

На правах рукописи

Григорьева Ирина Гаяровна

**Многодетекторный диагностический комплекс
для исследования рентгеновского и корпускулярного
излучения плазмы сильноточных электрических разрядов**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



4 МАЙ 2016



006649068

Москва 2016

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Савёлов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Баронова Елена Олеговна, доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»;

Паперный Виктор Львович, доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей и космической физики
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет»

Ведущая организация: Российский Федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт эксперимен-
тальной физики, г. Саров

Защита состоится 15 июня 2016 года в 16 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу:
115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, тел. 8(499)324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
НИЯУ МИФИ: <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «25» 04 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам (*Z*-пинчам) связан с образованием в них плотной, горячей, многократно ионизованной плазмы, которая является интенсивным источником вакуумного ультрафиолета, рентгеновского излучения и потока заряженных частиц. К классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств относятся установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» и «плазменный фокус», на которых при определенных условиях реализуется режим микропинчевания, сопровождающийся образованием уникального объекта, называемого плазменной точкой или микропинчем, представляющего собой область плотной горячей плазмы ($N_e \approx 10^{20} \div 10^{23} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 1 \div 10 \text{ кэВ}$) микронного размера, интенсивно излучающей рентгеновское излучение (более 10^{16} квантов за вспышку), с временем жизни не более 10 нс.

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для *Z*-пинчевых установок (низкоиндуктивная вакуумная искра; плазменный фокус; системы проволочных сборок; *Z*-пинчи с импульсной инжекцией газа).

Сильноточные импульсные электроразрядные устройства обладают высокой эффективностью преобразования вкладываемой в разряд электрической энергии в энергию рентгеновского излучения.

Плазма микропинчевого разряда, генерируемая на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» и «плазменный фокус», имеет высокие параметры при относительной простоте конструкции и высокой степени надежности в эксплуатации данных установок, что делает их перспективными для применения в различных областях науки и техники в качестве мощных импульсных источников рентгеновского и нейтронного излучения.

Исследования плазмы микропинчевого разряда ведутся во многих крупных лабораториях мира, однако физика явлений в плазме сложна и многообразна и требуются интенсивные экспериментальные исследования для их понимания. Для проведения данных исследований, необходимо развитие и совершенствование со-

временных методов и диагностических приборов для комплексных измерений излучательных характеристик плазменных объектов, позволяющих определить и интерпретировать физику явлений.

Цель работы: дальнейшее развитие, разработка и применение методов комплексной диагностики рентгеновского и корпускулярного излучения на основе различных видов детекторов для проведения экспериментальных исследований спектральных характеристик рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточного импульсного разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» и «плазменный фокус», а именно:

- анализ и экспериментальные исследования свойств современных детекторов ионизационного излучения для применения в диагностической аппаратуре для исследования плазмы;
- исследования с помощью диагностических приборов спектральных характеристик рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы в зависимости: от тока разряда, конфигурации, конструкции и материала разрядных электродов;
- на основе проведенных исследований и полученных результатов дать физическую интерпретацию процессов, происходящих в плазме.

Научная новизна: на основании проведенных исследований характеристик различных видов детекторов (сцинтилляционных, полупроводниковых, термомлюминесцентных, трековых) и сочетания их детекторных свойств при совместном использовании позволили впервые создать диагностический комплекс для исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов и впервые получить следующие результаты:

1. Измерены спектры рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ в зависимости от величины разрядного тока и конфигурации разрядных электродов на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», что позволило впервые показать различную зависимость низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частей спектра рентгеновского излучения плазмы. Данные исследования впервые позволили определить влияние начальных условий сильноточного электрического разряда

на рентгеновское излучение плазмы в низкоэнергетичной и высокоэнергетичной частях спектра.

2. Впервые измерены спектры рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ в зависимости от элементного состава плазмы микропинчевого разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». На основании полученных результатов впервые установлен различный характер зависимости низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частей спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда от элементного состава образованной плазмы.

3. Проведены исследования пространственной структуры плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», позволившие впервые одновременно определить эффективные источники ионов различной степени ионизации и рентгеновского излучения.

4. Разработана методика, позволившая впервые выполнить измерения спектра эмиссии ионов различной степени ионизации из различных областей плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра».

5. Получены результаты проведенных одновременно измерений спектра рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ и выхода нейтронов на установке «плазменный фокус» в зависимости от величины разрядного тока, позволившие впервые показать взаимосвязь образования рентгеновского и нейтронного излучений.

Научная и практическая значимость работы. Проведены исследования свойств широкого класса детекторов (сцинтилляционных, полупроводниковых, термолюминесцентных, трековых), на основании которых определена область их возможного использования в диагностической аппаратуре и создан многофункциональный комплекс для исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных электрических разрядов.

Созданный комплекс диагностической аппаратуры позволяет провести комплексные исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы на различных установках, генерирующих плазму в результате сильноточного импульсного электрического разряда, и на основе проведенных исследований

осуществить оптимизацию данных установок, как эффективных источников излучения.

В ходе выполнения работы были проведены исследования зависимости спектральных характеристик рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в широком энергетическом диапазоне $1\div 300$ кэВ от величины разрядного тока, конфигурации и конструкции разрядных электродов и элементного состава плазмы. Исследованы корреляции рентгеновского и корпускулярного (нейтроны, ионы) излучения плазмы сильноточных электрических разрядов и определена физическая картина процессов их возникновения. Определено влияние начальных условий сильноточного электрического разряда на возможность излучательных характеристик плазмы микропинчевых разрядов.

Исследованы процессы переноса вещества в процессе микропинчевого разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», показана возможность нанесения различных видов покрытий на материалы.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Диагностический комплекс для исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов, состоящий из следующих приборов:

- 18-канальной спектрометрической помехоустойчивой системы, созданной на основе термолюминесцентных и сцинтилляционных детекторов, позволяющей проводить измерения спектров импульсного рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ;

- малогабаритного (диаметр 5 мм, длина 10 мм), одноканального спектрометра, созданного на основе термолюминесцентных детекторов LiF, позволяющего проводить измерения спектров импульсного рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне квантов от 1 до 20 кэВ в труднодоступных местах;

- спектрометрической системы для измерения спектра эмиссии ионов различной степени ионизации, позволяющей проводить измерения спектров ионов из различных областей плазменного объекта.

2. Результаты измерения спектров рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ в зависимости от величины разрядно-

го тока и конфигурации разрядных электродов на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», позволившие показать различную зависимость низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частей спектра рентгеновского излучения плазмы. Данные результаты измерений позволили определить влияние начальных условий сильноточного электрического разряда на рентгеновское излучение плазмы в низкоэнергетичной и высокоэнергетичной частях спектра.

3. Результаты измерения спектров рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ в зависимости от элементного состава плазмы микропинчового разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Эксперименты показали различную зависимость низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частей спектра рентгеновского излучения от элементного состава образованной плазмы.

4. Результаты исследований пространственного распределения рентгеновского излучения и эмиссии ионов различной степени ионизации из плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», позволившие одновременно определить области образования эффективных источников ионов и рентгеновского излучения.

5. Методику и результаты измерения спектральных характеристик эмиссии ионов различной степени ионизации из различных областей плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра».

6. Результаты проведенных одновременно измерений спектра рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ и выхода нейтронов на установке «плазменный фокус» в зависимости от величины разрядного тока, позволившие показать взаимосвязь образования рентгеновского и нейтронного излучений.

Личный вклад соискателя. Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке, проведении и обработке результатов всех представленных в работе экспериментов.

