

На правах рукописи



**Баловнев Алексей Владимирович**

**Диагностика импульсной плазмы по  
рентгеновскому излучению с помощью  
термолюминесцентных детекторов**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

30 НОЯ 2016



006660932

Москва 2016

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук Салахутдинов Гаяр Харисович

**Официальные оппоненты:**

Баронова Елена Олеговна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ “Курчатовский институт”

Огинов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской Академии наук (ОИВТ РАН)

Защита состоится «21» декабря 2016 года в 15 ч. 00 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.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, диссертационные советы НИЯУ МИФИ (тел. +7(499)324-84-98).

Автореферат разослан «16» ноября 20 16 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Стариков Р.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Актуальность исследований физических процессов, происходящих в импульсной плазме, особенно выражена в связи с развитием тематики управляемого термоядерного синтеза. Наряду с магнитным удержанием плазмы, рассматривается инерциальный термоядерный синтез (ИТС). Особую важность приобретают исследования по созданию мощных импульсных источников рентгеновского и нейтронного излучений на основе быстрых лазерных и электроразрядных устройств. Среди наиболее перспективных вариантов драйверов ИТС следует выделить Z-пинч и лазер. Каждый вариант имеет свои преимущества, потому так важны исследования для выбора наиболее эффективного драйвера. Исследования сопряжены с использованием высоковольтного оборудования, создающего мощные электромагнитные наводки, что накладывает ограничения на использование средств диагностики.

В связи с возможным прикладным применением плазменных источников рентгеновского излучения важно знать такие параметры плазмы, как спектр и интенсивность ее рентгеновского излучения, эффективность преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения.

Кроме того, параметры рентгеновского излучения в низкоэнергетичной области спектра исследованы крайне недостаточно, что затрудняло интерпретацию физических процессов в горячей плазме, поэтому такие исследования актуальны.

**Актуальность** представляемой работы заключается в исследовании свойств перспективных плазменных источников излучения с использованием детекторов, не подверженных воздействию электромагнитных наводок и работающих в линейном режиме в широком спектральном диапазоне.

### **Цель работы**

Целью работы было исследование свойств и параметров плазмы импульсных разрядов при помощи разработанных и созданных малогабаритных помехоустойчивых спектрометрических систем с использованием термолюминесцентных детекторов в качестве чувствительного элемента.

### **Научная новизна**

- 1) Исследования чувствительности термолюминесцентных детекторов (ТЛД) к рентгеновскому и ультрафиолетовому излучениям позволили создать на их основе помехоустойчивый комплекс для диагностики рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий начиная от 0,5 кэВ и до 25 кэВ.
- 2) Впервые исследованы количественные зависимости выхода рентгеновского излучения от геометрических и токовых параметров установки типа низкоиндуктивная вакуумная искра (НВИ).
- 3) Впервые создан и апробирован экспериментально координатно-чувствительный детектор рентгеновского излучения на основе ТЛД для изучения пространственно-распределенных источников излучения в плазме.
- 4) В ходе исследования спектра рентгеновского излучения, сопровождающего аномальную электрон-электронную эмиссию в

автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда (ППР), в обратном потоке обнаружена группа высокоэнергетичных электронов.

### **Практическая значимость**

- 1) Создан спектрометр на основе ТЛД для изучения пространственного распределения спектральных характеристик рентгеновского излучения, применявшийся для диагностики плазмы НВИ, лазерной плазмы, а также ППР.
- 2) Разработанная диагностическая система позволяет дать количественные оценки зависимости интенсивности рентгеновского излучения от геометрии электродной системы и тока разряда, а также оптимизировать параметры установки «Зона-2».
- 3) Показана возможность использования аномальной электрон-электронной эмиссии в автоколебательном режиме ППР для получения высокоэнергетического рентгеновского излучения.
- 4) При тестировании диагностического комплекса на основе ТЛД и сравнении его с системой диагностики рентгеновского излучения на основе рип-диодов на установке, использующей лазерный драйвер для генерации плазмы, показана работоспособность рип-диодов для регистрации рентгеновского излучения в условиях сильных электромагнитных полей.

### **Основные результаты и положения выносимые на защиту**

- 1) Результаты исследования характеристик ТЛД, позволившие создать помехоустойчивую малогабаритную систему диагностики импульсного рентгеновского излучения в спектральном диапазоне 0,5 – 25 кэВ.

2) Методика исследования зависимости интенсивности рентгеновского излучения установки типа НВИ от ее геометрических и токовых параметров, которая позволила получить количественные оценки эффективности преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения.

