно превышать приложенное к промежутку напряжение, умноженное на элементарный заряд.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на 14 международных конференциях: 28th and 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) (2018, 2020); 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE) (2018); XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT) (2018); 25th Telecommunications forum TELFOR 2017; 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA); 8th Plasma Physics by Laser and Applications Conference (2017); IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (2017); 42nd Conference of the Middle-European Cooperation in Statistical Physics (MECO 42) (2017); The 19th Conference on Plasma and its Applications (2017); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (2016); 66th Yearly Meeting of the Austrian Physical Society (2016); 2015 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS); 26th Symposium on Plasma Physics and Technology (2014).

Работа выполнялась при частичной поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 15-08-03983, 15-58-53031, 17-08-00932, 18-29-24079, 18-52-53003, 19-08-00286, 20-08-00172, в которых соискатель участвовал в качестве исполнителя.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных численных алгоритмов решения математических уравнений; согласием результатов моделирования, полученных разными методами; сравнением авторских результатов с полученными другими авторами; согласием результатов расчетов с экспериментальными данными и согласованностью теоретических тенденций с экспериментами при изменении условий задачи.

Публикации

По результатам исследования опубликовано 26 научных работ. Из них 22 в изданиях, учтенных в наукометрических системах Web of Science и/или Scopus, 23 в изданиях, индексируемых в РИНЦ, 7 в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 139 страниц текста, 88 рисунков, библиографический список их 143 наименования.

Личный вклад

Совместно с научным руководителем профессором д.ф.-м.н. А.В. Козыревым сформулированы задачи, обсуждались и анализировались результаты исследований. Вычислительные алгоритмы для решения кинетических уравнений отрабатывались и корректировались с участием д.ф.-м.н. В. Ю. Кожевникова. Автором лично написаны тексты вычислительных программ, выполнены все компьютерные расчеты, обрабатывались и анализировались полученные данные, готовился материал для научных публикаций, лично написан текст диссертации и сформулированы выводы.

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.

Первая глава представляет собой обзор электрического пробоя газоразрядных промежутков с высоким перенапряжением. Представления особенности пробоя газового промежутка высокого давления с убегающими электронами. Показаны особенности пробоя низкого давления. Кратко даны результаты экспериментальных и теоретических исследований.

Вторая глава посвящена описанию одномерной гибридной модели, которая позволяет отслеживать динамику разряда, а также эволюцию числа и энергий убегающих электронов. Предполагается, что доля электронов с высокой энергией мала и они не влияют на токовую и полевую динамику разряда. Это позволяет описывать поведение компонент низкотемпературной плазмы разряда в дрейфово-диффузионном приближении, а затем, используя известные в каждый момент времени распределения напряженности электрического поля и скорости генерации электронов, решать уравнение Больцмана для функции распределения убегающих электронов по импульсам. Результаты исследований представлены в публикациях [5-8, 10-15]

Работа модели сначала иллюстрируется на примере пробоя азота в плоском промежутке при атмосферном давлении. Были получены временные зависимости тока и напряжения на промежутке. Модель также позволяет проследить как переходной процесс пробоя, так и формирование квазистационарной формы горения разряда. В каждый момент времени вычисляются распределения концентраций заряженных частиц, скорости генерации электронов и напряженности электрического поля. Решение уравнения для функции распределения убегающих электронов дает динамическую картину потока электронов, не рассеянных на атомах или ионах в процессе своего движения. Объяснены причины малой длительности импульса тока высокоэнергетичных электронов на аноде. В целом за импульс, энергия быстрых электронов не превышает величины, соответствующей амплитуде напряжения на промежутке. Однако в некоторые моменты времени на аноде наблюдаются электроны с энергией, превышающей текущую величину напряжения. Эта энергия приобретается электронами в предыдущие моменты времени, когда напряжение было выше.

На примере разряда в коаксиальном промежутке с резко неоднородным полем объяснен механизм набора энергии убегающими электронами до аномальных значений, т.е. энергий, превышающих уровень, соответствующий приложенному напряжению. Показано, что формирование волны ионизации (напряженность электрического поля приведена на Рисунке 1) в разряде с коаксиальной геометрией промежутка позволяет электронам набирать значительную энергию при своем движении к аноду за счет сохранения высокой напряженности электрического поля на фронте волны (функции распределения электронов показаны на Рисунке 1).