Апробация работы. Результаты проведенных по теме диссертации исследований докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях, симпозиумах и школах: VIII Российская конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», Москва, 23-25 октября 2012 г.; III Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» 10-13 апреля 2014 г., Москва; ежегодная конференция «Научная сессия НИЯУ «МИФИ», Москва, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 10 печатных работах, включая 6 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК РФ (4 статьи опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus). Список основных публикаций представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 163 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, определена научная новизна полученных в работе результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация диссертационной работы.

В первой главе дан обзор литературных источников, посвященных значению и роли сильноточных импульсных электроразрядных установок.

Интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам (Z -пинчам) связан с образованием в них плотной, горячей, многократно ионизованной плазмы, которая является интенсивным источником импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения. К классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств относятся установки «низкоиндуктивная вакуумная искра» и «плазменный фокус», на которых реализуется ре-

жим микропинчевания. Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для Z-пинчевых установок.

Высокие параметры плазмы микропинчевого разряда, относительная простота конструкции и эксплуатации, делают данные установки перспективными для использования в различных областях науки и техники. Исследования микропинчевого разряда ведутся во многих крупных лабораториях мира, однако для полного понимания физических процессов, протекающих в плазме, образованной на Z-пинчевых установках, требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Исследования проводились на установках ПФМ-72, «Зона-2», разработанных в МИФИ сотрудниками кафедры «Физика плазмы» под руководством профессора Савелова А.С. и установках типа «плазменный фокус». Установки ПФМ-72 и «Зона-2» представляют собой установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Разряд инициировался в вакууме не хуже 10^{-4} Тор от вспомогательных разрядных устройств эрозийного типа. Рабочей средой разряда являлись продукты эрозии материала анода разрядного устройства, ток разряда достигал величины 200 кА, период разряда $T = 5 - 8,5$ мкс. Установка «плазменный фокус» имела разрядную камеру с эллиптическими электродами мейзеровского типа и рассчитана на работу с разрядным током до 360 кА. Энергозапас конденсаторной батареи порядка 4 кДж. Разрядная камера снабжена разборным диагностическим окном. Эксперименты проводились с разрядной камерой, заполненной аргоном (давление ≈ 2 Тор) или дейтерием (давление ≈ 10 Тор).

Для дальнейшего развития и оптимизации Z-пинчевых установок, исследования физических процессов, протекающих в плазме разряда, получаемой на данных установках, необходимо развивать методы и аппаратные средства диагностики плазмы и активно проводить исследования плазменных объектов сильноточного импульсного электрического разряда.

Вторая глава посвящена методам исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточного электрического разряда.

Рентгеновское излучение плазмы сильноточного электрического разряда обладает высокой интенсивностью (более 10^{16} квантов за вспышку) и малой длительностью (от единиц до сотен наносекунд),

имеет довольно сложный спектр с максимумом в области 1 кэВ и спадом интенсивности с ростом энергии квантов на несколько порядков. Момент образования плазмы сопровождается мощными электромагнитными помехами.

Проведенный анализ существующих методов спектрометрии импульсного рентгеновского излучения плазмы и экспериментальные исследования показали, что одним из оптимальных методов для решения поставленной задачи является метод фильтров поглощения, реализованный на основе многоканальных спектрометрических систем.

От выбранного типа детектора, используемого в спектрометрических системах, зависит надежность и точность проведенных исследований.

Учитывая особенности регистрации и вид спектра рентгеновского излучения плазмы, на основании проведенных исследований свойств детекторов было установлено, что для спектрометрии рентгеновского излучения плазмы в области энергий 1-25 кэВ наиболее предпочтительным является использование кремневых *p-i-n* диодов или термолюминесцентных детекторов LiF. Кремневые *p-i-n* диоды имеют чувствительный слой порядка 700 мкм, достаточный для эффективной регистрации рентгеновского излучения с энергией от 1 до 30 кэВ и отличные временные характеристики (≤ 1 нс). Термолюминесцентные детекторы LiF не чувствительны к электромагнитным наводкам, практически не чувствительны к ультрафиолетовому излучению, имеют высокий динамический диапазон поглощенной дозы излучения.

Для спектрометрии рентгеновского излучения плазмы в области энергий более 15 кэВ, используются неорганические сцинтилляторы, которые обладают высокой эффективностью регистрации по сравнению с другими детекторами.

В корпускулярной диагностике для анализа заряженных частиц по энергиям применяются методики, основанные на отклонении заряженных частиц в электростатических и магнитных полях, а также времяпролетные системы.

В качестве детекторов ионов используются диэлектрические трековые детекторы, не чувствительные к сопутствующему рентгеновскому излучению. Образованные треки ионов определяются после специальной обработки детектора методом травления. Ди-

электрические трековые детекторы позволяют проводить исследование эмиссии ионов с пространственным разрешением с точностью 1-50 мкм и определять энергию частиц по параметрам образованных треков с энергетическим разрешением близким по величине к энергетическому разрешению поверхностно-барьерных полупроводниковых детекторов.

Из существующих на сегодняшний день диэлектрических трековых детекторов наибольший интерес представляют CR-39 – тонкая полимерная пленка толщиной 0,1 мм. Выбор данного детектора определяется его высокой чувствительностью и способностью регистрировать однозарядные частицы, а также стабильностью параметров. Энергии исследуемых ионов в плазме сильноточного электрического разряда могут находиться в интервале практически от нуля до энергии 120 кэВ. В сочетании с магнитной сепарацией ионов и регистрацией на CR-39, можно измерять спектры ионов различной степени ионизации.

В данной главе проведен анализ существующих методов регистрации нейтронов. Рассмотрены наиболее часто используемые методы: метод регистрации ядер отдачи и продуктов ядерных реакций, активационные методы, методы времени пролета.

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям рентгеновского излучения и эмиссии ионов из плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Были проведены экспериментальные исследования рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне от 1 до 300 кэВ в зависимости от тока разряда, конфигурации, конструкции и элементного состава материалов электродов разрядной системы. Была определена взаимосвязь между рентгеновским излучением и эмиссией ионов, их пространственным распределением, измерены спектры рентгеновского излучения и ионов из плазмы микропинчового разряда и проведена интерпретация физических процессов в соответствии с полученными результатами.

В разделе 3.1 приводится описание аппаратных средств диагностики и методов исследования плазмы. Для проведения исследований были разработаны методы исследования плазменных объектов и создан комплекс диагностической аппаратуры, состоящий из набора многоканальных рентгеновских спектрометров на основе тер-

молюминесцентных и сцинтилляционных детекторов, комплекса камер-обскур, пояса Роговского, рентгеновского *p-i-n* диода, спектрометрической системы для измерения спектра эмиссии ионов различной степени ионизации из различных областей плазменного объекта.

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,0–25 кэВ был использован семиканальный спектрометр рентгеновского излучения на основе термолюминесцентных детекторов LiF (размер спектрометра \varnothing 20 x 20 мм).

Каналы спектрометра построены по схеме: фильтр поглощения + сборка из десяти детекторов LiF (каждый детектор имел размер: \varnothing 5 мм и толщину 0,9 мм). Один канал спектрометра использовался без фильтра поглощения.

В работе также был использован малогабаритный, одноканальный спектрометр (\varnothing 5 x 10 мм), представляющий сборку из десяти детекторов LiF, расположенных друг за другом. В данном случае фильтрами поглощения осуществляющими спектроселекцию рентгеновского излучения служили сами термолюминесцентные детекторы.