3) Методика исследования пространственно-разрешенных спектральных характеристик плазменных источников рентгеновского излучения и исследования спектров различных областей разряда типа НВИ.

4) Методика и результаты исследования рентгеновского излучения пучково-плазменного разряда в автоколебательном режиме, позволившие обнаружить обратный поток высокоэнергетичных электронов, бомбардирующий мишень.

#### **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.

#### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Текст изложен на 123 страницах машинописного текста, включая 28 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 68 наименований.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: Научная сессия НИЯУ «МИФИ» 2013, 2014;

Современные средства диагностики плазмы и их применение 2012, 2014.

### **Публикации**

По теме работы опубликовано 13 печатных статей, в том числе 6 статей в реферируемых журналах из перечня ВАК и 5 статей входят в базу данных Scopus.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Во введении**

Представлены основные положения, выносимые на защиту, сформулированы цели работы, а также обоснована ее актуальность.

### **Глава 1**

В первой главе представлен обзор плазменных источников рентгеновского излучения, изученных в процессе исследования, а также детекторов излучения, не подверженных влиянию электромагнитных наводок в сильноточных плазменных установках. Обоснован выбор ТЛД детекторов для дальнейших исследований.

Одной из реализаций малогабаритного импульсного источника рентгеновского излучения являются установки на основе низкоиндуктивной вакуумной искры (НВИ). В сильноточном электрическом разряде сжатие плазмы реализуется за счет магнитного поля разрядного тока. Сжатие сопровождается рождением плазменной точки (микропинча). Процессы, протекающие в плазме НВИ, наиболее достоверно описывает модель «радиационного сжатия» [1]. Размеры плазменной точки (ПТ) достаточно малы ( $< 40$  мкм), и излучение занимает короткое время ( $< 10$  нс). Рентгеновское излучение ПТ лежит

в диапазоне линий ионов электродов, плазма имеет параметры  $T_e \sim 1$  кэВ и  $n_e \sim 10^{20} - 10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

Лазеры применяются в различных исследованиях [2], таких как лазерный термоядерный синтез и масс-спектрометрия, используются для создания лазерных источников многозарядных ионов и других.

В случае большой интенсивности излучения, плазма образуется непосредственно при контакте лазерного излучения с поверхностью твердого тела. При измерении рентгеновского излучения лазерной плазмы мы имеем дело как с тормозным и рекомбинационным излучениями, так и с линейчатым излучением.

Выбор детекторов в данной работе обусловлен необходимостью получения достоверных результатов исследований свойств плазмы, не подверженных влиянию электромагнитных помех, которые сопровождают работу сильноточных электроразрядных устройств.

Термолюминесцентные детекторы обладают всеми необходимыми свойствами для использования их при регистрации рентгеновского излучения плазмы. Принцип действия люминесцентных детекторов заключается в том, что образуемые в них под действием ионизирующего излучения носители заряда локализуются в центрах захвата и могут удерживаться в них довольно длительное время, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии излучения, которая может быть высвобождена при дополнительном возбуждении [3]. В случае ТЛД дополнительное возбуждение вызывается нагревом.

После процедуры нагрева детектор теряет информацию о дозе излучения, что позволяет использовать его для новых измерений.



Важно отметить, что ТЛД детекторы не подвержены искажению результатов под действием электромагнитных наводок и обладают линейностью отклика в широком дозовом (от 0,1 мЗв до 10 Зв) и энергетическом диапазоне, в том числе за счет совершенствования технологии их изготовления, обеспечившего значительное улучшение основных характеристик ТЛД.

Существуют типы ТЛД, особо чувствительные к некоторым видам излучения (алюмофосфатное стекло чувствительно к ультрафиолету, ДТГ-4-6 регистрирует тепловое нейтронное излучение). Их можно использовать для отдельной регистрации рентгеновского и УФ-излучений, а также потоков нейтронов и ионов.

Были проведены исследования по совместному облучению алюмофосфатных и литиевых ТЛД на предмет их чувствительности к вакуумному ультрафиолету и мягкому рентгеновскому излучению. Для этого использовались пары детекторов обоих типов с использованием алюминиевых фильтров и без. В результате было показано, что литиевые детекторы ДТГ-4 практически нечувствительны к ультрафиолету, в отличие от алюмофосфатных детекторов (вклад ВУФ в 5 раз больше, чем МР). Поэтому ДТГ-4 можно использовать без фильтра для регистрации низкоэнергетичной (~ 1 кэВ) области рентгеновского излучения. Если детекторы должным образом откалиброваны, то их можно применять и для определения изотропности рентгеновского излучения плазмы.