Рассмотрено влияние уровня предварительной ионизации газа в разрядном промежутке на параметры потока убегающих электронов. Увеличение времени прохождения волны ионизации при отсутствии предварительной ионизующей подсветки промежутка приводит к увеличению амплитуды и длительности импульса тока убегающих электронов (Рисунок 2 а и б). Также значительно изменяется спектр убегающих электронов (Рисунок 2 в): в режиме без предварительной ионизации основной вклад в ток убегающих электронов вносят электроны средней энергии, которые генерируются перед фронтом ионизации вблизи анода.

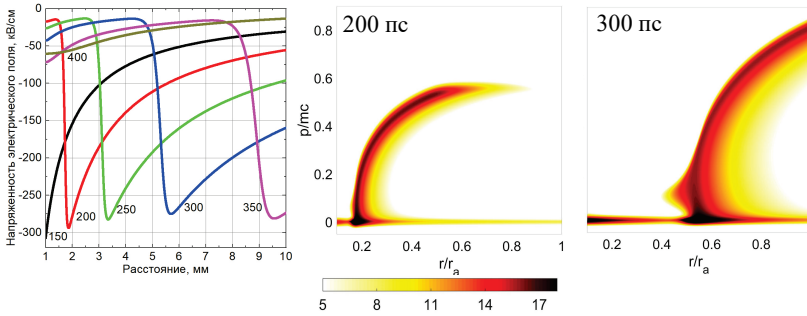


Рисунок 1 – Распределение напряженности электрического поля в разряде и функции распределения электронов в различные моменты времени (время указано в пс). Цвет отражает значение функции в единицах $\lg(n) (M^{-3})$

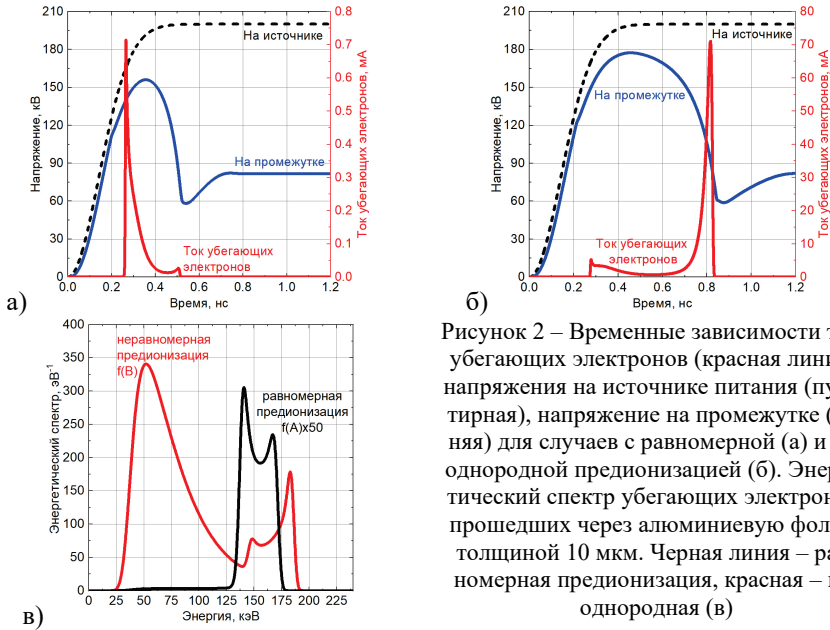


Рисунок 2 – Временные зависимости тока уходящих электронов (красная линия), напряжения на источнике питания (пунктирная), напряжение на промежутке (синяя) для случаев с равномерной (а) и неоднородной предионизацией (б). Энергетический спектр уходящих электронов, прошедших через алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм. Черная линия – равномерная предионизация, красная – неоднородная (в)

На примере трехэлектродной двумерной разрядной системы продемонстрированы возможности использования одномерного кинетического модуля для расчёта временных и энергетических характеристик высокоэнергетической фракции электронов в разряде сравнительно сложной конфигурации. Этот метод может оказаться полезным при расчете реальных электронных приборов (генераторов коротких электронных пучков и рентгеновского излучения), в которых используется явление уходящих электронов.