Для измерения спектрального состава рентгеновского излучения от 15 до 100 кэВ был использован помехоустойчивый многоканальный сцинтилляционный спектрометр на основе миниатюрных ФЭУ-60 (рис. 1).

Высокая чувствительность и эффективность регистрации жесткой компоненты рентгеновского излучения спектрометра достигнута за счет размещения сцинтилляционных детекторов CsJ(Tl) (с большим атомным зарядом $Z_{эф} = 54$ и размером \varnothing 15x20 мм) в непосредственном оптическом контакте с входными окнами ФЭУ-60. Компактность прибора (габаритные размеры прибора \varnothing 80x170 мм) обеспечивало использование малогабаритных ФЭУ-60 (\varnothing 15x70 мм).

Динамический диапазон спектрометра достигает 10^8 . Для расширения динамического диапазона между сцинтиллятором и ФЭУ могут быть установлены корректирующие оптические фильтры.

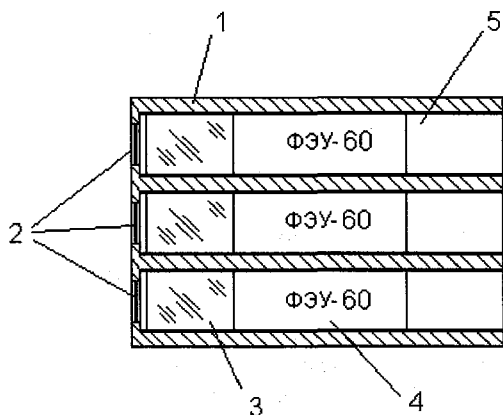


Рис. 1. Функциональная схема 7-канального сцинтилляционного спектрометра рентгеновского излучения: 1 – корпус спектрометра; 2 – фильтры поглощения; 3 – сцинтилляторы; 4 – ФЭУ-60; 5 – металлический кожух канала

Подробно исследования спектра в жесткой части (свыше 80 кэВ) проводились с использованием четырехканального сцинтилляционного спектрометра. Для увеличения эффективности регистрации и точности измерения были использованы кристаллы больших размеров: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (Ø 30x35), CsJ(Tl) (Ø 30x35), NaI(Tl) (Ø 30x50) в непосредственном оптическом контакте с спектрометрическим ФЭУ-85.

Динамический диапазон спектрометра достигает 10^4 . Все диагностические приборы были откалиброваны. Сцинтилляционные спектрометры крепились к диагностическим окнам разрядной камеры и были направлены перпендикулярно к оси разряда, и регистрировали рентгеновское излучение из разрядного промежутка.

Для исследования спектрального состава эмиссии ионов из плазмы была создана спектрометрическая система на основе магнитного сепаратора ионов, построенная на базе постоянных магнитов (0,7 Тл), заключенных в кожух из мягкого железа и твердотельного трекового детектора CR-39. Ион, попадая в сепаратор через коллимационное отверстие, двигался по круговой орбите и регистрировался твердотельным трековым детектором CR-39. Степень ионизации и энергия иона определялись как по отклонению в магнитном поле, так и по виду трека в трековом детекторе CR-39.

Данный вид детектора нечувствителен к сопутствующему рентгеновскому излучению.

В разделе 3.2.1 приводятся результаты исследования пространственной структуры и элементного состава плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра».

При токах разряда $I < I_{кр}$ (критический ток разряда $I_{кр} = 50$ кА для плазмы железа) микропинчевание не происходит (образование плазменных точек не происходит), что зафиксировано обскурограммой (рис. 2, а).

В ходе эксперимента менялась конфигурация электрического поля в промежутке между разрядными электродами, посредством изменения полярности электродов разрядной системы. При токах разряда I больших критического $I_{кр} = 50$ кА при различной полярности электродов (*б* – анод стержневой электрод; *в* – анод плоский электрод) микропинчевание происходит и «плазменные точки» образуются (рис. 2, б, в).

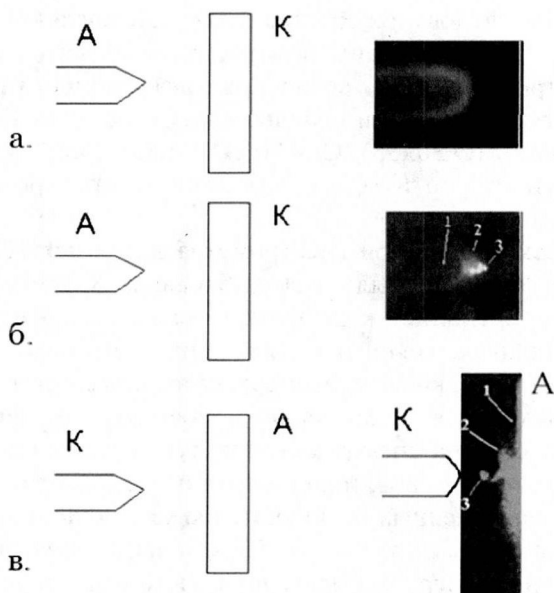


Рис. 2. Типичные обскурограммы, полученные при токе разряда < 50 кА (а) (микропинчевание отсутствует); при токе 150 кА при различной полярности электродов (*б* – анод стержневой электрод; *в* – анод плоский электрод)

Исследования элементного состава плазмы микропинчового разряда были проведены методом исследования осаждения продуктов эрозии электродов на образце. При микропинчовом разряде на образце происходило осаждение продуктов эрозии электродов.

Для выделения вклада эрозии материала электродов в плазму плоский электрод был изготовлен из латуни (Zn, Cu), а стержневой из железа (Fe). Полярность электродов менялась. Вклад продуктов эрозии материала электродов в плазму определялся по наличию осажденного материала на образце. В обоих случаях на образцы осаждался материал анода.

В ходе экспериментов была отработана методика нанесения на поверхность материалов различных видов напыления.

Раздел 3.2.2 посвящен исследованию спектров рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» в широком энергетическом диапазоне энергий квантов от 1 до 300 кэВ.

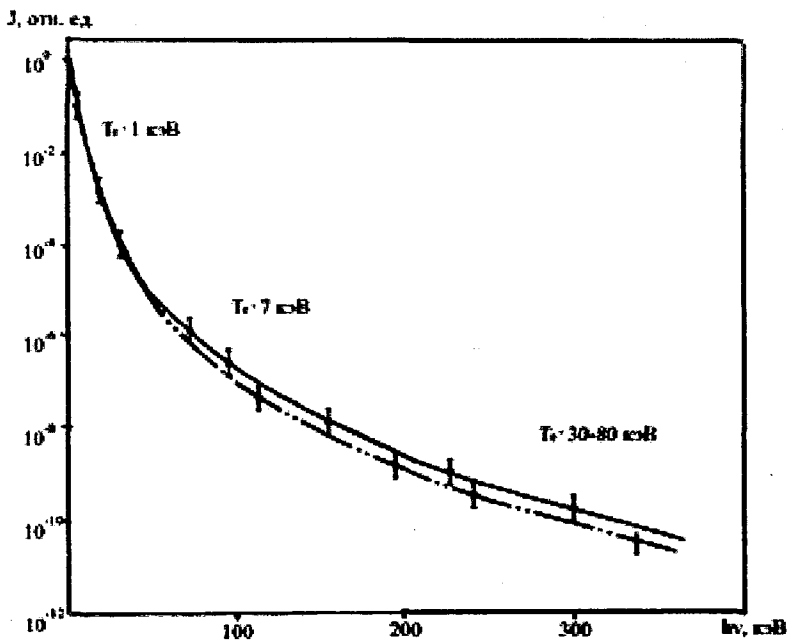


Рис. 3. Спектры излучения плазмы с электродами из железа, полученные при токе разряда 150 кА

В ходе экспериментов зарегистрированы интегральные по времени спектры рентгеновского излучения однократных сильноточных разрядов в режиме микропинчевания (рис. 3). Спектральные характеристики можно связать с физическими процессами, происходящими в плазме разряда. Различные участки спектра отвечают разным стадиям микропинчевого разряда: область $h\nu \approx 1\div 20$ кэВ – с $T_e \approx 1\div 3$ кэВ соответствует стадии формирования и образования микропинча; область $h\nu \approx 20\div 50$ кэВ – с $T_e \approx 7\div 10$ кэВ – стадии развала микропинча; область $h\nu \geq 80$ кэВ с $T_e \approx 30\div 80$ кэВ – фазе генерации и развития ускорительных процессов (конечный момент развала).

