

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П. Н. Лебедева

Российской академии наук

На правах рукописи

Родионов Андрей Александрович

**ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МЕГАВОЛЬТНОМ
АТМОСФЕРНОМ РАЗРЯДЕ**

Специальность 1.3.6 – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
Огинов Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Василяк Леонид Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории №2.3. - плазмы отдела №2. - электрофизических и плазменных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Лоза Олег Тимофеевич, доктор физико-математических наук, профессор, научный сотрудник АО НТЦ "Плазмаиофан"

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"» (г. Москва)

Защита состоится «18» марта 2024 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан « __ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.01
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

I. Общая характеристика работы

Работа посвящена изучению энергетических, временных и пространственных характеристик рентгеновского излучения, испускаемого в процессе мегавольтного атмосферного разряда в лабораторных условиях.

Актуальность темы исследования

Физические механизмы газового разряда в атмосферном воздухе, возникающего при пробое достаточно длинных (несколько десятков сантиметров и более) разрядных промежутков в настоящее время активно изучаются. Эти исследования представляют значительный интерес с точки зрения фундаментальных исследований, поскольку, с одной стороны, механизмы разрядов этого типа в настоящее время малоизвестны, с другой – по тому, что эти разряды являются перспективной моделью для изучения многих малоизученных процессов в натуральных молниях. Одновременно с этим изучение механизмов таких разрядов требуется для разработки молниезащитных систем, создания новых ускорительных устройств, приборов для генерации рентгеновского излучения и др.

Важнейшим элементом механизма мегавольтного атмосферного разряда является испускание рентгеновского излучения. Наиболее очевидным механизмом его генерации является тормозное излучение быстрых электронов, которые возникают в разрядном промежутке при приложении напряжения амплитудой до ~ 1 МВ. С точки зрения диагностики механизмов разряда тормозное излучение обладает двумя важнейшими преимуществами. Во-первых, его максимальная энергия равна максимальной начальной энергии испускающих его электронов, а угловой растрор прямо связан с их энергией, что позволяет по энергии квантов и распределению интенсивности тормозного излучения по углу оценить энергию испускающих его электронов. Во-вторых, характерные

времена испускания тормозного излучения составляют по порядку период колебаний волны рентгеновского излучения и чрезвычайно малы, что обеспечивает высокое временное разрешение таких измерений.

Вполне возможно, что помимо тормозного излучения, в генерации рентгеновского излучения участвуют и другие процессы, в частности те, о которых в настоящий момент ничего неизвестно. Так как тормозное излучение электронов с энергией в сотни кэВ обладает угловой анизотропией, для определения его роли в механизме испускания рентгеновского излучения атмосферного лабораторного мегавольтового разряда необходимо исследовать зависимость интенсивности этого излучения от угла по отношению к оси разряда. Вероятность генерации тормозного излучения в аноде превышает таковую в газовом промежутке на ~ 4 порядка. В соответствии с такими представлениями тормозное излучение должно испускаться из прианодной области. Таким образом, для определения вклада тормозного излучения в рентгеновское излучение разряда, а также для поиска новых механизмов его генерации, необходимо измерить и сопоставить между собой распределение интенсивностей рентгеновского излучения из различных областей разряда (прианодной, прикатодной и межэлектродной). До настоящего момента таких исследований не проводилось.

Цель работы и задачи исследований

Целью настоящей работы является установление энергетических характеристик и местоположения источников рентгеновского излучения в лабораторном атмосферном разряде метрового пространственного масштаба при приложенном напряжении на уровне 1 МВ. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать комплекс сцинтилляционной диагностики с использованием свинцовых коллиматоров, сцинтилляционных детекторов

и фильтров ступенчатого ослабления, позволяющий измерять угловое, пространственное и временное распределения интенсивности рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного разряда с возможностью оценки энергии испускаемых квантов.

2. Исследовать угловое (по отношению к оси разряда) распределение интенсивности рентгеновского излучения лабораторного атмосферного разряда.

3. Определить зависимости интенсивности рентгеновского излучения от координаты вдоль оси разряда и оценить характерные энергии квантов излучения.

4. Определить связь энергетических и пространственных параметров источников излучения с зависимостями электрофизических параметров разряда от времени.