## **Глава 2**

Во второй главе описана методика применения ТЛД для диагностики рентгеновского излучения импульсной плазмы.

Проведенные исследования свойств ТЛД позволили разработать на их основе малогабаритный помехоустойчивый многоканальный спектрометр. Его конструкция позволяет получать не только данные о спектре излучения, но и определять полную дозу рентгеновского излучения установки, необходимую для определения коэффициента преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения. Использование сборок ТЛД вместо отдельных детекторов увеличивает точность регистрации дозы излучения и позволяет увеличить точность измерения спектра этого излучения и других его параметров. Сборки ТЛД-детекторов закрывались фильтрами различной толщины. Показания с ТЛД считывались с помощью прибора ДВГ-02ТМ. В экспериментах использовались ТЛД, изготовленные из Li-F, активированного Ti. Данный тип детекторов не чувствителен к вакуумному ультрафиолету, что позволяет в ряде случаев не использовать фильтры.

Исходя из полученных данных, строилась кривая ослабления рентгеновского излучения. Для восстановления спектра рентгеновского излучения по кривым ослабления (т.е. решение обратной задачи) применяются методы, в том числе и привлекающие сложные математические модели [4]. Наиболее простой метод решения данной задачи, обладающий достаточной точностью – это метод эффективных энергий [5]. Данный метод основан на том, что кривая ослабления монохроматического рентгеновского излучения представляет собой следующую зависимость:

$$J(x) = J(0) \cdot e^{-\mu(E_0) \cdot x} \quad (1)$$

Где значение отношений интенсивностей излучения, прошедшего через фильтр толщиной  $x$  и без фильтра  $\frac{I(x)}{I(0)} = e^{-\mu(E_0) \cdot x}$ , тогда в полулогарифмических координатах зависимость данного отношения от толщины фильтра представляет собой прямую, тангенс наклона которой  $\mu(E_0)$  (линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения в веществе) для заданной энергии  $E_0$ . Получив зависимость  $\frac{I(x)}{I(0)}$  от толщины фильтра  $x$ , можно определить значение  $E_0$  по значению:

$$\mu(E_0) = \frac{1}{x} \cdot \ln \frac{I(0)}{I(x)} \quad (2)$$

Применение данного метода возможно только в том случае, когда кривая ослабления обладает достаточной кривизной. Преодоление этого недостатка возможно благодаря использованию фильтров поглощения, сделанных из различных материалов, и применению многоканальных спектрометров.

Для решения ряда прикладных задач также определяется коэффициент преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения.

Калибровка используемых детекторов проводилась при помощи эталонных источников и рентгеновских трубок. В ходе калибровки было установлено, что погрешность определения дозы рентгеновского излучения составляет 10 %.

Методика использования ТЛД была опробована в ходе диагностики источника рентгеновского излучения на основе лазерной плазмы установки Искра-5, образующейся при облучении цинковой мишени интенсивным лазерным излучением (первая гармоника

йодного лазера  $\lambda = 315$  нм, энергия 150 Дж). Такого рода эксперименты имеют большое значение в исследованиях.

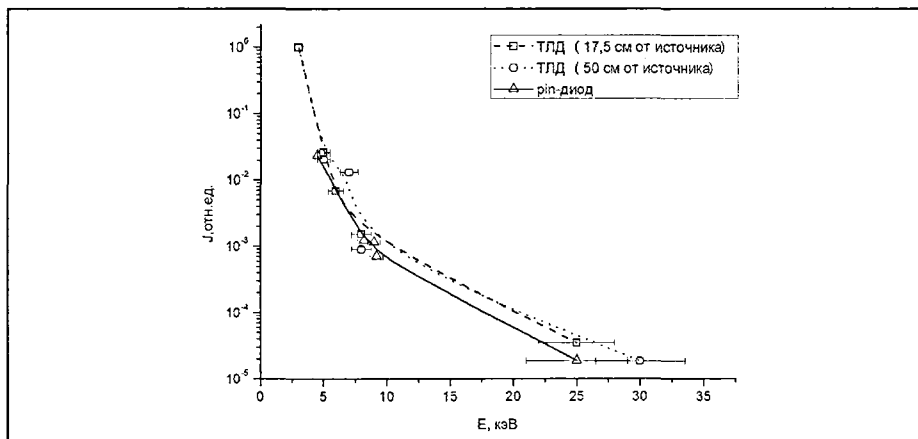


Рис. 1 – Спектр рентгеновского излучения лазерной плазмы, измеренный с помощью полупроводниковых детекторов и ТЛД (эксперимент 1 – 17,5 см от разряда до детекторов и эксперимент 2 – 50 см).

