

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и международной деятельности
Иркутского государственного университета,



проф. К.В. Григоричев

« 19 » апреля 2022 г.

**ОТЗЫВ
ведущей организации**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет»
на диссертацию Семенюк Натальи Степановны
на тему «НЕСТАЦИОНАРНАЯ КИНЕТИКА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРОБОЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ»
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы

Высоковольтные разряды в газах атмосферного давления в течение ряда десятилетий привлекают внимание исследователей. Это обусловлено, с одной стороны, богатством физических явлений, протекающих в этих разрядах, а с другой - широким спектром их применения для научных исследований и различных приложений. Достаточно упомянуть мощные импульсные источники УФ излучения на основе таких разрядов, используемые для накачки газовых лазеров, скоростной спектроскопии, в медицинских целях и т.д. При этом целый ряд важных физических аспектов протекающих в них явлений, остаются предметом внимания научных коллективов в России и за рубежом.

Согласно современным представлениям, основную роль в инициации высоковольтного разряда в газе атмосферного давления играют так называемые убегающие электроны, которые приобретают в электрическом поле межэлектродного промежутка на длине свободного пробега энергию направленного движения большую, чем ту, которую они расходуют при столкновениях. В результате эти электроны переходят в режим непрерывного ускорения и эффективно ионизируют окружающую газовую среду.

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию процесса инициации высоковольтного импульсного разряда в газе, многие важные аспекты этого процесса остаются недостаточно изученными. Это связано, как с большими экспериментальными сложностями при регистрации субнаносекундных сигналов в широком динамическом диапазоне, так и ограниченными возможностями моделирования этих процессов. В частности, пучки убегающих электронов, как правило, имеют сложный многокомпонентный энергетический спектр, что требует использования кинетического подхода. Кроме того, весьма ограничена экспериментальная информация, а также данные модельных расчетов для ионной компоненты разрядной плазмы. Таким образом, представленный в данной работе круг задач, решаемых именно с помощью кинетического подхода, выглядит весьма актуальным.

Оценка содержания работы и её завершённости

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

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной 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 исследований электрического пробоя газоразрядных промежутков с высоким перенапряжением. Представлены 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. Работа модели сначала иллюстрируется на примере пробоя азота в плоском промежутке при атмосферном давлении. Получены временные зависимости тока и напряжения на промежутке. Модель также позволяет проследить как переходной процесс пробоя, так и формирование квазистационарной формы горения разряда. Объяснены причины малой длительности импульса тока высокоэнергичных 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.

Третья глава занимает центральное место в диссертационной работе. В ней представлена одномерная кинетическая численная модель, позволяющая описать эволюцию электронной компоненты плазмы газового разряда в широком диапазоне давлений. 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. 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.

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, генерированных 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.

Исследовано также влияние микронеоднородностей («шероховатости») на поверхности 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 реализуется при среднем «коэффициенте шероховатости» $\beta \approx 3$. Более высокая «шероховатость» $\beta > 3$ снижает действующее напряжение на промежутке, а следовательно, и скорость волны ионизации, а более сглаженная поверхность с $\beta < 3$ сильно затягивает время появления первого электрона.

В четвертой главе на основе самосогласованного кинетического описания электронов и ионов в нестационарном и неоднородном электрическом поле детально исследован полевой механизм генерации направленного к аноду 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», инициирующая ускорение положительных ионов к аноду, аномальной энергии которая в несколько раз превышает уровень, соответствующий приложенному к промежутку напряжению. «Горб» потенциала возникает из-за несбалансированности процессов генерации и ухода заряженных частиц из плазменного столба, при этом процессы образования «горбов» определяются параметрами задачи (давлением, длиной зазора, сортом газа).

В заключении диссертации приведены основные выводы работы: Можно заключить, что диссертация выстроена логически, материал изложен последовательно, а работа в целом соответствует специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

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

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

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

2. Показано, 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.

3. Рассмотрено влияния на фракцию быстрых (убегающих) электронов крутизны фронта приложенного напряжения, давления рабочего газа, радиуса кривизны катода. 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. Это происходит вследствие того, что 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.

4. 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.

Данные положения изложены в опубликованных автором работах и докладах на научных конференциях, симпозиумах и конгрессах, Работы Н.С. Семенюк известны в научном сообществе, занимающемся теоретическими и экспериментальными исследованиями явления убегания электронов в плотных газах. По теме диссертации 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, а также представлен 31 доклад на международных конференциях. Следует подчеркнуть высокий уровень публикаций: 4 работы опубликованы в журналах первого квартала.