Научная новизна работы

1. Впервые, с угловым разрешением 10° , исследованы анизотропные свойства рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного лабораторного разряда, а также их связь с его энергетическими характеристиками. Установлено, что рентгеновское излучение обладает многолепестковой диаграммой направленности. Обнаружено рентгеновское излучение двух типов – с широким (40° - 150°) и узким (10°) угловым раствором. Излучение с широким угловым раствором характеризуется энергией квантов менее 300 кэВ, с узким – более 300 кэВ.

2. Впервые, с пространственным разрешением 12 см, измерено распределение интенсивности рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного лабораторного разряда, испускаемое из различных областей разряда – прианодной, прикатодной и межэлектродной. Установлено, что наиболее интенсивное рентгеновское излучение испускается из области

анода в момент, когда приложенное к разрядному промежутку напряжение достигает максимума. Зарегистрированные характеристики излучения из прианодной области подтверждают его тормозную природу.

3. Впервые обнаружен источник рентгеновского излучения, расположенный в прикатодной области. Интенсивность этого излучения превышает таковую для рентгеновского излучения из газового промежутка. Испускание излучения из области катода начинается на ~ 140 нс позже начала испускания излучения из области анода. Механизм излучения пока неизвестен и требует дополнительных исследований.

Научная и практическая значимость работы

Состоит в том, что в рамках проведенных исследований впервые определены пространственно-временные характеристики рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного лабораторного разряда. На основе этих данных возможно определение параметров электронов в разряде – их энергий, направления движения, а также временной эволюции этих параметров на различных стадиях разряда.

Значимый с точки зрения науки результат состоит также в обнаружении нового источника рентгеновского излучения, локализованного в области катода. Интенсивность излучения, испускаемого этим источником, превышает таковую для рентгеновского излучения из области анода. Источник рентгеновского излучения возникает уже после достижения приложенным напряжением своего максимального значения и наблюдается в момент спада напряжения. Выяснение причин возникновения этого излучения представляет собой важную и актуальную задачу для дальнейших исследований.

Методы исследований.

При исследовании пространственных параметров рентгеновского излучения применялся метод времяразрешенного многоканального

сцинтилляционного детектирования. Измерения энергетических характеристик рентгеновского излучения производились с помощью фильтров ступенчатого ослабления.

Положения, выносимые на защиту

1. Рентгеновское излучение атмосферного разряда с межэлектродным расстоянием порядка 1 м при максимальном приложенном напряжении ~ 1 МВ и временем его нарастания ~ 200 нс обладает наибольшей интенсивностью в конфигурации электродов «обратно-конический катод с остриём – сетчатый анод».
2. Генерируемое рентгеновское излучение является анизотропным и содержит две составляющие - мягкую с энергией квантов $\hbar\omega \lesssim 300$ кэВ, распространяющуюся в угловом растворе от 40° до 150° в плоскости, параллельной оси разряда, и жесткую с энергией квантов $\hbar\omega \gtrsim 300$ кэВ, распространяющуюся в угловом растворе 10° или менее в той же плоскости.
3. Наиболее интенсивное рентгеновское излучение испускается из прианодной области в момент достижения приложенным напряжением максимального значения, причем максимумы интенсивности импульсов возникают одновременно с точностью ~ 10 нс с экстремумами временной зависимости производной напряжения dU/dt на разрядном промежутке от времени.
4. Рентгеновское излучение мегавольтного атмосферного лабораторного разряда из прикатодной области состоит, главным образом, из квантов с энергией $\hbar\omega > 100$ кэВ и возникает во время спада напряжения на разрядном промежутке через ~ 140 нс после начала излучения из прианодной области.
5. Появление максимумов интенсивности рентгеновского излучения из прианодной области, возникающих одновременно со сверхвысокочастотными осцилляциями тока длительностью не более ~ 1 нс,

совпадает с экстремумами зависимости производной напряжения dU/dt на разрядном промежутке от времени. Один экстремум зависимости производной напряжения от времени соответствует серии импульсов рентгеновского излучения.

