

На правах рукописи

САЛАХУТДИНОВ Гаяр Харисович

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ  
И ТРЕКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ**

01.04.08 – физика плазмы

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

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

Автор:

Москва 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
*Баронова Елена Олеговна*

доктор физико-математических наук,  
*Улин Сергей Евгеньевич*

доктор физико-математических наук,  
профессор, *Паперный Виктор Львович*

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

Защита состоится « 27 » 10 2010 г. в 15 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, тел. 324-84-98, 323-25-29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « 14 » сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.В. Евсеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность исследований.** В рамках программы по управляемому термоядерному синтезу наряду с магнитным удержанием плазмы интенсивно развиваются исследования по инерционному термоядерному синтезу. В связи с этим возникает интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам типа Z-пинчей. Это обусловлено исключительно высокой эффективностью преобразования вкладываемой в Z-пинч электрической энергии в энергию рентгеновского излучения, которое воздействует на мишень, содержащую термоядерное топливо, в результате чего и происходит ее сжатие и нагрев. В данных устройствах плазменный объект образуется в прямых сильноточных импульсных разрядах, в которых эффективно реализуется режим сжатия плазмы магнитным полем разрядного тока. К сильноточным импульсным электроразрядным установкам относятся также установки типа «плазменный фокус» и «низкоиндуктивная вакуумная искра». В данных установках образуется плотная ( $n_e > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) высокотемпературная ( $T_e \sim 1 \text{ кэВ}$ ) плазма.

Высокие параметры плазмы, интересные физические процессы, относительная простота конструкции и эксплуатации делает эти установки перспективными как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач в качестве мощных импульсных источников нейтронного и рентгеновского излучения. К таким задачам относятся: материаловедение, разведка полезных ископаемых, моделирование в лабораторных условиях ядерного взрыва, рентгеновская литография и др.

Физическая картина явлений в плазме, получаемой на сильноточных электроразрядных установках, далека еще от полного понимания и является предметом интенсивных исследований, которые невозможно проводить без создания диагностической аппаратуры, позволяющей получать надежную информацию о физических процессах в плазме.

Рентгеновское излучение (РИ) плазмы является одним из основных источников получения такой информации. В импульсных установках оно характеризуется высокой интенсивностью (до  $10^{16}$  квантов за вспышку) и малой длительностью ( $\sim 10^{-8}$  с), имеет довольно сложный спектр с максимумом в области единиц килоэлектронвольт. Мощные электромагнитные помехи, возникшие в момент образования плазмы, могут исказить рабочий сигнал на стадии его формирования и передачи, это требует разработки специальных мер защиты. Поэтому также важно создание помехоустойчивой системы рентгеновской диагностики плазмы, позволяющей проводить исследования РИ плазмы с высокой точностью.

**Цель работы:** создание и разработка диагностической аппаратуры и методов исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения горячей плазмы, которые позволяют дать физическую интерпретацию процессов происходящих в плазменных объектах.

**Научная новизна.** Впервые создан диагностический комплекс, состоящий из многоканальных сцинтилляционных спектрометров импульсного рентгеновского излучения, спектрометров импульсного рентгеновского излучения на основе термолюминесцентных детекторов и ядерных эмульсий, спектрометра нейтронов, магнитного спектрометра электронов, камер-обскур и ряда стандартных приборов, таких, как пояс Роговского, пин-диода, вакуумного фотодиода, позволяющий в полном объеме провести исследования импульсного рентгеновского и корпускулярного излучения плазмы сильноточных разрядов.

Использование сцинтилляционных спектрометров обусловлено высокой эффективностью регистрации РИ используемых в приборе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl),  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , что позволяет проводить исследование РИ плазмы в широком энергетическом диапазоне (1,5÷500 кэВ) за один разряд.