В ходе эксперимента производилось сравнение результатов, полученных при помощи ТЛД (2 эксперимента с расстоянием от плазменного объекта до детекторов 17,5 и 50 см соответственно) и системы диагностики, использующей в качестве чувствительного к излучениям элемента полупроводниковые детекторы (pin-диоды). Целью работы была проверка влияния сильных электромагнитных наводок на работоспособность pin-диодов.

В данном эксперименте поток лазерного излучения  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> падал под прямым углом на плоскую цинковую мишень.

Анализ спектра (Рис. 1) показывает наличие пика излучения в области 3 кэВ, что совпадает с данными, зарегистрированными при помощи pin-диода. Разница между высокоэнергетическим и низкоэнергетическим излучением также получилась около 2-3

порядков. Таким образом, можно говорить о хорошем согласии результатов, полученных с помощью нашей диагностики, и штатной системы рентгеновской диагностики установки, использующей полупроводниковые детекторы.

### Глава 3

Посвящена исследованию зависимости интенсивности и спектра рентгеновского излучения плазмы низкоиндуктивной вакуумной искры (НВИ) от конструкции электродной системы и тока разряда.

Эксперименты производились на экспериментальной установке «Зона-2», которая представляет собой разрядное устройство типа НВИ. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до давления не выше  $10^{-5}$  Торр. Емкость накопительной конденсаторной батареи  $C_0 = 20$  мкФ. Ток разряда достигал величины до 190 кА, период разряда – 8,5 мкс. Конструкция данной установки позволяла использовать различные варианты геометрии электродов (два острия, острие-плоскость, две плоскости и другие комбинации).

Для регистрации рентгеновского излучения плазмы использовались сборки из детекторов ТЛД, расположенных один за другим. Использовался метод фильтров поглощения (семь сборок детекторов за фильтрами различной толщины), метод поглощенной энергии (анализ сигналов с каждого детектора ТЛД одной сборки), метод фильтров Росса (анализ сигналов со сборок, расположенных за фильтрами из различных материалов).

Сборки помещались и крепились в камере за фильтрами поглощения (см. рис. 2 а) из различного материала (Be, Al, Cu) и

толщины (в т.ч. без фильтра). Использование фильтров вносило ограничения диапазона энергии регистрируемых квантов ( $> 4$  кэВ).

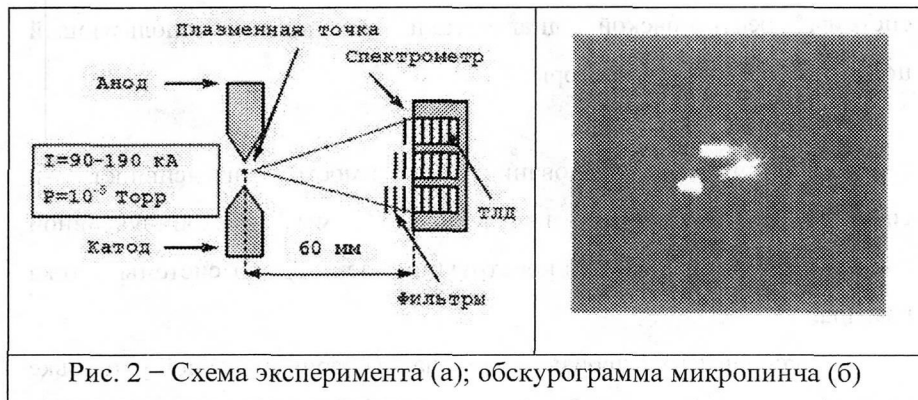


Рис. 2 – Схема эксперимента (а); обскурограмма микропинча (б)

Кроме того, контроль наличия импульсов рентгеновского излучения осуществлялся в реальном времени при помощи *pin*-диода. При помощи рентгеновской камеры-обскуры с пространственным разрешением 30 мкм на данной установке были получены изображения области разряда (рис. 2 б).

Помимо интегрального по времени спектра рентгеновского излучения была определена эффективность преобразования электрической энергии в рентгеновское излучение микропинча. В ходе исследования были произведены измерения с разной формой электродов и различным разрядным током (таблицы 1-2). Характер получившихся спектров одинаков, однако, конфигурация электродов оказывает значительное влияние на интенсивность генерируемого излучения.

В таблице 1 представлены измерения энергии рентгеновского излучения, поглощенной в детекторах, для различных конфигураций электродов. Все измерения проводились при токе разряда  $I = 190$  кА.

Таблица 1 – Результаты измерений при различной конфигурации электродов.