Научная 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 различных параметрах задачи, в частности давления и сорта газа, геометрии промежутка, условия предварительной ионизации, эмиссионная способность катода и т.п. Эти расчеты дают теоретически обоснованные ответы на многие вопросы, возникающие при практическом использовании 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 и др.). Следует отметить также, что проведенные исследования вносят существенный вклад в понимание условий и параметров эмиссии импульсным разрядом в газе так называемых аномально ускоренных электронов, энергия которых превосходит напряжение на разрядном промежутке, а их происхождение и параметры в течение ряда лет являются предметом научных дискуссий.

Важное прикладное значение имеют также расчеты временных и энергетических характеристик высокоэнергичной фракции электронов в разряде сравнительно сложной конфигурации: трехэлектродной двумерной разрядной системы. Этот метод может оказаться полезным при расчете реальных электронных приборов (генераторов коротких

электронных пучков и рентгеновского излучения), в которых используется явление убегающих электронов.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты, полученные в диссертационной работе Н.С. Семенюк можно рекомендовать к использованию в организациях, занимающихся моделированием быстропротекающих физических процессов взаимодействия электрических полей с заряженными частицами в газах и вакууме. Этими организациями являются Институт электрофизики УрО РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Институт лазерной физики СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Критические замечания:

1. Общие замечания по работе.

1.1. Основным недостатком диссертации является очень слабо представленное сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными, в частности, отсутствие сравнения модельных и экспериментальных спектров убегающих электронов. Это тем более удивительно, что в ИСЭ СО РАН много лет вопросами, рассмотренными в диссертации, успешно занимается одна из ведущих в мире экспериментальных групп.

1.2. Большинство расчетов в работе проведены при фиксированных или одном меняющемся параметре разряда, например, напряжении или длительности фронта импульса, причем выбор используемой величины этого параметра никак не обоснован. Это не позволяет оценить, насколько полученные выводы распространяются на другие диапазоны параметров.

1.3. При изложении полученных результатов автор иногда ограничивается описанием изображенных на рисунках зависимостей, не приводя физического обоснования наблюдаемых эффектов. Например, хотелось бы узнать механизм значительного сдвига со временем в сторону больших энергий спектра на рис.2.10, такого же сдвига спектра на рис.2.22, где большинство электронов имеют аномально большие энергии вопреки известным экспериментальным результатам.

2. Конкретные замечания

2.1. На рис.2.20 приведены изображения плазменной струи, где концентрация плазмы не превышает $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В то же время, известные эксперименты группы Я. Красика из Техниона показали, что в аналогичных экспериментальных условиях концентрация лежит в диапазоне $> 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Каковы причины этого расхождения?

2.2. Следует пояснить, почему на рис.3.2б фронт импульса составляет менее 300 пс, а в подписи к рисунку указана длительность фронта 3 нс.

2.3. Каковы причины снижения энергии убегающих электронов при больших радиусах катода, наблюдаемого на рис.3.19б, при том, что напряжение на разряде остается таким же?

2.4. Вывод автора о возможности распространения предложенного подхода на описание явления аномального ускорения ионов в вакуумной дуге представляется преждевременным, например, в силу указанного сферического характера распространения катодной струи, что качественно меняет картину движения плазмы, внося переход в сверхзвуковой режим движения.

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

Считаю также весьма перспективным использовать развитый в диссертации кинетический подход для описания движения токнесущей плазменной струи в вакууме

Заключение

Исследования, изложенные в диссертации, проведены на высоком научном уровне и свидетельствуют о высокой квалификации автора. Диссертация Семенюк Натальи Степановны является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи описания начальной стадии высоковольтного пробоя газоразрядных промежутков, имеющей важное значение для широкого круга проблем вакуумной и плазменной электроники, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв составлен заведующим кафедрой общей и космической физики Иркутского государственного университета, доктором физ.-мат.наук, профессором

В.Л. Паперным

Виктор Львович Паперный, д. ф.-м.н., профессор

Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 267/2, кв. 42

Телефон: 89149333884

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет»

Должность: заведующий кафедрой

Адрес электронной почты: paperny@math.isu.runnet.ru

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры общей и космической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет»
протокол № 8 от « 16 » апреля 2022 г.

Заведующий кафедрой  В.Л. Паперный

*Отзыв в д.ф.м.н., профессора Паперного В.Л.
заверено: Уполномоченный секретарь ФГБОУ ВО «ИГУ»*



В. Г. Кузнецова