В данном разделе приведены результаты исследования спектров рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда в зависимости от конфигурации и конструкции электродов разрядной системы. В данном исследовании электроды разрядной системы были выполнены из одного материала железа.

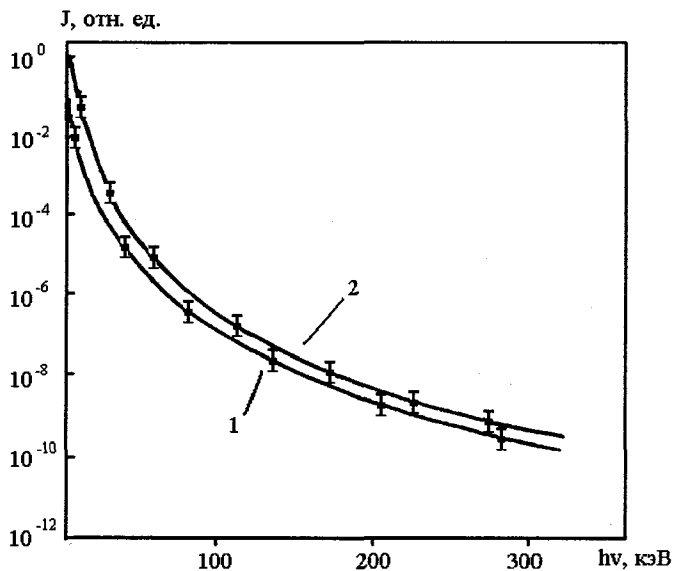


Рис. 4. Типичные спектры излучения плазмы с электродами из железа, полученные при токе разряда 150 кА:
 1 – анодом является плоский электрод;
 2 – анодом является стержневой электрод

Исследования показали (рис. 4), что в разрядной системе, где стержневой электрод анод, выход мягкого рентгеновского излучения выше в 10 раз, чем в системе с плоским анодом. Это связано с формированием электрических полей в межэлектродном пространстве разрядной системы, которое и определяет интенсивность поступления рабочего вещества для образования плазмы и степень её сжатия и нагрева. При стержневом аноде электронная температура T_e микропинча выше, чем в системе с плоским анодом, что приводит к росту интенсивности жесткого рентгеновского излучения, образованного в результате ускорительных процессов.

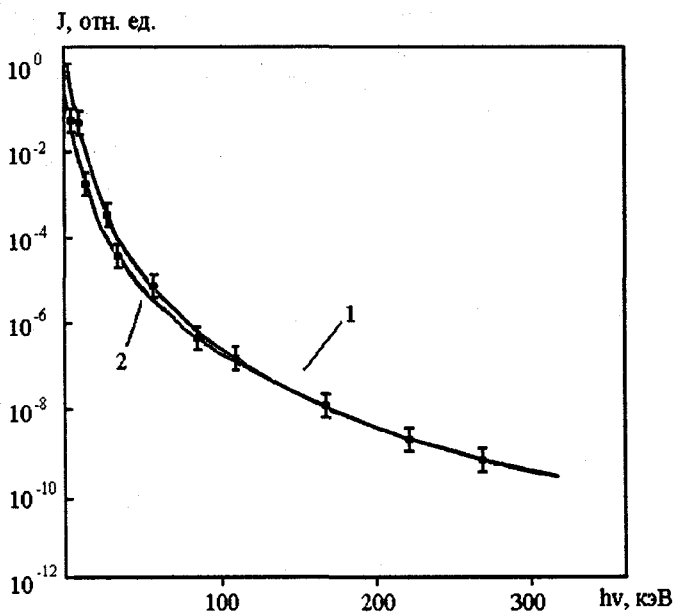


Рис. 5. Спектры рентгеновского излучения плазмы с электродами из железа, полученные при токе разряда 150 кА; анодом является стержневой электрод с различной углов заостренности: 1 – угол заточки 30°; 2 – угол заточки 90°

В ходе экспериментов была определена зависимость спектра рентгеновского излучения от степени заостренности анода (анод имел различные углы заточки – растр углов 30° и 90°). Вид спектров (рис. 5) свидетельствует о возрастании выхода мягкого рент-

геновского излучения при использовании более острого анода в три-пять раз. При более остром стержневом аноде область локализации разряда заметно сокращается и увеличивается концентрация частиц, участвующих в процессе пинчевания. Следовательно, происходит рост плотности и ее излучательных характеристик. Электронная температура T_e микропинча не изменяется от степени заостренности анода разрядного электрода и соответственно спектр рентгеновского излучения в области энергий квантов больше 80 кэВ не изменяется.

Раздел 3.2.3 посвящен исследованию влияния материала разрядных электродов на спектральные характеристики рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда. Исследование спектра рентгеновского излучения плазмы проводилось при стержневом аноде, изготовленном из различных материалов (Al^{13} , Fe^{26} , Cu^{29} , W^{74}). Катодом служил плоский электрод, изготовленный из железа. Ток разряда был равен 150 кА. В ходе экспериментов параметры установки и условия разряда не изменялись.

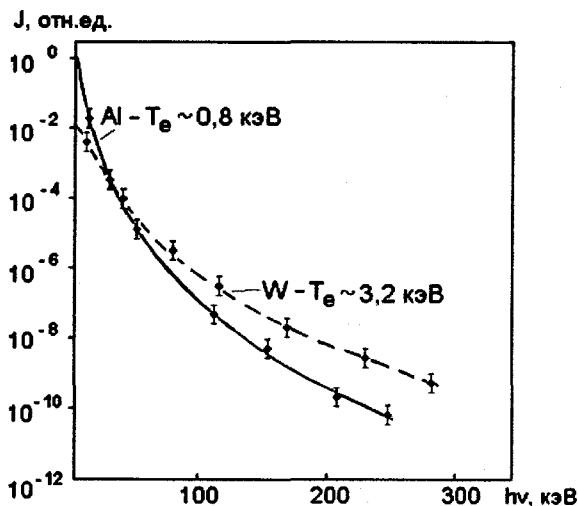


Рис. 6. Спектры излучения плазмы микропинчевого разряда (ток разряда 150 кА) при использовании анода из W и Al

Плазма импульсного сильноточного электрического разряда формируется в основном из продуктов эрозии анода, соответственно, на параметры образованной плазмы влияет материал, из которого изготовлены электроды разрядной системы. Результаты экспериментов представлены на рис. 6 и 7.