Конфигурация электродов	Е, отн.ед.	Коэффициент преобразования, %
Острие-плоскость	0,20	0,2
Острие-острие	1,00	1,2
Острие-острие(эрозия)	0,15	0,1

В геометрии острие-острие по результатам измерений в 5 раз эффективнее, чем острие-плоскость осуществляется преобразование электрической энергии в энергию рентгеновского излучения. Однако, естественное изменение формы электродов за счет эрозии в результате распыления под воздействием множества разрядов приводит к уменьшению выхода рентгеновского излучения в 7 раз.

Снижение разрядного тока до 130 кА приводит к снижению интенсивности излучения в 2 раза, при этом коэффициент преобразования энергии в пределах погрешности остается неизменным, что хорошо укладывается в рамки радиационной модели.

Дальнейшее снижение тока до 90 кА приводит к нарушению режима пинчевания на данной установке и к уменьшению на порядок коэффициента преобразования энергии.

Таблица 2 – Результаты измерений при различном токе разряда.

Ток разряда, кА	Е, отн. ед.	Коэффициент преобразования, %
190	1,00	1,2
130	0,56	1,2
90	0,03	0,1

Характерный спектр рентгеновского излучения установки остается без изменений до тех пор, пока происходит пинчевание, и вне зависимости от изменения разрядного напряжения.

Таким образом, наибольшая интенсивность рентгеновского излучения достигалась при использовании электродов типа «острие» и разрядном токе 190 кА. Изменение формы электродов, в том числе за счет эрозии в процессе эксплуатации, приводит к многократному снижению эффективности рентгеновского источника.

#### **Глава 4**

В четвертой главе описана методика исследования рентгеновского излучения плазмы при помощи координатно-чувствительного детектора на основе ТЛД.

С использованием фотопленки и камеры-обскуры были получены изображения пространственной структуры плазменного источника рентгеновского излучения. Однако, изучить спектральные характеристики различных излучающих областей в ходе одного эксперимента гораздо сложнее. Способ решения этой задачи был реализован при помощи ТЛД.

Исследования проводились на установке типа НВИ – Зона-2. Характеристики установки приведены в первой главе данной работы. В ходе работы использовалась камера-обскура, представляющая собой диафрагму из свинцовой пластины толщиной 1 мм с отверстием диаметром 0,150 мм. Данная камера-обскура позволяет получить увеличение от 1 до 10 крат с пространственным разрешением порядка 0,5 мм. В экспериментах с рентгеновской фотопленкой расстояние от пленки до оси разряда составляло 150 мм.



Полученная обскурограмма  
сильноточного разряда в режиме  
микроразряда при токе 150 кА  
представлена на рисунке 3. Для  
изучения спектральных характеристик  
выбранных областей был разработан  
координатно-чувствительный

спектрометр на основе ТЛД (LiF),  
позволяющий производить измерения в  
диапазоне энергий 1-30 кэВ. Для  
измерения спектра в данной работе был

использован метод фильтров  
поглощения, а в качестве  
фильтров использовались сами  
ТЛД, расположенные в сборках  
друг за другом.

Схема эксперимента  
представлена на рисунке 4.  
Показания ТЛД считывались  
при помощи прибора ДВГ-  
02ТМ. Разработанный  
спектрометр позволяет с  
точностью до 0,5 мм  
определить координаты  
источника излучения.

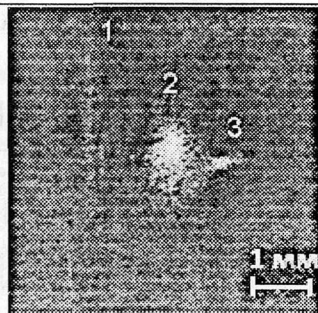


Рис. 3 – Обскурограмма  
разряда (1 – анод;  
2 – приэлектродная плазма;  
3 – плазменная точка)

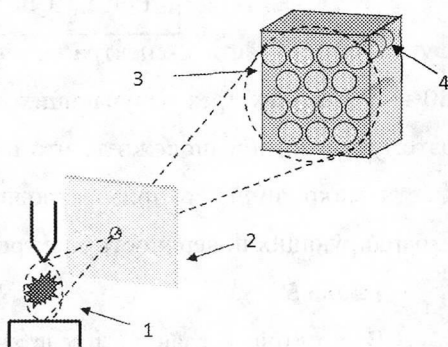
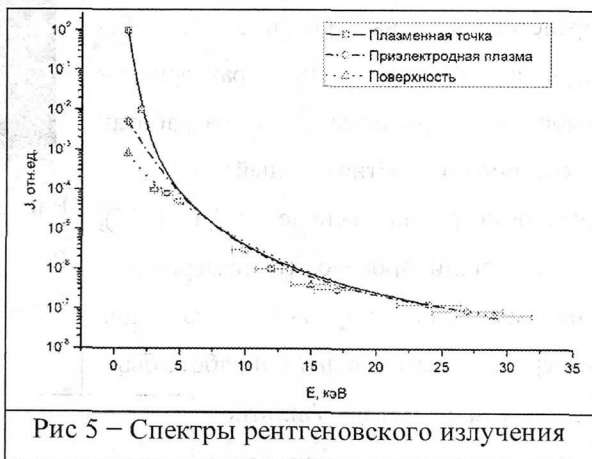