В третьей главе представлена одномерная кинетическая численная модель, позволяющая описать эволюцию электронной компоненты плазмы газового разряда в широком диапазоне давлений. Особенностью подхода яв-

ляется использование уравнения сохранения полной плотности тока совместно с уравнением Больцмана с модельной столкновительной частью. Модель позволяет рассчитать как динамику тока и напряжения на промежутке, так и кинетические характеристики всего ансамбля электронов (энергетический спектр, временной профиль тока, параметры фракции убегающих электронов) в процессе развития разряда. Результаты исследований представлены в публикациях автора [1, 2, 5, 9]

В рамках представленного подхода рассмотрено влияние на фракцию быстрых (убегающих) электронов крутизны фронта приложенного напряжения, давления рабочего газа, радиуса кривизны катода. Показано, что скорость роста напряжения на разрядном промежутке влияет на число и энергию быстрых электронов: 1) при резком фронте реализуется более высокая амплитуда напряжения, что приводит к кратному росту числа быстрых электронов; 2) высокая скорость движения волны ионизации при более крутом фронте приводит к тому, что электроны дольше находятся в области сильного электрического поля и поэтому набирают энергию, которая может заметно превосходить энергию, соответствующую приложенной разности потенциалов.

Объяснена причина формирования двух максимумов на временном профиле тока убегающих электронов. Первый максимум тока создают убегающие электроны, стартовавшие в области сильного поля в окрестности катода и идущие на анод в режиме непрерывного ускорения. Наличие второго максимума тока связано со всплеском генерации быстрых электронов при приближении фронта волны ионизации к аноду, так как родившимся вблизи анода в области высокого поля электронам легко преодолеть без столкновений оставшееся расстояние. Пучок быстрых электронов может формироваться на разных стадиях разряда.

При понижении давления газа снижается амплитуда импульса напряжения на промежутке (при прочих неизменных условиях), и в пучке убегающих электронов средняя энергия частиц также снижается. Это приводит, в частности, к тому, что при снижении давления азота ниже 100 Тор начинает снижаться ток быстрых электронов, прошедших через выходную фольгу, несмотря на увеличение общего числа убегающих электронов перед ней. При повышении давления газа доля быстрых электронов, сгенерированных вблизи катода, постепенно снижается, и в результате большая группа убегающих электронов формируется при приближении фронта ионизации к аноду. При высоких давлениях, хотя и заметно снижается число убегающих электронов, но их средняя энергия возрастает. Немонотонная зависимость тока быстрых электронов от давления газа хорошо подтверждается в экспериментах.

Моделирование продемонстрировало, что при пробое коаксиального диода с внутренним катодом в виде тонкой нити можно получить меньший по амплитуде, но более высокоэнергетический пучок убегающих электронов, увеличивая радиус катода (уменьшая кривизну) до определенных значений.

Немонотонная зависимость от кривизны кромки катода также наблюдается в экспериментах.

Численное моделирование радиального пробоя коаксиальной линии в поле бегущей волны (схема экспериментальной установки показана на Рисунке 3) показало, что в случае сильно неоднородной геометрии примерно 70% всех убегающих электронов (ток убегающих приведен на Рисунке 4 а) генерируется в прикатодной области за короткий промежуток времени до того момента, когда электрическое поле в этой области экранируется плазмой. (напряженность электрического поля приведена на Рисунке 4 б).

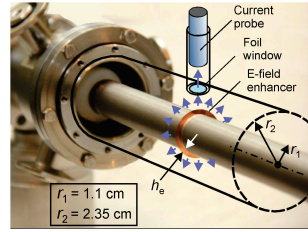


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

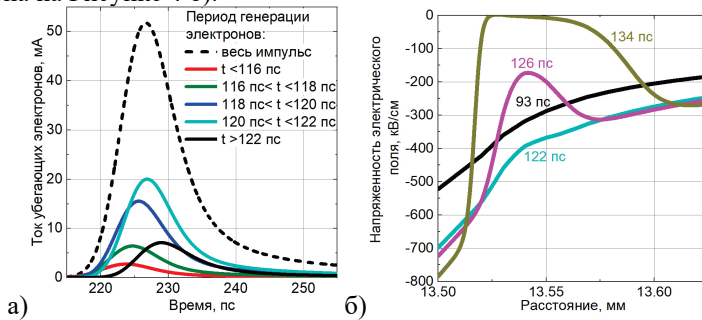


Рисунок 4 – Ток убегающих электронов на аноде (а) для убегающих электронов, генерируемых в различные интервалы времени и распределение напряженности электрического поля у края катода (б).