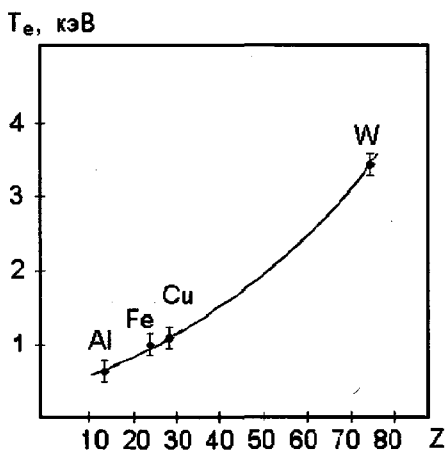


Рис. 7. Электронная температура плазмы в зависимости от атомного заряда, материала анода разрядной системы

Исследование спектров рентгеновского излучения плазмы, получаемой с анодом из различных материалов, показали зависимость вида спектра от электронной температуры T_e микропинча.

С ростом T_e микропинча растет и интенсивность жесткого рентгеновского излучения. Полученные результаты можно объяснить в рамках модели радиационного сжатия. Образование плазмы происходит в парах эрозии анода, чем выше атомный номер материала анода, тем должна быть выше электронная температура T_e для образования микропинчевого режима. Наблюдался рост электронной температуры T_e с ростом атомного заряда Z материала анода разрядной системы как $T_e \sim Z^2$.

Практическое применение для увеличения выхода мягкой и жесткой компоненты рентгеновского излучения наблюдается в экспериментах по получению рентгеновского излучения Z-пинчей многопроволочных сборок на установках «Ангара-5-1» и плазмофо-

кусных установках. Покрытие или добавки тяжелых элементов (с большим Z) в разрядные проволочки разрядной системы позволяют значительно поднять электронную температуру T_e , которая передается легкому материалу, что увеличивает выход мягкого рентгеновского излучения.

В плазмодусных установках используют вставки из тяжелых элементов в аноде для увеличения интенсивности жесткого рентгеновского излучения, что приводит к росту интенсивности нейтронного излучения.

Раздел 3.2.4 посвящен исследованию зависимости спектральных характеристик рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда от тока разряда. Ток разряда изменялся от 30 до 190 кА. Система разрядных электродов выполнена из железа.

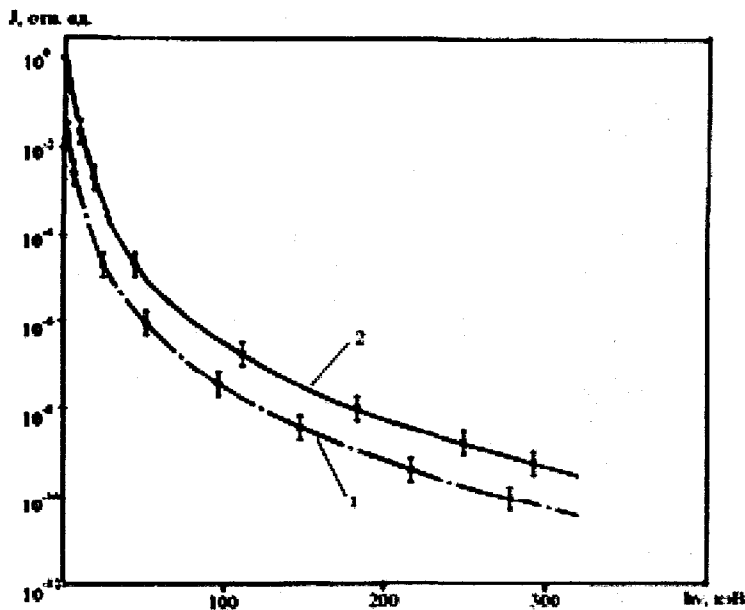


Рис. 8. Типичные спектры рентгеновского излучения плазмы железа, полученные при различных токах разряда: 1 – ток разряда 90 кА ($T_e = 0.8$ кэВ); 2 – ток разряда 190 кА ($T_e = 1.1$ кэВ)

Спектры рентгеновского излучения плазмы микропинцевого разряда, полученные при различных токах разряда, показаны на рис. 8. При токе разряда меньшим $I_{кр} = 50$ кА отсутствует жесткая составляющая рентгеновского излучения. Вид спектра существенно отличается от вида спектра с эффектом микропинчевания. На спектрах с эффектом микропинчевания можно определить три области, имеющие различную электронную температуру. С ростом разрядного тока увеличиваются интенсивность рентгеновского излучения и электронная температура T_e различных этапов микропинцевого разряда, но в различных энергетических областях спектра по-разному.

Вклад в низкоэнергетическое излучение в области около 1 кэВ определяется излучением многократно ионизированных ионов. Величина разрядного тока определяет интенсивность излучения и степень сжатия и нагрева плазмы, концентрации ионов. В области энергии $h\nu > 80$ кэВ возникновение рентгеновских квантов определяется развитием ускорительных процессов. Увеличение разрядного тока также влияет на эти процессы, которые определяются электронной температурой T_e микропинча. Чем выше электронная температура T_e микропинча, тем выше интенсивность жесткого рентгеновского излучения, образованного в результате ускорительных процессов на финальной стадии формирования микропинча.

Раздел 3.2.5 посвящен исследованию пространственного распределения эмиссии ионов из плазмы микропинцевого разряда.

Разрядные электроды были выполнены из железа. В качестве анода выступал электрод, который имел диаметр 3 мм и длину 14,5 мм и был на конце заострен. Катодом служил плоский электрод. Расстояние между электродами составляло 5 мм. Ток разряда был 150 кА.

Для исследования пространственной структуры источников эмиссии ионов в микропинцевом разряде была изготовлена камера-обскура. Объектив камеры-обскуры был направлен перпендикулярно к оси разряда и получал изображение всей разрядной зоны. Камера-обскура располагалась в самой разрядной камере. Схема эксперимента представлена на рис. 9.

Пространственное разрешение прибора составляло 0,08 мм. В качестве детектора ионов был выбран твердотельный трековый де-

детектор CR-39 – тонкая полимерная пленка толщиной 0,1 мм. Данный вид детектора не чувствителен к сопутствующему рентгеновскому излучению. Регистрацию рентгеновского излучения осуществляли с помощью рентгеновской пленки типа РТ-1, расположенной непосредственно за полимерной пленкой CR-39.

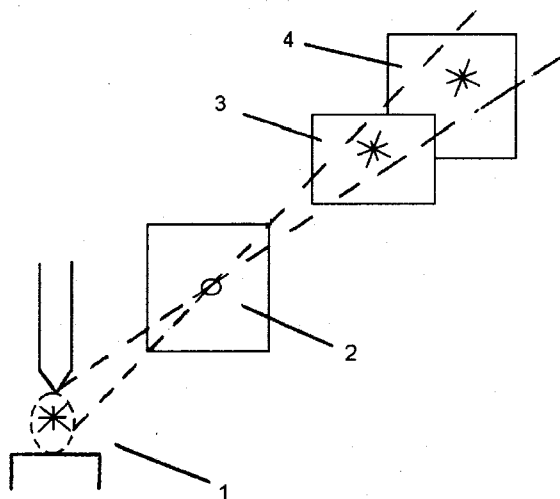


Рис. 9. Схема эксперимента для исследования пространственной структуры источников эмиссии ионов в микропинчевом разряде (ток разряда 150 кА):
1 – разрядные электроды и образованная плазма; 2 – диафрагма;
3 – детектор ионов; 4 – детектор рентгеновского излучения

В ходе эксперимента с помощью камеры-обскуры одновременно получали два пространственно совмещенных изображения: область рентгеновского излучения с энергией квантов $h\nu \geq 1$ кэВ и область эмиссии ионов.

Для получения изображения с детектора CR-39 после облучения его потоком ионов производилось его травление в щелочном растворе КОН при температуре 70 °С в течение 5 ч.