Рис. 4 – Схема эксперимента  
1 – плазменный объект;  
2 – диафрагма; 3 – координатно-  
чувствительный спектрометр;  
4 – ячейка спектрометра, состоящая  
из 10 ТЛД LiF

В ходе работы были получены спектры рентгеновского излучения из основных излучающих областей. Данные представлены в виде графиков и приведены на рисунке 5.

Спектры главным образом отличаются в области 1-5 кэВ. Можно предположить, что излучение в этой области связано с фоторекомбинационным и линейчатым



излучением в области L-спектра ионов железа. При этом часть спектра 5-30 кэВ для всех трех излучающих областей практически одинакова. Поэтому можно предположить, что спектры ускоренных электронов в области микропинча, в приэлектродной плазме, а также электронов, бомбардирующих поверхность электрода, аналогичны.

## Глава 5

В пятой главе представлено исследование спектра рентгеновского излучения, полученного при торможении в мишени вторичных электронов, эмитированных в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда (ППР) [6].

Амплитуда импульсов автоколебаний, возбуждаемых в автоколебательном вторично-эмиссионном разряде (АВЭР), может многократно превышать прикладываемое к коллекторной пластине

отрицательное напряжение, и таким образом определяет особенности спектра высокоэнергетичной группы электронов.

В данной работе впервые реализована рентгеновская диагностика АВЭР, когда спектр высокоэнергетичной ( $> 4$  кэВ) группы электронов восстанавливается по результатам диагностики рентгеновского излучения.

Обычные спектрометрические и контактные зондовые методы изучения распределения высокоэнергетичной группы электронов в плазменном шнуре приводят к значительным возмущениям. Кроме того, они не позволяют реализовать разделение первичного и обратного потока, включающего электроны отраженные и эмитированные поверхностью коллектора.

В качестве детектора использован спектрометр на основе ТЛД. Данный спектрометр содержит 13 каналов регистрации, снаряженных сборками из «таблеток», расположенных одна за другой. Сборки закрываются фильтрами ослабления из алюминиевой фольги.

В первых экспериментах диафрагма располагалась т.о., чтобы ТЛД детекторы регистрировали излучение от первичного пучка при бомбардировке мишени потоком электронов (схема на рис. 6 (а)). Данный режим ППР реализуется при ускоряющем напряжении электронной пушки 5 кВ (ток 0,1 А). Взаимодействие первичного пучка электронов с водородной плазмой (напуск водорода, давление  $10^{-4}$  Торр) влечет за собой бесстолкновительное торможение основной части электронов и доускорение незначительной доли (порядка процента) до энергии, превышающей энергию первичного пучка.