Применение сцинтилляционных кристаллов  $\text{CdI}_2$  и ПС-III, имеющих уникальные временные характеристики, позволило впервые провести исследования динамики спектров однократных импульсов рентгеновского излучения горячей плазмы с временным разрешением не хуже 3 нс. Для обоснованного применения сцинтилляционных кристаллов в спектрометре были впервые проведены исследования сцинтилляционных свойств (зависимость удель-

ного световыхода кристаллов от энергии квантов и плотности потока рентгеновского излучения; наличие «мертвого» слоя на поверхности сцинтиллятора; временные характеристики), наиболее перспективных для использования в диагностике интенсивных рентгеновских потоков кристаллов, и дана интерпретация физических процессов формирования в них сцинтилляционного импульса.

Диагностический комплекс впервые позволил провести следующие исследования.

1. Измерен интегральный по времени спектр импульсного РИ в широком энергетическом диапазоне квантов 1,5 – 500 кэВ плазмы при различных условиях и режимах сильноточного разряда, что позволило дать интерпретацию связи наблюдаемых спектральных характеристик с физическими процессами, происходящими в плазме разряда.

2. Проведены исследования динамики спектров РИ плазмы при различных условиях и режимах сильноточных разрядов, позволившие проследить эволюцию образующихся в разрядах плазменных объектов.

3. Измерена и исследована пространственно-временная структура плазмы при различных режимах и условиях осуществления сильноточных разрядов.

4. Одновременно с рентгеновским спектром измерен с применением откалиброванного магнитного спектрометра спектр электронов плазмы одиночного сильноточного разряда в различных его режимах, что подтвердило наличие в режиме микропинчевого разряда ускорительных процессов.

5. Проведенные одновременно измерения спектров РИ и выхода нейтронов на установках «плазменный фокус» позволили установить влияние ускорительных процессов на образование в плазме жесткого рентгеновского и нейтронного излучений и их взаимосвязь.

6. Исследованы спектры и пространственная структура источников РИ на установке «Магнетор» с удержанием микроволновой плазмы би-дипольной магнитной конфигурацией, позволившие определить область локализации и энергию ускоренных электронов в плазме.

**Научная и практическая ценность работы.** Разработан и создан многофункциональный диагностический комплекс для исследования рентгеновского и корпускулярного излучения плазменных объектов.

Спектрометры и приборы, входящие в данный диагностический комплекс, могут использоваться как в совокупности, так и по отдельности в зависимости от поставленной задачи. Объектом исследования данных приборов могут быть как плазма, так и другие источники рентгеновского и корпускулярного излучения.

Исследованы сцинтилляционные кристаллы и получены результаты наиболее важных для регистрации рентгеновского излучения их сцинтилляционных характеристик (зависимость удельного световыхода кристаллов от энергии квантов и плотности потока рентгеновского излучения, наличие «мертвого» слоя на поверхности сцинтиллятора, временные характеристики), что позволяет с высокой точностью проводить измерения интенсивного РИ горячей плазмы и других источников. Определены механизмы генерации сцинтилляционного импульса, необходимые для разработки новых видов сцинтилляционных кристаллов. Результаты данных исследований позволяют также оптимальным образом осуществлять выбор сцинтилляционного кристалла для решения конкретных задач при регистрации РИ.

Практическое использование диагностического комплекса и разработанных методик позволило дать физическую интерпретацию происходящих в плазме установок типа низкоиндуктивной вакуумной искры и «плазменный фокус» процессов и усовершенствовать методы ее получения.

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

1. Комплекс диагностической аппаратуры для исследования рентгеновского излучения и корпускулярных потоков плазмы сильноточных разрядов, включающий:

- 26-детекторную сцинтилляционную помехоустойчивую систему спектрометров, позволяющую проводить измерения спектрального состава однократных импульсов РИ в диапазоне от 1,5 до 500 кэВ в комплекте с малогабаритным магнитным спектрометром электронов;

- многодетекторный сцинтилляционный спектрометр рентгеновского и нейтронного излучения с наносекундным временным разрешением не более 3 нс;

- компактный помехоустойчивый многодетекторный спектрометр РИ на основе сборок термолюминесцентных детекторов;

- спектрограф на основе сборки ядерных эмульсий для исследования спектрального состава пространственной структуры РИ плазменных объектов.