Однако длительность импульса тока быстрых электронов на аноде в этом случае заметно больше времени вытеснения поля, что обусловлено как разбросом по скоростям электронов, так и пространственным разбросом места их генерации. Максимум энергетического распределения (≈ 80 кэВ) коррелирует с амплитудой волны напряжения (85 кВ), так что в хвосте спектра заметная часть убегающих электронов имеет «аномальную» энергию (выше 85 кэВ). Причина этого «аномального» ускорения – усиление электрического поля перед фронтом волны ионизации из-за вытеснения поля из плазмы. Поэтому убегающие электроны перемещаются из точек рождения к аноду в сопутствующем поле, превышающем «вакуумное поле» (поле в диоде, не искаженное объемными зарядами частиц).

Исследовано влияние эмиссионной способности катода и дискретности тока эмиссии на время запаздывания пробоя и характеристики пучка убегающих электронов. В расчетах показано, что время запаздывания пробоя (начало момента спада напряжения на промежутке) немонотонно зависит от среднего коэффициента усиления однородного поля β на микронеоднородностях поверхности. Минимальное время запаздывания (≈ 330 пс) реализуется при среднем «коэффициенте шероховатости» $\beta \approx 3$ (это среднее значение по

всей поверхности обеспечивает повышение электрического поля в месте появления первого электрона примерно в 45 раз). Более высокая «шероховатость» $\beta > 3$ снижает действующее напряжение на промежутке, а следовательно, и скорость волны ионизации, а более гладкая поверхность с $\beta < 3$ сильно затягивает время появления первого электрона. Зависимости этих параметров представлены на Рисунке 5.

Как эксперименты, так и проведенное моделирование показывают, что для импульсов, длительность которых сравнима с временем пролета убегающих электронов от места рождения до анода, электрическая прочность коаксиальной линии резко возрастает. На Рисунке 6 показано напряжение и ток убегающих электронов для двух импульсов напряжения. II случай соответствует незавершенному пробою. При отсутствии внешних источников ионизации газа масштаб времени, связанный именно с процессами генерации и пролета убегающих электронов, накладывает принципиальное ограничение на время развития пробоя.

Выявлено влияние упругих столкновений на динамику разряда и формирование группы убегающих электронов. Учет рассеивающих столкновений радикально изменяет количество убегающих электронов и их энергетический спектр. Это связано как с изотропизацией функции распределения электронов по скоростям, так и со значительным замедлением волны ионизации при учете рассеивающих столкновений (меньшая скорость заполнения промежутка плазмой позволяет реализовать большее напряжение на промежутке). Пренебрежение упругими столкновениями в расчетной модели приводит к возбуждению в плазменном столбе электростатических колебаний (Рисунок 7), и как следствие, к неадекватным прогнозам как по количеству убегающих электронов, так и по их энергетическому спектру.

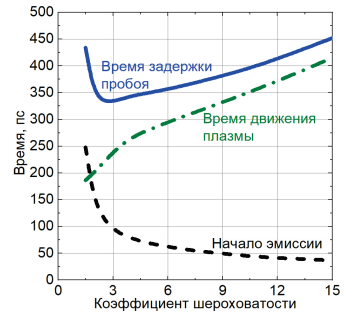
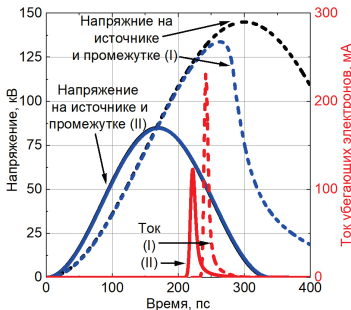


Рисунок 5 — Зависимости основных временных параметров развития пробоя (начало автоэмиссии — черная линия, задержка пробоя — синяя линия, время заполнения промежутка плазмой — зеленая линия) от коэффициента шероховатости катода