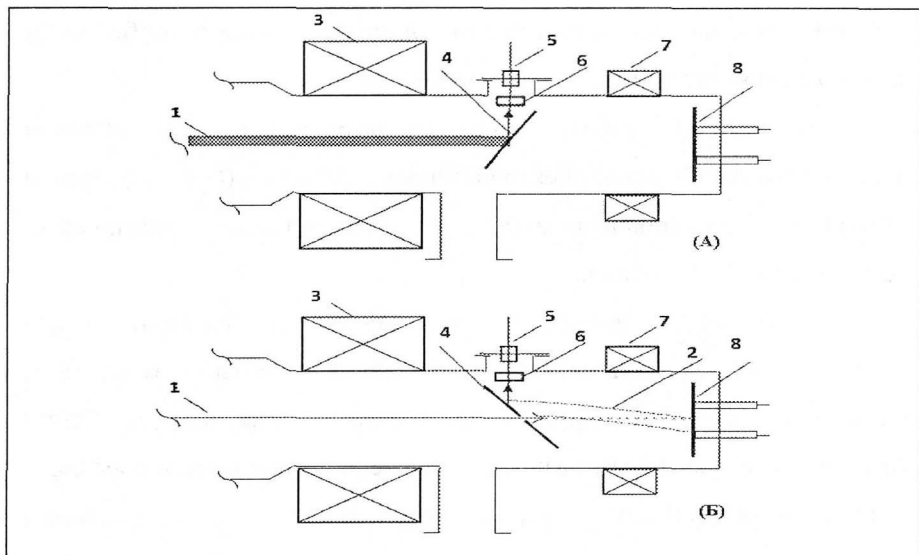


Рис. 6 – Схема измерений на ППР (а); Схема измерений на АВЭР (б)  
 1 – первичный пучок; 2 – обратный поток вторичных и отраженных электронов; 3, 7 – катушки магнитного поля; 4 – молибденовая диафрагма; 5 – шлюзовое устройство; 6 – кассета с ТЛД; 8 – коллекторная пластина.

В последующих экспериментах проводились измерения в режиме АВЭР. Как показано на рисунке 6 (б), при этом реализуется разделение первичного и обратного вторично-эмиссионного потоков. Обратный поток смещается по радиусу кривизны магнитной трубки и попадает на диафрагму (сплошную ее часть), что позволяет зарегистрировать рентгеновское излучение. Получена амплитуда автоколебаний – 600 В, частота – 3 МГц при ускоряющем напряжении пушки – 1,5 кВ, ток эмиссии пушки – 0,1 А. Энергия вторично-эмиссионных электронов не должна превышать 1200 эВ, однако измерения показывают наличие аномального, более жесткого рентгеновского излучения.

На рисунке 7 приведены рентгеновские спектры, полученные в режимах ППР и АВЭР. Сравнение показывает, что доля высокоэнергетичных доускоренных электронов в условиях ППР мала, на что указывает резкий спад интенсивности излучения

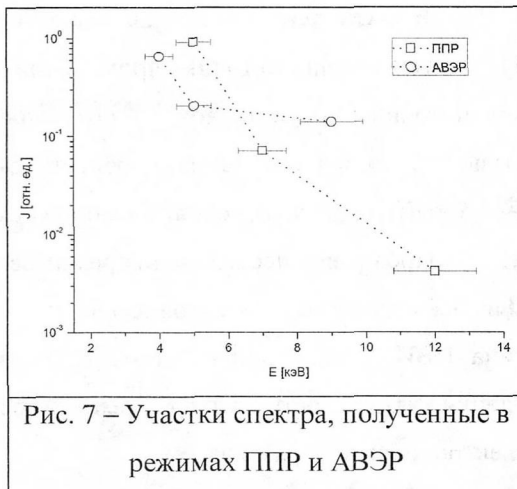


Рис. 7 – Участки спектра, полученные в режимах ППР и АВЭР

при превышении энергии первичных электронов (5 кэВ). В режиме АВЭР рентгеновский спектр излучения отличается принципиально, что может говорить о проявлении значительно большего относительного количества высокоэнергетичных электронов при гораздо более низком ускоряющем напряжении.

При реализации пространственного разделения прямого и обратного потоков ускорение электронов должно происходить только за один пролет между эмиттером и мишенью. Полученный результат может быть связан с эффектом группирования.

Кроме того, эффект аномального ускорения вторичных электронов может быть связан с очень высокочастотными модами автоколебаний. Таким образом, реальное ускоряющее напряжение может значительно превосходить измеряемый потенциал приемной пластины относительно корпуса установки.

**В заключении** представлены основные результаты работы:

- 1) Отработана методика применения ТЛД для диагностики плазмы сильноточных установок, позволившая расширить спектр регистрируемого излучения в область относительно низких энергий ( $\sim 0,5$  кэВ), благодаря использованию спектрометра без фильтров.
- 2) Проведены исследования режимов работы установки типа НВИ. Для исследованных геометрических и токовых параметров установки типа НВИ, предложенная методика позволила дать количественные оценки зависимости выхода рентгеновского излучения от формы электродов и тока разряда.
- 3) Разработан и апробирован координатно-чувствительный детектор рентгеновского излучения на основе ТЛД. Впервые получены спектральные характеристики (в области низких энергий) источников рентгеновского излучения в разряде НВИ.
- 4) Проведены исследования автоколебательного режима пучково-плазменного разряда. Обнаружено наличие высокоэнергетического «хвоста» распределения рентгеновского излучения, который на порядок превосходит результаты, полученные в обычном ППР при большем ускоряющем напряжении. Дана интерпретация полученных результатов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Анциферов П.С., Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. Температура плазменных точек в вакуумно-искровых разрядах. // Физика плазмы. 1990. – т.16. – №8. – С.1018-1023.
- 2) Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. // Москва «Наука», 1989.
- 3) Иванов В.И. Курс дозиметрии. // Москва Атомиздат, 1988.
- 4) Кологривов А.А., Склизов Г.В., Шиканов А.С. Восстановление спектра непрерывного рентгеновского излучения лазерной плазмы по кривым ослабления. // Препринт ФИАН №142. – Москва, 1981.
- 5) Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Методика восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения в ядерно-физическом эксперименте. // Препринт МИФИ № 006-2007. – Москва, 2007.
- 6) Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. //Oxford, 1988.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Додулад Э.И., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование рентгеновского излучения микропинчового разряда при помощи термолюминесцентных детекторов. // Прикладная физика. – №4. – 2013. – С. 23-26. (ВАК)