Личный вклад автора

Результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке диагностик и обсуждении полученных результатов. Сборка и наладка экспериментальной установки, все измерения и обработка полученных данных в диссертационной работе выполнены лично автором.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждена многократным их воспроизведением во многих экспериментах с использованием современного оборудования и современных методов статистической обработки результатов измерений.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: XLII, XLIV, XLV и XLVI Международных звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия (2015, 2017, 2018 и 2019 г.), XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Kabardino-Balkarian State University, Elbrus, Russia, 2015, the Fifth MIPT – UEC – LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics, Moscow, 2018, II юбилейной всероссийской конференции «Импульсная сильноточная вакуумная и полупроводниковая электроника ИСВПЭ-2016» (2016 г., Москва, Россия), на конференции ИСВПЭ-2017

(2017 г., Москва, Россия), Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике БПИО-2019, БПИО-2020, БПИО-2021 и БПИО-2022, г. Москва, Россия (2019, 2020, 2021 и 2022 г.).

Основные результаты работы опубликованы в шести рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и базу данных *Web of Science*, в двух главах в коллективных монографиях и в тринадцати трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 17-22.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-79-30086 «*Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике*».

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и Заключения. Объём диссертации включает 144 стр., включая 58 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 50 наименований и 1 приложение.

II. Основное содержание работы

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе приведен обзор литературы по основным механизмам пробоя различных газовых промежутков: таунсендовскому, стримерному, пробоем на убегающих электронах и пробоем в наносекундном диффузно-канальном режиме. Описаны результаты современных работ по исследованию физических механизмов пробоя длинных (от десятков сантиметров и более) атмосферных промежутков. Приведены результаты

различных научных групп, посвященные изучению параметров и механизмов испускания рентгеновского излучения в атмосферных лабораторных разрядах при пробое длинных промежутков, а также связи этих параметров с электрофизическими характеристиками разряда – зависимостью силы тока и приложенного напряжения от времени. В заключении к главе сформулирована цель работы и поставлены решаемые в ней задачи.

Во второй главе описаны техника и методики экспериментов, использованные в работе. Дано подробное описание использованного генератора импульсного напряжения – установки ЭРГ. Разряд исследовался на воздухе при атмосферном давлении. Длина разрядного промежутка составляла 60,5 см, максимальное приложенное напряжение – 1,2 МВ, время нарастания напряжения с уровня 10% до уровня 90% – 220 нс. Описана конфигурация электродов: анод использовался в виде сетки из

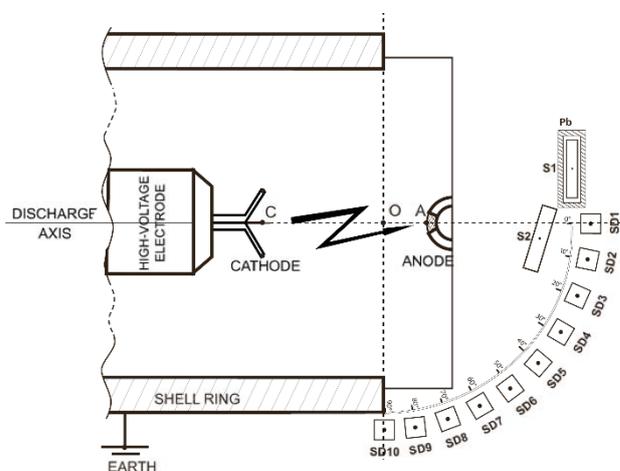


Рис. 1. Схема расположения детекторов для измерения характеристик угловой анизотропии рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного лабораторного разряда в горизонтальной проекции установки.

нержавеющей стали, катод – в виде острия, помещенного внутрь конуса с гладким ободком. Описаны основные электрофизические диагностики, используемые в работе. Отдельно описана конструкция сцинтилляционных детекторов на основе ФЭУ-30, сопряженных через оптический контакт с пластиковыми сцинтилляторами полистирол: *p*-терфенил + РОРОР. Временное разрешение измерительной системы – 3 нс.

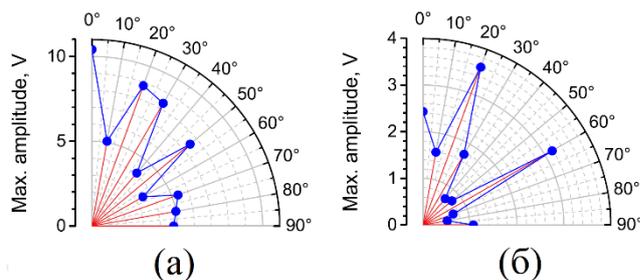


Рис. 2. Зависимости интенсивности рентгеновского излучения от угла по отношению к оси разряда для двух импульсов рентгеновского излучения, возникших в одном разряде, при исследовании излучения, интегрального по энергиям фотонов с энергии 20 кэВ и выше.