Рисунок 6 — Импульсы тока убегающих электронов на фоне осциллограмм напряжения источника (черные линии) и напряжения на промежутке (синие линии); Пунктирные линии соответствуют расчетам для амплитуды импульса 145 кВ и длительности на полувысоте 300 пс, а сплошные линии — для незавершенного пробоя (85 кВ и 170 пс соответственно)

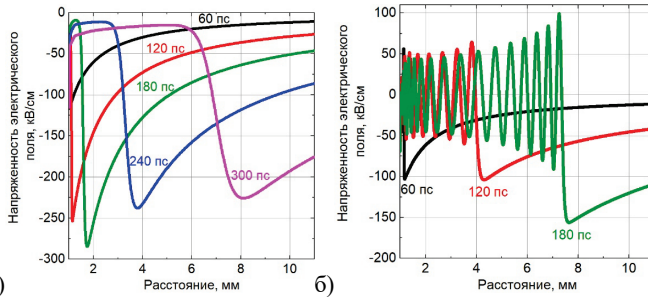


Рисунок 7 – Распределение напряженности электрического поля в промежутке в различные моменты времени. Расчет, учитывающий ионизационные и упругие столкновения (а) и расчет, учитывающего только ионизационные столкновения (б)

В четвертой главе на основе самосогласованного кинетического описания электронов и ионов в нестационарном и неоднородном электрическом поле детально исследован электрополевой механизм генерации анодо-направленного потока быстрых ионов при иницировании разряда в газе низкого давления [3, 4]. Продемонстрировано, что даже в плоском диоде в процессе развития пробоя может формироваться короткая ярко выраженная стадия «горба потенциала» (Рисунок 8), инициирующая ускорение положительных ионов к аноду, средняя энергия которых в несколько раз превышает уровень, соответствующий приложенному к промежутку напряжению. Фазовые портреты в логарифмическом масштабе приведены на Рисунке 9. «Горб» потенциала возникает из-за несбалансированности процессов генерации и ухода заряженных частиц из плазменного столба. Некомпенсированные колебания объемного заряда электронов и ионов, вызванные дисбалансом эмиссии и ухода заряженных частиц на электроды, создают скачки потенциала, амплитуда которых может значительно превышать приложенное напряжение. Кроме того, моделирование показало, что процессы образования «горбов» высоко чувствительны к параметрам задачи (давление, длина зазора, сорт газа, параметры тока инжекции).

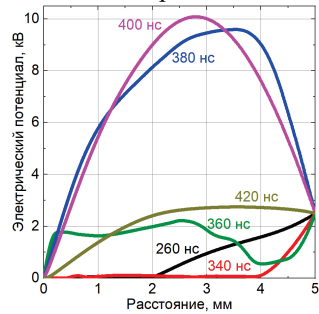


Рисунок 8 – Пространственное распределение электрического потенциала в зазоре. Моменты времени (нс) показаны рядом с кривыми

В заключении диссертации приведены основные выводы работы:

В диссертационной работе построена гибридная модель газового разряда, в рамках которой показано, что в плоском промежутке основное число убегающих электронов генерируются до стадии коммутации промежутка в столбе разряда. На стадии коммутации, когда напряжение в столбе разряда падает, убегающие электроны формируются только в прикатодной

области в узком временном интервале. При этом энергия электронов незначительна.

С использованием названной модели было выполнено сравнительное исследование пробоя промежутка с цилиндрической геометрией. Отмечено, что при больших отношениях радиусов электродов в промежутке распространяется волна ионизации, на фронте которой генерируются убегающие электроны. Таким образом, электроны генерируются во всем промежутке по мере продвижения волны ионизации к аноду. Однако наиболее значимые участки для формирования группы убегающих электронов – это прикатодная область, где электрическое поле усилено из-за кривизны катода, а также прианодная область в момент приближения волны ионизации к аноду, так как плазма вытесняет электрическое поле в эту область и позволяет электронам набрать высокую энергию на малом участке пути. За счет такой “компрессии” электрического поля впереди волны ионизации, и движения электронов в постоянно нарастающем электрическом поле энергия последних может превосходить величину, соответствующую напряжению на промежутке.

Показано, что важную роль при пробое промежутка играет предиионизация. Если не учитывать влияние убегающих электронов на предиионизацию промежутка, то именно характер внешней предиионизации определяет, насколько быстро пробьется промежуток, какое напряжение будет на фронте волны ионизации и, соответственно, каковы число и энергия убегающих электронов.