2) Баловнев А.В., Визгалов И.В., Салахутдинов Г.Х. Применение метода фильтров для диагностики аномальной электрон-электронной эмиссии в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда. // Ядерная физика и инжиниринг. – т.5 – №7-8. – 2014. – С. 649-654. (ВАК)

3) Баловнев А.В., Визгалов И.В., Салахутдинов Г.Х. Диагностика аномальной электрон-электронной эмиссии в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда при помощи метода фильтров и термолюминесцентных детекторов. // Прикладная физика. – №1. – 2015. – С. 40-43. (ВАК)

4) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Применение термолюминесцентных детекторов для диагностики плазменных объектов. // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 1. – С. 100-103. (ВАК)

Application of Thermoluminescent Detectors for Diagnosing Plasma Objects. Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58. – No. 1. – pp. 98–101. (*Original Russian Text published in Pribory i Tekhnika Eksperimenta. – 2015. – No. 1. – pp. 100-103.*) (SCOPUS)

5) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Спектрометрия импульсного рентгеновского излучения плазмы



сильноточного электрического разряда. // Приборы и техника эксперимента. 2015. – № 2. – С. 89-94. (БАК)

Spectrometry of Impulse High-Current Discharge-Plasma X Rays. // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58. – No. 2. – pp. 252-256. (Original Russian Text published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. – 2015. – No. 2. – pp. 89-94.) (SCOPUS)

6) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Координатно-чувствительный спектрометр импульсного рентгеновского излучения для исследования пространственной структуры плазменных объектов.// Приборы и техника эксперимента №6, 2015 С. 67-70. (БАК)

A Position-Sensitive Pulse X-ray Spectrometer for Studying Spatial Structures of Plasma Objects // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58. – No. 6. – pp. 771-773. (Original Russian Text published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. – 2015. – No. 6. – pp. 67-70.) (SCOPUS)

7) Balovnev A.V., Vovchenko E.D., Grigoryeva I.G., Dodulad E.I., Savelov A.S., Salahutdinov G.H. X-ray and ion emission sources in high-current discharge plasma.// Physics Procedia 71 ( 2015 ) 146 – 149 (SCOPUS)

8) Balovnev A. V., Vizgalov I. V. and Salahutdinov G. H. Application of filter method for detection of secondary electron emission in the auto-oscillating mode of beam plasma discharge.// IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 666 (2016) 012010 pp. 1-3 (SCOPUS)

9) Баловнев А.В., Вовченко Е.Д., Григорьева И.Г., Додулад Э.И., Ермаков В.Н., Клячин Н.А., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование рентгеновского излучения плазмы,

образованной в сильноточных импульсных электрических разрядах на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра»// М.: Препринт НИЯУ МИФИ, 2014. – №001-2014.

10) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Литвин А.Д., Додулад Э.И., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование параметров рентгеновского излучения горячей плазмы при помощи термоллюминесцентных детекторов. // Сб. докл. VIII Российской конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». –23-25 октября, 2012 г. – НИЯУ МИФИ, Москва. – С.44.

11) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Комплексное измерение параметров плазмы в сильноточных разрядных установках. // Аннотации докладов Научной сессии МИФИ 2013 . – г. Москва, 2013. – С. 73.

12) Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Додулад Э.И., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование рентгеновского излучения микропинчового разряда при помощи термоллюминесцентных детекторов. // Научная сессия МИФИ 2014. – Москва, 2014. – Т. 2. – С. 97.

13) Баловнев А.В., Визгалов И.В., Салахутдинов Г.Х. Применение метода фильтров для диагностики вторичной электронной эмиссии в автоколебательном режиме пучково-плазменного разряда. // Материалы IX конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 5-7 ноября 2014. – С.99-102.

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

Печ.л. 1.5. Тираж 100 экз.  
Подписано в печать 09.10.2016. Формат 60x84 1/16