На рис. 10 представлены изображения, полученные в ходе эксперимента. На рисунке показаны разрядные электроды, наложенные на полученные изображения. На рис. 10, а дана обскурограмма рентгеновского излучения с энергией $h\nu > 3$ кэВ при экспозиции

3 разрядов. На рис. 10, *б* показана обскурограмма рентгеновского излучения с энергией $h\nu \geq 1$ кэВ с экспозицией 20 разрядов. На данной обскурограмме видна область рентгеновского излучения, включающая в себя часть анода, и область между электродами, образованную в результате 20 разрядов.

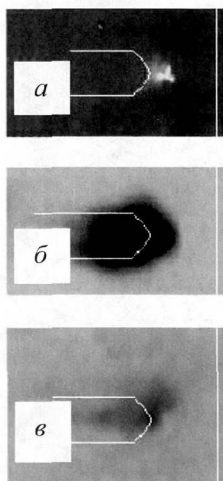


Рис. 10. Обскурограммы источников рентгеновского излучения и эмиссии ионов плазмы микропинчового разряда (ток разряда 150 кА, материал электродов – Fe): *а* – обскурограмма рентгеновского излучения с энергией $h\nu > 3$ кэВ при экспозиции 3 разрядов; *б* – обскурограмма рентгеновского излучения с энергией $h\nu \geq 1$ кэВ с экспозицией 20 разрядов; *в* – обскурограмма ионной эмиссии экспозиция 20 разрядов

На рис. 10, *в* показана обскурограмма ионной эмиссии. Экспозиция 20 разрядов. Наибольшая область излучения ионов – это острие анода и прианодная область.

Для определения энергетического спектра частиц, формирующих изображение на ионной обскурограмме, был разработан и изготовлен магнитный сепаратор. Посредством простой магнитной сепарации с использованием в качестве детектора CR-39 и по особенностям треков были подтверждены спектральные характеристики ионного излучения из плазмы микропинчового разряда, ранее полученные с помощью анализатора Томсона.

Спектры ионной эмиссии из плазмы микропинчового разряда представлены на рис. 11. Согласно проведенным спектрометрическим измерениям основной вклад в формирование изображений на ионных обскурограммах вносят одно-, двух-, трех- и четырехкратные ионы железа с энергиями от 5 до 80 кэВ.

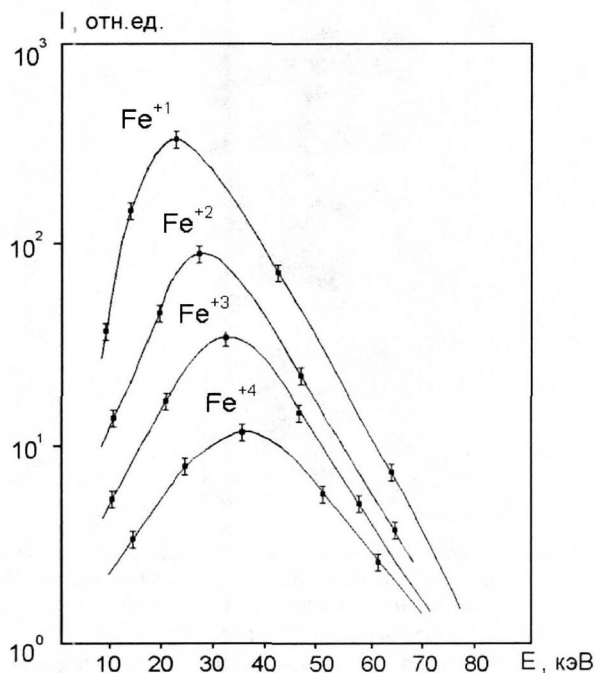


Рис. 11. Спектры ионной эмиссии из плазмы микропинчового разряда (ток разряда – 150 кА, материал электродов – Fe)

Также были проведены исследования спектрального состава в зависимости от места исследования разряда. Спектр был исследован из места, где образуются плазменные точки и приэлектродная плазма. Схема эксперимента и результаты представлены на рис. 12 и 13. Коллиматор магнитного сепаратора был направлен перпендикулярно к оси разрядных электродов к точке исследования.

На рис. 13 представлены результаты исследования спектрального состава эмиссии ионов в зависимости от места исследования

разряда (спектр был исследован из места, где образуются приэлектродная плазма (б) и плазменные точки (а)). Явно выделены четыре пика соответствующих ионам Fe^{+1} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Fe^{+4} различных энергий. Из сравнения денситограмм, полученных с пленок CR-39, видно, что эмиссия ионов из прианодной области более интенсивна (экспозиция 20 разрядов) и содержит более интенсивный пик Fe^{+1} , чем эмиссия ионов из области плазменной точки (экспозиция более 50 разрядов), где интенсивности пиков ионов Fe^{+1} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Fe^{+4} практически равны. В силу высокой плотности вещества в плазменной точке эмиссия ионов из данной области менее интенсивна.

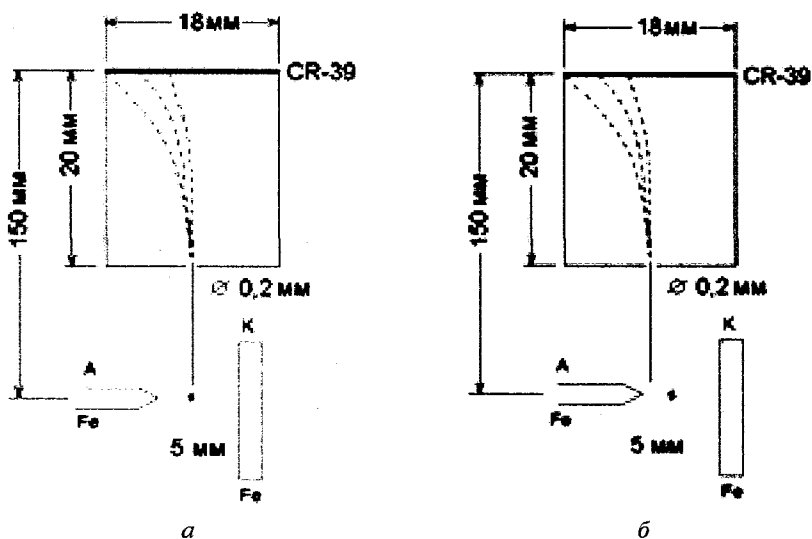


Рис. 12. Схема эксперимента по исследованию спектрального состава эмиссии ионов в зависимости от места исследования разряда (спектр был исследован из места, где образуются плазменные точки – а и приэлектродная плазма – б)

Сравнения полученных ионных и рентгеновских обскурограмм позволяют сделать вывод о том, что основным источником ионов является острое анода и прианодная область.