2. Методы и результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости, временных параметров, линейности отклика, наличия «мертвого» слоя наиболее перспективных для регистрации интенсивного РИ сцинтилляционных кристаллов ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , LSO, CsI(Tl),  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ ,  $\text{CdI}_2$ , ПС-III), в том числе и разработанных при участии автора, позволяющих эффективно использовать их в спектрометрии импульсного высокоинтенсивного рентгеновского излучения.

3. Методику проведения пространственно-временных исследований плазменных объектов Z-пинчей.

4. Результаты измерения интегрального по времени спектра импульсного РИ в диапазоне квантов 1,5 – 500 кэВ плазмы при различных условиях и режимах сильноточного разряда, позволившие интерпретировать связь спектральных характеристик с происходящими в плазме разряда физическими процессами.

5. Результаты пространственно-временных исследований структуры плазменных объектов и динамики спектров импульсного РИ при различных условиях и режимах разряда, интерпретированные в рамках модели радиационного сжатия с учетом ускорительных процессов.

6. Методику и результаты измерения относительной величины преобразования вложенной в разряд электрической энергии в энергию РИ в диапазоне энергий квантов 1,5÷500 кэВ.

7. Результаты измерения одновременного с рентгеновским спектром, спектра электронов плазмы одиночного сильноточного разряда в различных его режимах, подтвердившие наличие в режиме микропинчевого разряда ускорительных процессов.

8. Экспериментально подтвержденный факт последовательного разогрева плазмы в процессе формирования микропинчевой области в сильноточных импульсных разрядах.

9. Результаты одновременного измерения спектров рентгеновского излучения и выхода нейтронов на установках «плазменный фокус», позволившие установить влияние ускорительных процессов на образование в плазме жесткого рентгеновского и нейтронного излучений и их взаимосвязь.

10. Результаты исследования спектров и пространственной структуры источников рентгеновского излучения на установке «Магнетор» с удержанием микроволновой плазмы би-дипольной магнитной конфигурации, позволившие определить область локализации и энергию ускоренных электронов в плазме.

**Авторский вклад.** Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны лично автором.

**Апробация работы.** Результаты проведенных по теме диссертации исследований докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях, симпозиумах и школах, на научных конференциях и сессиях МИФИ: VI Всесоюзном совещании «Физика, химия и технология люминофоров». Ставрополь, 11 октября 1989 г.; 2-й Всесоюзной школе-семинаре по твердотельным трековым детекторам и автордиографии. Одесса, 1 – 7 июня 1989 г.; 5-м Всесоюзном совещании по диагностике высокотемпературной плазмы. Минск, 18 – 22 июня 1990 г.; II Всесоюзном совещании по радиационной плазмодинамике. г. Кацевели, сентябрь 1991 г.; 6-м Совещании по диагностике высокотемпературной плазмы. С.-Петербург, май – июнь 1993; Семинаре «Физика быстропотекающих плазменных процессов», май 1992 г. Гродно, респ. Беларусь; X Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». г. Троицк, 8 – 13 июня 2003 г.; VI Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике. Москва, 2003 г.; V Российском семинаре «Современные средства диагностики веществ и окружающей среды». 27 – 29 июня 2006 г. Москва, МИФИ, 2006 г.; XII Всероссийской конференции «Динамика высокотемпературной плазмы». 3 – 9 июня 2007 г., г. Звенигород Московской обл.; International Congress on Plasma Physics 2008. FUKUOKA International Congress Center. FUKUOKA. Japan. September 8 – 12. 2008. P. 79; VI Российском семинаре «Современные средства диагностики плазмы и их применение для кон-



троля веществ и окружающей среды». Москва. МИФИ. 22 – 24 октября 2008 г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 39 печатных работах, включая статьи в реферируемых журналах (13 статей из списка ВАК), в тезисах конференций различного уровня, симпозиумов и семинаров, препринтах, статьях сборников научных трудов. Список основных публикаций представлен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, библиографии. Работа изложена на 212 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 7 таблиц и список литературы из 236 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 установкам, генерирующим плазменные объекты на основе сильноточного импульсного электрического разряда – Z-пинча.