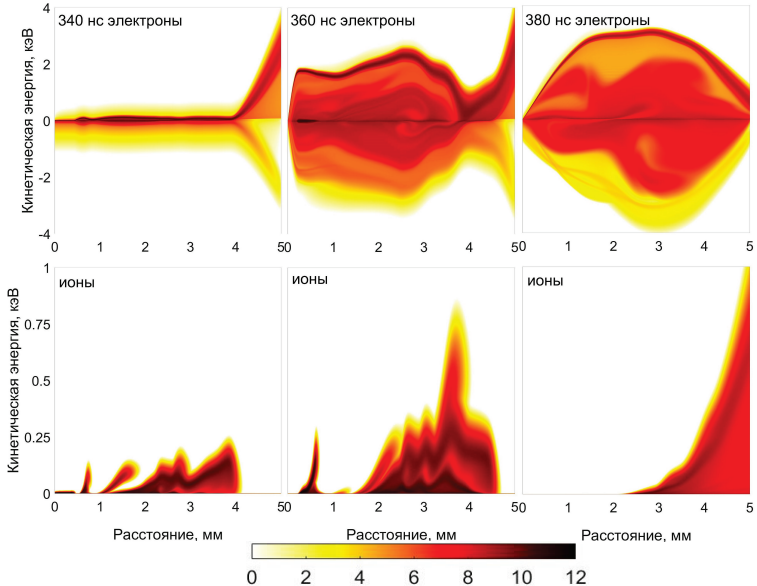


Рисунок 9 – Функции распределения электронов и ионов по энергиям для различных моментов времени. «Отрицательные» энергии – движение электронов к катоду.

Учет предионизации убегающими электронами стал возможен только в полностью кинетической модели разряда, основанной на решении уравнения Больцмана с модельной правой частью. Она позволяет рассчитать как динамику падения напряжения на промежутке в процессе развития разряда, так и основные характеристики ансамбля убегающих электронов (энергетический спектр, временной профиль текущее и общее количество убегающих электронов). Выяснено, что упругие столкновения в разряде, хотя и практически не изменяют энергию электронов, сильно влияют на динамику разряда, замедляя распространение волны ионизации, позволяя реализовать на промежутке большее напряжение, а также максвеллизуют функцию распределения электронов, стабилизируя плазму.

На основе кинетической модели разряда проведено исследование влияния геометрических параметров, давления и фронта напряжения на динамику разряда. Показано, что фронт импульса напряжения играет определяющую роль при генерации убегающих электронов, его укорочение приводит к росту числа электронов на порядки и значительному росту средней энергии убегающих электронов вплоть до “аномальных” энергий.

Объяснена двухпиковая структура тока убегающих электронов: первый максимум формируется электронами, сгенерированными у катода, второй – при приближении волны ионизации к аноду. Исследовано влияние давления на поток убегающих электронов. Показано, что при уменьшении давления число электронов растет, однако их энергия падает и при использовании фольговых фильтров все большая часть электронов не может попасть на коллектор. При увеличении давления число электронов экспоненциально падает до малых величин, уже не регистрируемых приборами.

Выявлено неоднозначное влияние кривизны катода. Так, роль играет не только напряженность электрического у катода, от которой во многом зависит число убегающих электронов, но и напряжение, реализуемое на промежутке, которое в определенной области обратно пропорционально кривизне катода и влияет на энергию электронов. Существует оптимум, при котором можно получить максимальное число электронов с максимально возможной энергией.

На основе самосогласованного кинетического описания электронов и ионов в нестационарном и неоднородном электрическом поле детально исследован электрополевой механизм генерации анодонаправленного потока быстрых ионов при инициировании разряда в газе низкого давления. Продемонстрировано, что даже в плоском диоде в процессе развития пробоя может формироваться короткая ярко выраженная стадия «горба потенциала», иницирующая ускорение положительных ионов к аноду, средняя энергия которых в несколько раз превышает приложенное к промежутку напряжение.