Третья глава посвящена исследованиям анизотропии рентгеновского излучения в мегавольтном атмосферном разряде. Для исследования распределения интенсивности рентгеновского излучения по направлениям по отношению к оси разряда 10 сцинтилляционных детекторов были расположены на дуге радиусом 1 м, как это изображено на Рис. 1. Детекторы были расположены через каждые 10° . Диаметр каждого детектора был равен 10,9 см, а диаметр сцинтиллятора был равен 9,1 см.

На рис. 2 приведены характерные картины зависимости интенсивности рентгеновского излучения от угла по отношению к оси разряда, соответствующие излучению с энергиями фотонов 20 кэВ и выше. Кривые соответствуют двум последовательным импульсам рентгеновского излучения, возникшим в одном разряде. Индикатриса (а) соответствует более раннему импульсу, а индикатриса (б) – более позднему, который был зарегистрирован через ~ 100 нс после первого. Видно, что картины различны, однако обе соответствуют излучению с многолепестковыми (обладающими несколькими максимумами на разных углах) диаграммами направленности.

Установлено, что индикатрисы интенсивности рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного лабораторного разряда стохастичны и различны от импульса к импульсу. Однако все они обладают угловой анизотропией. В общем, индикатрисы рентгеновского излучения

обладают многолепестковой диаграммой направленности. Установлено, что рентгеновское излучение существует двух типов: с широким (40° - 150°) и узким ($\sim 10^\circ$) угловым раствором. В одном импульсе наблюдаются как только узкие, так и только широкие индикатрисы, так и их наложение. Узкие диаграммы направленности соответствуют излучению с энергией более 300 кэВ, широкие – менее 300 кэВ.

Полученные результаты согласуются с представлением о том, что наблюдаемое излучение испускается при торможении быстрых электронов. Также наличие двух типов индикатрис свидетельствует о существовании двух различных источников рентгеновского излучения. Проверка этого факта выполнена в следующей главе.

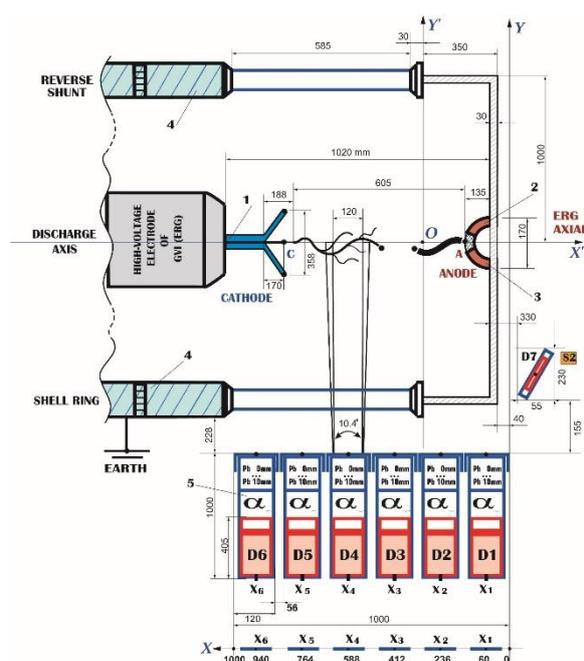


Рис. 3. Схема эксперимента по измерениям параметров рентгеновского излучения с пространственным разрешением: 1 - катод; 2 - анод; 3 - анодный шунт; 4 - шунт обратного токопровода; 5 - коллимированный детектор.

Четвёртая глава посвящена исследованию параметров рентгеновского излучения с пространственным разрешением вдоль оси разряда. Различные по природе источники могут испускать излучение из разных областей разряда. Следовательно, сопоставление интенсивности рентгеновского излучения, испускаемого различными пространственными участками разряда, позволит выявить такие особенности. С другой

стороны, соответствующие измерения позволят выявить вклад тормозного излучения в общее наблюдаемое рентгеновское излучение. Действительно, вероятность генерации тормозного излучения из области анода, выполненного из нержавеющей стали, на ~ 4 порядка выше, чем из воздушного промежутка.