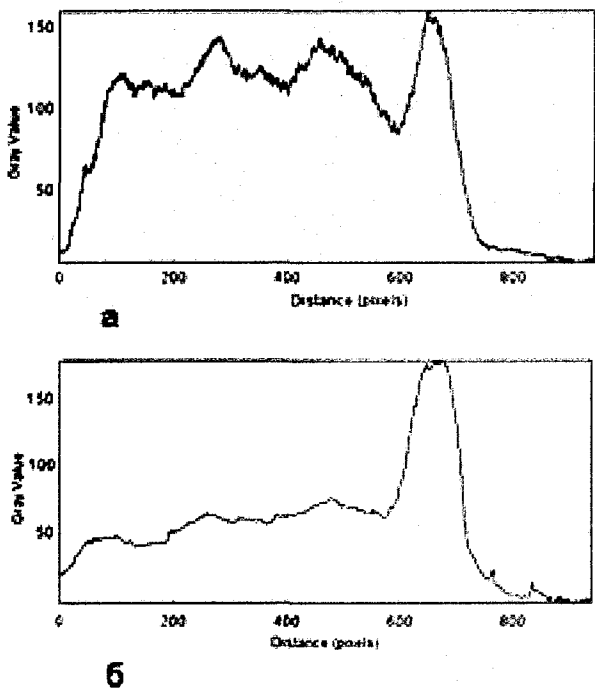


Рис. 13. Результат по исследованию спектрального состава эмиссии ионов в зависимости от места исследования разряда (спектр был исследован из места, где образуются плазменные точки (а); приэлектродная плазма (б))

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям плазмы образованной в сильноточном электрическом разряде на установке «плазменный фокус». Для исследования данных вопросов был использован диагностический комплекс, применяемый для исследования плазмы на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра». В работе также был использован активационный детектор «Феникс» содержащий бета-счетчик наведенной активности и предназначенный для измерения выхода нейтронов от импульсного нейтронного излучателя с энергией нейтронов 0,5-15 МэВ.

Данный комплекс позволял провести исследования импульсного рентгеновского и нейтронного излучения плазмы в процессе одного разряда. Исследования рентгеновского излучения плазмы было проведено в широком энергетическом диапазоне квантов от 1- 300 кэВ.

Установлено, что измеренным спектром с более высокой интенсивностью жесткого рентгеновского излучения соответствует больший выход нейтронов из плазмы (рис. 14). Жесткое рентгеновское излучение возникает в результате ускорительных процессов и образуется на финальной стадии микропича. Одним из основных механизмов, приводящих к рождению рентгеновских квантов при $h\nu > 80$ кэВ, является возникновение спонтанных электрических полей со значительно большими напряжениями, чем на разрядных электродах, в котором электроны ускоряются до энергий порядка нескольких сотен килоэлектрон-вольт, передавая энергию ионам.

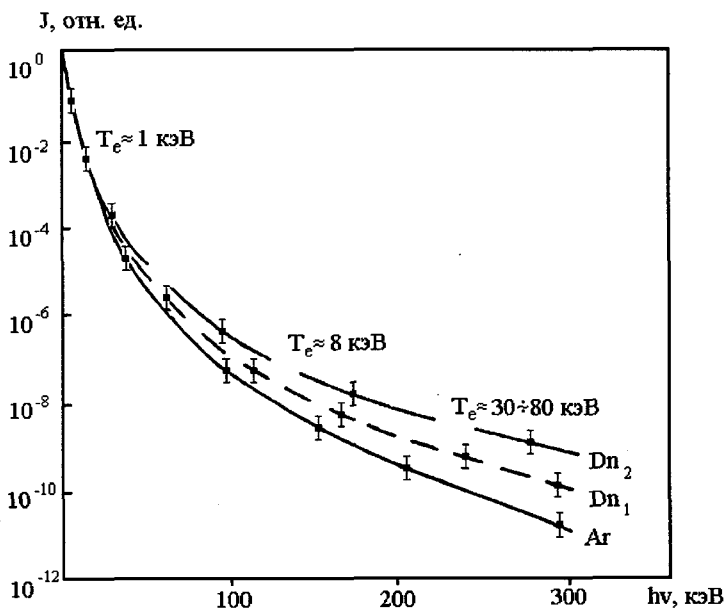


Рис. 14. Спектры излучения плазмы ПФ в диапазоне $1,0 \text{ кэВ} < h\nu < 300 \text{ кэВ}$, полученные в различных сериях измерений для камеры, заполненной аргоном Ag; дейтерием D (при различном выходе нейтронного излучения $n_1 = 5 \times 10^5$, $n_2 = 1 \times 10^6$) при токе разряда 250 кА

Чем выше интенсивность жесткого рентгеновского излучения, тем выше выход нейтронного излучения в ходе плазмофокусного разряда.

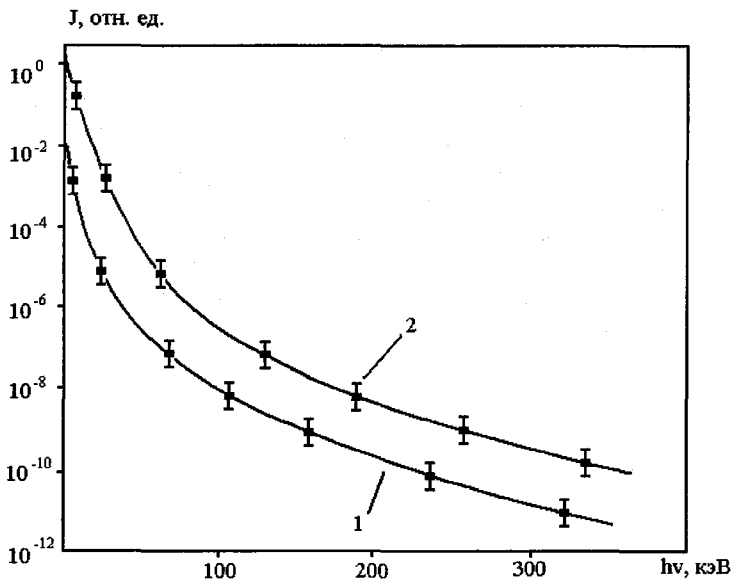


Рис. 15. Типичные спектры рентгеновского излучения плазмы ПФ, полученные при различных токах разряда: 1 – ток разряда 250 кА, при выходе нейтронного излучения $n = 1.0 \times 10^6$; 2 – ток разряда 350 кА, при выходе нейтронного излучения $n = 2.0 \times 10^7$

Для детального исследования процессов образования рентгеновского и нейтронного излучений были проведены исследования данных видов излучения при различных значениях разрядного тока рис. 15. Была исследована зависимость мягкого ($h\nu < 15$ кэВ) и жесткого ($h\nu > 80$ кэВ) рентгеновского излучения плазмы от величины тока разряда. Было установлено, что интенсивность жесткого рентгеновского излучения зависит от электронной температуры T_e микропинча. Чем выше электронная температура T_e микропинча, тем выше интенсивность жесткого рентгеновского излучения и абсолютный выход нейтронного излучения.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Создан диагностический комплекс для исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов, состоящий из следующих приборов:

- 18-канальной спектрометрической помехоустойчивой системы, созданной на основе термолюминесцентных и сцинтилляционных детекторов, позволяющей проводить измерения спектров импульсного рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ;

- малогабаритного (диаметр 5 мм, длина 10 мм), одноканального спектрометра, созданного на основе термолюминесцентных детекторов LiF, позволяющего проводить измерения спектров импульсного рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне квантов от 1 до 20 кэВ в труднодоступных местах;

- спектрометрической системы для измерения спектра эмиссии ионов различной степени ионизации, позволяющей проводить измерения спектров ионов из различных областей плазменного объекта;

- комплекта камер-обскур;

- активационного детектора «Феникс», содержащего бета-счетчик наведенной активности и предназначенного для измерения выхода нейтронов от импульсного нейтронного излучателя с энергией нейтронов от 0,5 до 15 МэВ;

- стандартных приборов: пояса Роговского и пин-диода.

2. Проведен анализ и экспериментальные исследования наиболее важных параметров различных видов детекторов (сцинтилляционных, полупроводниковых, термолюминесцентных, трековых) для возможного их использования в диагностической аппаратуре плазменных объектов.