Установки типа «плазменный фокус» и «низкоиндуктивная вакуумная искра» относятся к сильноточным импульсным электроразрядным установкам. Подчеркнута перспективность использования данных установок как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач. Физика процессов, происходящих в плазме данных установок, далека от полного понимания. Исследования проводились на установках ПФМ-72, «Зона-2» (низкоиндуктивная вакуумная искра), разработанных в МИФИ, и установках типа «плазменный фокус». Установки ПФМ-72 и «Зона-2» представляют собой низкоиндуктивную вакуумную искру с инициацией разряда от вспомогательных разрядных устройств эрозийного типа. Рабочей средой разряда служили продукты эрозии материала электродов. Сила тока в разряде в экспериментах изменялась в пределах

$I \approx 30 - 250$  кА, период разряда  $T = 5 - 8,5$  мкс. Установка «плазменный фокус» (ПФ) 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 и сконструирована таким образом, что во время измерений в «поле зрения» диагностических устройств оказывается вся область пинчевания плазменной оболочки.

В ходе эксперимента камера наполнялась аргоном (давление  $\approx 2$  Тор), дейтерием (давление  $\approx 10$  Тор) или смесью этих газов.

Указано, что в настоящее время существует несколько моделей физических процессов, протекающих в плазме разряда, получаемой на данных установках. Однако все существующие модели и экспериментальные работы оставили открытым важный вопрос: каково место кинетических эффектов и ускорительных процессов в физической картине образования плазмы, практически слабо исследованы механизмы генерации жесткого РИ. Для исследования данных вопросов необходимо создать комплекс диагностической аппаратуры, позволяющий проводить исследования спектральных характеристик импульсного РИ плазмы в широком энергетическом диапазоне квантов (1,5 – 500 кэВ), а также проводить исследования динамики спектров рентгеновского излучения плазмы в процессе одного разряда в различных режимах.

**Вторая глава** посвящена методике исследования импульсного РИ горячей плазмы. Проводится анализ методов спектрометрии импульсного РИ горячей плазмы.

Показано, что решить поставленные задачи возможно лишь с помощью метода фильтров поглощения, реализованного на основе многодетекторных сцинтилляционных систем, обладающих высокой чувствительностью и эффективностью регистрации РИ.

В работе описан лабораторный стенд, созданный на основе импульсной рентгеновской трубки, позволяющий совершенствовать методы спектрометрии импульсного РИ. Лабораторный стенд был также использован для отработки и проверки работоспособности разработанных методов восстановления спектров импульсного РИ, основанных на методе эффективных энергий и математическом

моделировании процессов регистрации РИ. Данный метод показал хорошую точность восстановления спектра импульсного РИ.

**Третья глава** посвящена проблемам регистрации РИ плазменных объектов с помощью сцинтилляционных детекторов.

При использовании сцинтилляционных кристаллов для регистрации РИ плазмы следует учесть ряд факторов, которые могут существенно исказить результаты измерений, а именно:

- наличие «мертвого» слоя на поверхности сцинтиллятора;
- зависимость удельного световыхода сцинтилляционного кристалла от энергии рентгеновских квантов;
- зависимость удельного световыхода сцинтилляционного кристалла от плотности потока РИ, поглощенного в сцинтилляторе.

Исследование наличия «мертвого» слоя на поверхности сцинтилляционных кристаллов определялось методом коллимированного источника  $\alpha$ -частиц. Были исследованы поверхности кристаллов:  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , LSO,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ ,  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ ,  $\text{CdI}_2$ , ПС-III.

«Мертвый» слой был обнаружен лишь у кристаллов  $\text{CsI(Tl)}$  и  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ . Толщина «мертвого» слоя кристалла  $\text{CsI(Tl)}$  составляла при нормальных условиях  $0,08 \pm 0,03$  мкм. При воздействии влаги на поверхность кристалла этот слой может достигать величины 2,0 мкм.