Схема эксперимента приведена на Рис. 3. Шесть сцинтилляционных детекторов были помещены в свинцовые трубы-коллиматоры, каждая из которых выделяла свой участок разрядной области длиной 12 см, препятствуя попаданию на детекторы излучения из других областей. Установка свинцовых фильтров ступенчатого ослабления толщинами 3, 5, 7 и 10 мм позволяла оценивать спектральный состав излучения, испускаемого из каждого участка разряда.

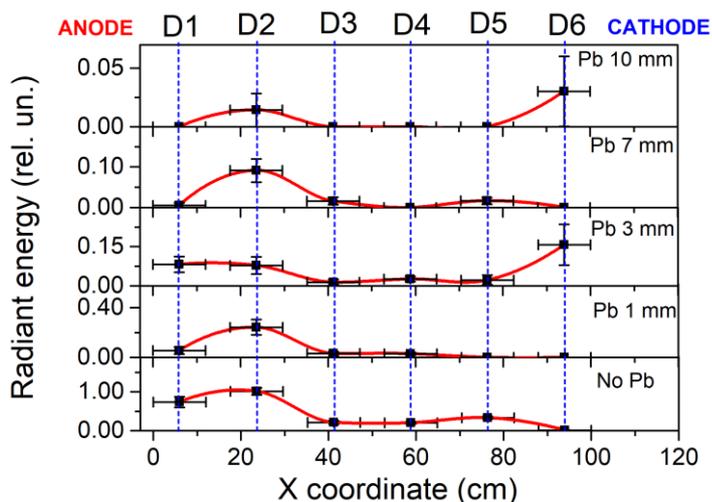


Рис. 4. Распределение энергии рентгеновского излучения, испущенного в течение периода 50-350 нс, по координате вдоль оси разряда для всех типов свинцовых фильтров

На Рис. 4 приведено измеренное в работе распределение энергии излучения, равной интегралу по времени от интенсивности рентгеновского излучения, испускаемого в промежутке 50-350 нс, когда приложенное к

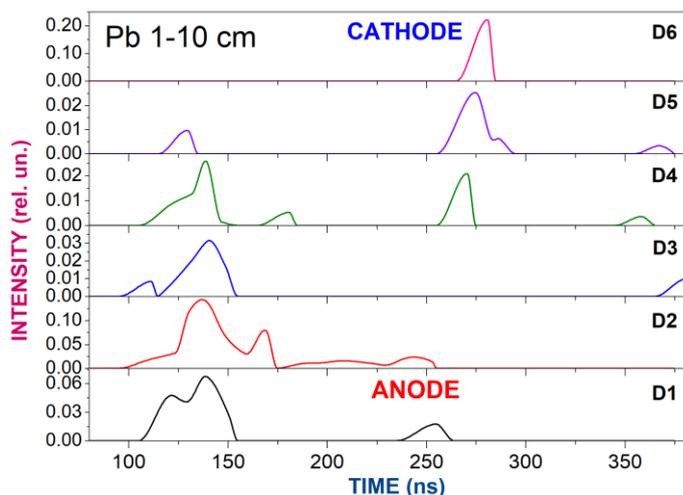


Рис. 5. Зависимости интенсивности рентгеновского излучения от времени в период 95-420 нс, полученные суммированием кривых, полученных для всех свинцовых ослабителей.

промежутку напряжение достигает максимального значения, по координате вдоль оси разряда при использовании различных фильтров ступенчатого ослабления. Из Рис. 4 видно, что наиболее интенсивное излучение наблюдается из прианодной области. Одновременно с этим впервые обнаружено, что в разряде существует источник рентгеновского излучения, расположенный в области катода. Установлено, что интенсивность излучения из прикатодной области ниже, чем из прианодной, но выше, чем из области межэлектродного промежутка. Таким образом, в работе подтверждено существование как минимум двух источников рентгеновского излучения. Важным свойством излучения из прикатодной области является тот факт, что излучаются оттуда в основном достаточно жесткие кванты с энергией более ~ 100 кэВ, а вероятность регистрации более мягких квантов достаточно мала.