Было установлено, что для спектрометрии рентгеновского излучения плазмы в области энергий 1-25 кэВ наиболее предпочтительным является использовать кремневые *p-i-n* диоды или термолюминесцентные детекторы LiF. Кремневые *p-i-n* диоды имеют чувствительный слой порядка 700 мкм достаточный для эффективной регистрации рентгеновского излучения с энергией от 1 до 30 кэВ и отличные временные характеристики (≤ 1 нс). Термолюминесцент-

ные детекторы LiF не чувствительны к электромагнитным наводкам, практически не чувствительны к ультрафиолетовому излучению, имеют высокий динамический диапазон поглощенной дозы излучения.

Для спектрометрии рентгеновского излучения плазмы в области энергий более 15 кэВ, используются неорганические сцинтилляторы, которые обладают высокой эффективностью регистрации по сравнению с другими детекторами.

3. Проведены исследования сцинтилляционных спектрометров построенных по схеме сцинтиллятор + ФЭУ, которые показали, что до настоящего момента данная схема по линейности отклика более эффективна, чем схема сцинтиллятор + SiPM.

4. Проведены исследования пространственной структуры и элементного состава плазмы сильноточных разрядов на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Подтвержден факт о том, что при токах разряда $I_{\text{раз}} < I_{\text{кр}}$ микропинчевание не происходит; при токах разряда $I_{\text{раз}} > I_{\text{кр}}$ микропинчевание происходит.

Исследования элементного состава плазмы микропинчевого разряда были проведены методом осаждения продуктов эрозии электродов на пластине, размещенной в разрядной камере. Установлено, что осаждаются элементы анода.

5. Проведены интегральные по времени измерения спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ. Полученные результаты не противоречат результатам ранее полученным другими исследователями и позволяют выделить на полученных спектрах три различных участка, соответствующих различным фазам протекания микропинчевого разряда: образования микропинча, развала микропинча и ускорительных процессов.

6. Проведены измерения спектров рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ в зависимости от величины разрядного тока, конфигурации и элементного состава материалов электродов разрядной системы, на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Полученные результаты позволили показать различную зависимость низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частей спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда.

Начальные условия разряда в различной степени влияют на спектр излучения плазмы в низкоэнергетичной ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичной ($h\nu > 80$ кэВ) частях спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда, так как они возникают на различных этапах микропинчевого разряда и определяются различными физическими процессами. Интенсивным источником низкоэнергетического излучения является микропинч. Высокоэнергетичное рентгеновское излучение образуется в результате ускорительных процессов в электрических полях, возникших в результате аномального роста омического сопротивления в области перетяжки. Эксперименты показали, что аномальный рост сопротивления перетяжки взаимосвязан с электронной температурой микропинча и возникает в момент развала микропинча. Чем выше электронная температура микропина, тем интенсивней высокоэнергетичное излучение.

7. Проведены исследования пространственной структуры источников рентгеновского излучения и эмиссии ионов из плазмы микропинчевого разряда на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», позволившие определить одновременно эффективные источники ионов и рентгеновского излучения.

Эффективным источником однозарядных ионов является острый анод и прианодная плазма, а источником рентгеновского излучения микропинч, прианодная плазма и анод разрядной системы.

8. Разработана методика, позволившая выполнить измерения спектра эмиссии ионов различной степени ионизации из различных областей плазмы микропинчевого разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра». Данные измерения показали, что приэлектродная плазма является интенсивным источником в основном однозарядных ионов. Микропинч является источником многозарядных ионов, но в силу его высокой плотности вещества выход ионов мал.

9. Одновременно проведены измерения спектров рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне квантов от 1 до 300 кэВ и выхода нейтронов на установке «плазменный фокус» в зависимости от величины разрядного тока. Данные эксперименты позволили установить взаимосвязь между низкоэнергетичным ($h\nu < 5$ кэВ) и высокоэнергетичным ($h\nu > 80$ кэВ) частями спектра рентгеновского излучения и выходом нейтронов. Жесткое рентге-

новское излучение ($h\nu > 80$ кэВ) определяется высокоэнергетичными электронами в плазме, передающими энергию ионам. С ростом величины разрядного тока растет электронная температура микропинча, а с ней высокоэнергетичное рентгеновское излучение и выход нейтронов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Исследование жесткой компоненты импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда / Е.Д. Вовченко, И.Г. Григорьева, В.В. Макаров, А.С. Савелов // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1076-1081.

2. Экспериментальные результаты исследований рентгеновского и нейтронного излучений плазмофокусного разряда / А.Б. Вавренюк, И.Г. Григорьева, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 2. С. 158-164.

3. Григорьева И.Г., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных электрических разрядов // Материалы 8 Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 23-25 октября 2012, С. 64.

4. Исследование параметров рентгеновского излучения горячей плазмы при помощи термолюминесцентных детекторов / А.В. Баловнев, И.Г. Григорьева, Э.И. Додулад, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // Материалы 8 Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 23-25 октября 2012. С. 44.

5. Исследование рентгеновского излучения микропинчевого разряда при помощи термолюминесцентных детекторов / А.В. Баловнев, И.Г. Григорьева, А.Д. Литвин, Э.И. Додулад, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 23-26.

6. Исследование рентгеновского излучения плазмы образованной в сильноточных импульсных электрических разрядах на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра» / А.В. Баловнев, Е.Д. Вовченко, И.Г. Григорьева, Э.И. Додулад, В.Н. Ермаков, Н.А. Клячин, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов. М.: Препринт НИЯУ МИФИ, 2014. № 001-2014.

7. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Применение термолюминесцентных детекторов для диагностики плазменных объектов // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100-103.

8. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Спектрометрия импульсного рентгеновского излучения плазмы сильного электрического разряда // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89-94.

9. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Координатно-чувствительный спектрометр импульсного рентгеновского излучения для исследования пространственной структуры плазменных объектов // ПТЭ. 2015. № 6. С. 67-70.

10. Balovnev A.V., Vovchenko E.D., Grigoryeva I.G., Dodulad E.I., Savelov A.S. X-ray and ion emission sources in high-current discharge plasma. *Physics Procedia* 71 (2015) 146-149. 18th Conference on Plasma-Surface Interactions, PSI 2015, 5-6 February 2015, Moscow, Russian Federation and the 1st Conference on Plasma and Laser Research and Technologies, PLRT 2015, 18-20 February 2015.

11. Study of the Hard Component of Pulsed X-Ray Emission of Micropinch Discharge Plasma / E.D. Vovchenko, I.G. Grigorieva, V.V. Makarov, A.S. Savelov and G.Kh. Salakhutdinov // *Plasma Physics Reports*. 2012. Vol. 38. № 12. P. 991-995. (Original Russian Text published in *Fizika Plazmy*. 2012. Vol. 38. № 12. P. 1076-1081.)

12. Balovnev A.V., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.Kh. Application of Thermoluminescent Detectors for Diagnosing Plasma Objects // *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. № 1. P. 98-101. (Original Russian Text published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2015. № 1. P. 100-103.)

13. Balovnev A.V., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.Kh. Spectrometry of Impulse High-Current Discharge-Plasma X Rays // *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. № 2. P. 252-256. (Original Russian Text published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2015. № 2. P. 89-94.)

14. Balovnev A.V., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.Kh. A Position-Sensitive Pulse X-ray Spectrometer for Studying Spatial Structures of Plasma Objects // *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. № 6. P. 771-773. (Original Russian Text published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2015. № 6. P. 67-70.)

Подписано в печать 04.04.2016. Формат 60x84 1/16
Печ.л. 2,0. Тираж 50 экз.

Отпечатано в типографии НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31