Статьи автора по теме диссертации

1. Mesyats, G. A. How short is the runaway electron flow in an air electrode gap? / G. A. Mesyats, M. I. Yalandin, **N. S. Semeniuk** et al. // Applied Physics Letters. – 2020. – Vol. 116. – No. 6. – Art. Number 063501. (DOI: 10.1063/1.5143486)
2. Zubarev, N. M. Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line / N. M. Zubarev, V. Y. Kozhevnikov, **N. S. Semeniuk**, et al. // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – No. 12. – Art. Number 125008. (DOI: 10.1088/1361-6595/abc414)
3. Kozyrev, A. Kinetic theory of high-voltage low-pressure gas discharge with electron initiation on a cathode in a planar gap / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, and **N. Semeniuk** // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – No. 12. – Art. Number 125023. (DOI: 10.1088/1361-6595/abbf95)
4. Козырев, А. В. Кинетическая модель формирования объемного разряда на левой ветви кривой Пашена с катодным инициированием пробоя / А. В. Козырев, Ю. Д. Королев, **Н. С. Семенюк** // Известия РАН. Серия Физическая. – 2019. – том 83. – № 11. – С. 1505–1508.
Есть перевод: Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. – Vol. 83. – No. 11. – P. 1369-1372. (DOI: 10.3103/s1062873819110157)
5. 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.
Есть перевод: Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61. – No. 4. – P. 603-610. (DOI: 10.1007/s11182-018-1439-x)
6. 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.
Есть перевод: Technical Physics Letters. – 2017. – Vol. 43. – No. 9. – P. 804–807. (DOI: 10.1134/S106378501709005X)
7. Tarasenko, V. F. Review of supershort avalanche electron beam during nanosecond-pulse discharges in some gases / V. F. Tarasenko, C. Zhang, **N. S. Semeniuk** et al. // Matter and Radiation at Extremes. – 2017. – Vol. 2. – No. 3. – P. 105–116. (DOI:10.1016/j.mre.2016.10.004)
8. Tarasenko, V. F. Influence of electrode spacing and gas pressure on parameters of a runaway electron beam generating during the nanosecond breakdown in SF₆ and nitrogen / V. F. Tarasenko, C. Zhang, **N. S. Semeniuk** et al. // High Voltage. – 2017. – Vol. 2. – No. 2. – P. 49–55. (DOI: 10.1049/hve.2017.0014)

9. 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.

Есть перевод: Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 60. – No. 8. – P. 1425–1436. (DOI: 10.1007/s11182-017-1232-2)

10. Kozyrev, A. Theoretical simulation of the picosecond runaway-electron beam in coaxial diode filled with SF6 at atmospheric pressure / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, **N. Semeniuk** et al. // EPL (Europhysics Letters). – 2016. – Vol. 114. – No. 4. – Art. Number 45001. (DOI: 10.1209/0295-5075/114/45001)

11. Kozyrev, A. V. Theoretical simulation of high-voltage discharge with runaway electrons in sulfur hexafluoride at atmospheric pressure / A. V. Kozyrev, V. Y. Kozhevnikov, **N. S. Semeniuk** // Matter and Radiation at Extremes. – 2016. – Vol. 1. – No. 5. – P. 264–268. (DOI: 10.1016/j.mre.2016.10.001)

12. 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.

Есть перевод: Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 59. – No. 12. – P. 1981–1988. (DOI: 10.1007/s11182-017-1004-z)

13. Kozyrev, V. A. Zero-Dimensional Theoretical Model of Subnanosecond High-Pressure Gas Discharge / V. A. Kozyrev, V. Y. Kozhevnikov, **N. S. Semeniuk** // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – Vol. 43. – No. 12. – P. 4077–4080. (DOI: 10.1109/tps.2015.2496218)

14. Kozhevnikov, V. Y. 1D simulation of runaway electrons generation in pulsed high-pressure gas discharge / V. Y. Kozhevnikov, A. V. Kozyrev, **N. S. Semeniuk** // EPL (Europhysics Letters). – 2015. – Vol. 112. – No. 1. – Art. Number 15001. (DOI: 10.1209/0295-5075/112/15001)

Монография:

15. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. Глава 12 / Под редакцией В. Ф. Тарасенко. – Томск: STT, 2015. – 568 с.

Зарубежное издание: Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases. Volume 2: Processes and Applications. Chapter 3 / Edited by Victor F. Tarasenko. – USA, NY: Nova Science Publishers, 2016. – 331 p.