В пятой главе исследуются временные параметры рентгеновского излучения, испускаемого из разных пространственных областей разряда. Схема экспериментальной установки полностью повторяет схему в предыдущей главе (Рис. 3). Измерения проведены с временным разрешением на уровне 3 нс. Впервые установлено, что излучение из областей катода и анода испускается в разные моменты времени.

В качестве примера приведен Рис. 5. Так как статистика событий, соответствующих высоким энергиям квантов, испущенных из области катода, получилась небольшой, не смотря на общее число изученных разрядов, равное 200-300 для каждой системы фильтров, для качественных оценок мы сложили зависимости интенсивности рентгеновского излучения от времени, измеренные с использованием всех фильтров. Такое преобразование искажает значения интенсивности, но не искажает момента возникновения импульса. Из Рис. 5 видно, что из области катода излучение испускается через ~ 140 нс после прекращения излучения из прианодной области.

Излучение, испускаемое из прианодной области, по всем установленным в работе признакам может быть связано с тормозным излучением быстрых электронов. Обнаруженное в настоящей работе впервые излучение из прикатодной области имеет однозначно иное происхождение, неизвестное в настоящее время, и его определение представляет собой интересную задачу для дальнейших исследований.

Основные результаты работы

1. Для исследования и моделирования процессов генерации рентгеновского излучения в сильноточных протяженных атмосферных разрядах создан специализированный экспериментальный стенд. Для разрядной части установки выбрана конфигурация электродов «обратно-конический катод с остриём – сетчатый анод» с межэлектродным расстоянием ~ 1 м. Такая форма катода позволяет максимально стабилизировать параметры разряда, что дает возможность исследовать пространственные свойства излучения разряда с наибольшей точностью. Вместе с этим экспериментально установлено, что выбранная конфигурация электродов позволила получить рентгеновское излучение с наибольшей интенсивностью по сравнению с иными конфигурациями.

Максимальное приложенное напряжение составляло -1,2 МВ, время его нарастания ~200 нс. Регистрирующая часть установки позволяет проводить исследования временных, энергетических и пространственных характеристик рентгеновского излучения мегавольтных атмосферных разрядов. Она основана на системе сцинтилляционных детекторов, защищенных от воздействия сильных электромагнитных помех, и обладает временным разрешением ~3 нс. Система детекторов позволяет измерять распределение интенсивности рентгеновского излучения разряда с угловым разрешением 10° и пространственным - 12 см.

2. С использованием свинцовых и алюминиевых фильтров ступенчатого ослабления впервые измерены угловые (по отношению к оси разряда) зависимости интенсивности рентгеновского излучения мегавольтного атмосферного разряда. Установлено, что рентгеновское излучение обладает угловой анизотропией со стохастическим распределением интенсивности. В общем случае оно характеризуется многолепестковой диаграммой направленности, состоящей из излучения с узким ($\Delta\theta \leq 10^\circ$) и широким ($\Delta\theta > 40^\circ$) угловым раствором. Излучение с широкой диаграммой направленности характеризуется энергией квантов менее 300 кэВ, а узкой – более 300 кэВ.

3. Измерено пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения вдоль оси разряда. Установлено, что наиболее интенсивное рентгеновское излучение испускается из прианодной области, когда приложенное напряжение достигает максимума. Интенсивность рентгеновского излучения из области газового промежутка в 5-8 раз меньше. Впервые обнаружено испускание рентгеновского излучения из прикатодной области, интенсивность которого превышает интенсивность излучения из газового промежутка.

4. Определены временные характеристики рентгеновского излучения, испускаемого из прианодной и прикатодной областей.

Показано, что излучение из прикатодной области испускается на ~ 140 нс позже, чем из прианодной области и самого анода. Установлено, что импульсы рентгеновского излучения совпадают с точностью ~ 10 нс с экстремумами временной зависимости производной dU/dt по времени напряжения на разрядном промежутке. Появление импульсов рентгеновского излучения из прианодной области также совпадает по времени с формированием сверхвысокочастотных колебаний тока разряда. Один экстремум зависимости dU/dt от времени соответствует серии импульсов рентгеновского излучения.

5. Установлено, что излучение из прианодной области обусловлено торможением электронов в газовом промежутке и материале анода. Энергетические характеристики излучения, определенные с помощью фильтров ступенчатого ослабления и по параметрам его угловой анизотропии, свидетельствуют о том, что оно вызвано убегаящими электронами с максимальными энергиями не менее ~ 300 кэВ.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных *Web of Science* и *Scopus*:

1. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Chubenko A. P., Oginov A. V., Rodionov A. A., Rusetskiy A. S., Ryabov V. A., Shepetov A. L. and Shpakov K. V., *Observation of hard radiations in a laboratory atmospheric high-voltage discharge* //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – Т. 50. – №. 16. – С. 165202.

2. Родионов А. А., Огинов А. В., Шпаков К. В. *Сцинтилляционные детекторы повышенной чувствительности и временного разрешения на основе ФЭУ для исследования измерений в условиях сильных электромагнитных помех* //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – №. 4. – С. 463-467.

3. Agafonov A.V., Oginov A.V., Rodionov A.A., Ryabov V.A. and Shpakov K.V., *Anisotropy in hard bremsstrahlung from a high-voltage laboratory simulation of an atmospheric discharge* //Plasma Sources Science and Technology. – 2019. – Т. 28. – №. 9. – С. 095014.

4. Родионов А. А., Агафонов А. В., Рябов В. А., Шпаков К. В., Байдин И. С., Болотов Я. К., Медведев М. А., Паркевич Е. В., Мозговой А. Г., Огинов А. В., *Исследование областей генерации жестких ионизирующих излучений в атмосферном разряде* //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 116. – №. 4. – С. 225-232.

5. Родионов А. А., Агафонов А. В., Рябов В. А., Шпаков К. В., Байдин И. С., Болотов Я. К., Медведев М. А., Паркевич Е. В., Мозговой А. Г., Огинов А. В. *Временные параметры ионизирующего излучения анодной и катодной локализации в мегавольтном разряде* //Краткие сообщения по физике Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии Наук. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. 38-49.

6. Parkevich E.V., Shpakov K.V., Baidin I.S., Rodionov A.A., Khirianova A.I., Khirianov T.F., Bolotov Ya.K., Medvedev M.A., Ryabov V.A., Kurilenkov Yu.K., and Oginov A.V., *Streamer formation processes trigger intense x-ray and high-frequency radio emissions in a high-voltage discharge* //Physical Review E. – 2022. – Т. 105. – №. 5. – С. L053201.

Главы в монографиях:

1. Родионов А. А., Агафонов А. В., Огинов А. В., Рябов В. А., Шпаков К. В., *«Исследование излучений атмосферного мегавольтного разряда»*, Глава в коллективной монографии «Электрофизические и оптические процессы в плазменных и твердотельных средах и наноструктурах», под ред. Г.А. Месяца. – Москва: РУСАЙНС, 2019.- 372 с., стр. 234-267. (ISBN 978-5-4365-3174-8).

2. Родионов А. А., Агафонов В. В., Рябов В. А., Шпаков К. В., Байдин И. С., Болотов Я. К., Медведев М. А., Паркевич Е. В., Мозговой А. Г., Огинов А. В., *«Временные параметры ионизирующего жесткого излучения анодной и катодной локализации в мегавольтном атмосферном разряде»*, Глава в коллективной монографии «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы импульсной электронике и оптоэлектронике» под ред. Г.А. Месяца. — Москва : РУСАЙНС, 2022. — 290 с., стр. 34-53. ISBN 978-5-466-02607-8

Публикации в трудах конференций:

1. Родионов А.А., Огинов А.В., Шпаков К.В., *«Многоканальная сцинтилляционная диагностика излучений предимпульсной стадии протяженного атмосферного разряда установки ЭРГ»*, XLII Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 9-13 февраля 2015 г. Тезисы докладов, стр. 239. (ISBN 978-5-9903264-5-3) Москва, 2015.
2. Rodionov A.A., Agafonov A.V., Oginov A.V., Shpakov K.V., *«Radiations and structure of high-voltage atmospheric discharge»*, XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Kabardino-Balkarian State University, Elbrus, Russia, March 1-6, 2015. Book of Abstracts, pp. 246-247. (ISBN 978-5-7558-0558-2).
3. Родионов А.А., Агафонов А.В., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., Пряничников А.А., *«Диагностический комплекс для исследований анизотропии рентгеновского и гамма-излучений атмосферного разряда»*, II юбилейная всероссийская конференция, Импульсная сильноточная вакуумная и полупроводниковая электроника ИСВПЭ-2016, ФИАН, г. Москва, 29–30 сентября 2016 г. Тезисы докладов, стр. 28-29.

4. Родионов А.А., Агафонов А.В., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., Чечин В.А., *«Измерения угловых распределений и энергии гамма-квантов тормозного излучения «убегающих» электронов в высоковольтном атмосферном разряде»*, XLIV Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 13-17 февраля 2017 г. Тезисы докладов, стр. 187. (ISBN 978-5-9903264-7-7), Москва, 2017.
5. Родионов А.А., Агафонов А.А., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., *«Исследования углового распределения рентгеновского и гамма-излучений разряда на установке ЭРГ с помощью многоканального сцинтилляционного диагностического комплекса»*, XLIV Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 13-17 февраля 2017 г. Тезисы докладов, стр. 226. (ISBN 978-5-9903264-7-7), Москва, 2017.
6. Родионов А.А., Агафонов А.В., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., *«Многоканальная сцинтилляционная система диагностик для исследования параметров жестких излучений в лабораторном импульсном атмосферном разряде»*, III всероссийская конференция, Импульсная сильноточная вакуумная и полупроводниковая электроника ИСВПЭ-2017, Сборник трудов, стр. 46-47., Москва, 2017.
7. Rodionov A.A., Agafonov A.V., Oginov A.V., Shpakov K.V. and Baidin I.S., the Fifth MIPT – UEC – LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics: *«Multichannel scintillation-diagnostic for studying of the hard bremsstrahlung from an extended atmospheric discharge in the erg installation »*, Moscow, 1-3 October 2018. Book of abstracts, pp. 26-27.
8. Родионов А.А., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., *«Исследования параметров жестких излучений в молниевом*

атмосферном разряде с помощью перестраиваемой многоканальной сцинтилляционно-детектирующей сборки», XLV Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 2-6 апреля 2018 г., Сборник тезисов докладов, стр. 233. (ISBN 978-5-9903264-8-4), Москва, 2018.

9. Родионов А.А., Агафонов А.А., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., *«Перестраиваемая многоканальная сцинтилляционная диагностика в исследованиях углового распределения рентгеновского и гамма-излучений предпробойной стадии протяженного атмосферного разряда на установке ЭРГ», XLVI Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 18-22 марта 2019 г., Сборник тезисов докладов, стр. 177. (ISBN 978-5-6042115-0-2), Москва, 2019.*

10. Родионов А.А., Агафонов А.В., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., Болотов И.С., *«Многоканальная сцинтилляционная диагностика в исследованиях углового распределения рентгеновского и гамма-излучений атмосферного разряда на установке ЭРГ», Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике, БПИО-2019, 12-14 ноября 2019 г., Тезисы докладов школы молодых ученых, стр. 70-72. Москва, 2019.*

11. Родионов А.А., Агафонов А.В., Огинов А.В., Шпаков К.В., Байдин И.С., Болотов И.С., *«Исследования параметров жестких излучений протяженного атмосферного разряда с помощью перестраиваемой многоканальной диагностической установки», Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике, БПИО-2020, 24-*

26 ноября 2020 г., Тезисы докладов школы молодых ученых, стр. 83-84. Москва, 2020.

12. Родионов А.А., Огинов А.В., Шпаков К.В., Болотов Я.К., *«Распределение рентгеновского излучения вдоль мегавольтного атмосферного разряда»*, Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике, БПИО-2020, 24-26 ноября 2020 г., Тезисы докладов школы молодых ученых, стр. 23-24. Москва, 2020.

13. Родионов А.А., Агафонов А.В., Рябов В.А., Шпаков К.В., Байдин И.С., Болотов Я.К., Медведев М.А., Паркевич Е.В., Мозговой А.Г., Огинов А.В., *«Исследование пространственной локализации областей генерации рентгеновского и гамма излучения протяженного мегавольтного атмосферного разряда»*, Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике, БПИО-2022, 15-17 ноября 2022 г., Тезисы докладов школы молодых ученых, стр. 64-65. Москва, 2022.