Исследование зависимости удельного световыхода от энергии квантов проводилось в энергетическом диапазоне 1,5 – 662 кэВ для кристаллов:  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , LSO,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ ,  $\text{CdI}_2$ , ПС-III; в диапазоне от 4,5÷662 кэВ для кристаллов:  $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Na)}$ ,  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ ,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (рис. 1). Для всех полученных кривых характерным является наличие ярко выраженных минимумов в области  $K$ - и  $L$ -краев поглощения элементов, входящих в состав сцинтилляторов. Сложный вид этих зависимостей определяется совместным влиянием, по крайней мере, двух основных факторов – физикой взаимодействия рентгеновского и гамма-излучения с атомами вещества и физически – процессами формирования сцинтилляционного сигнала.

Исследование зависимости удельного световыхода кристаллов  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , LSO,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ ,  $\text{CdI}_2$ , ПС-III от интенсивности потока РИ проведено на мощных импульсных рентгеновских трубках и на установке «Низкоиндуктивная вакуумная искра» с исполь-

зованием в качестве опорных термолюминесцентных детекторов. Результаты исследования показали, что наблюдаемый для всех кристаллов спад световыхода в наименьшей степени проявляется у кристаллов  $\text{CdI}_2$  и  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$  и составляет менее 10 %.

Кроме описанных выше кристаллов исследованы сцинтилляционные характеристики кристаллов нового типа на основе сложных оксидов элементов третьей группы. Данные кристаллы представляют интерес в связи с тем, что могут одновременно использоваться как сцинтилляционные и трековые детекторы.

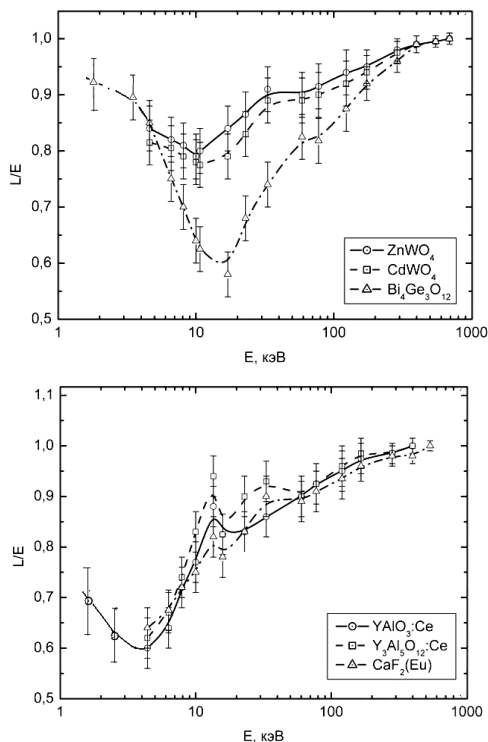
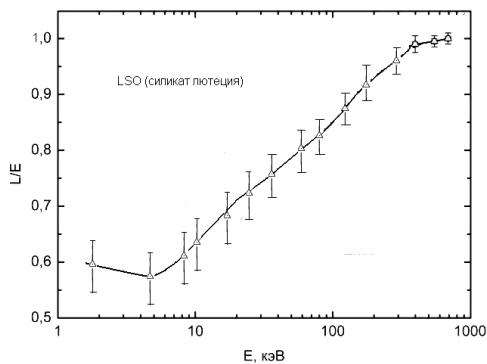
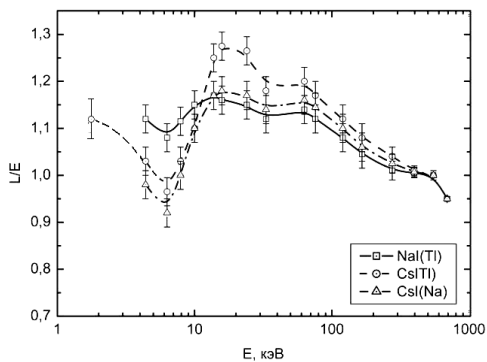


рис. 1



**Рис. 1.** Зависимость удельного световыхода от энергии гамма- и рентгеновских квантов для впервые исследованных сцинтилляционных кристаллов

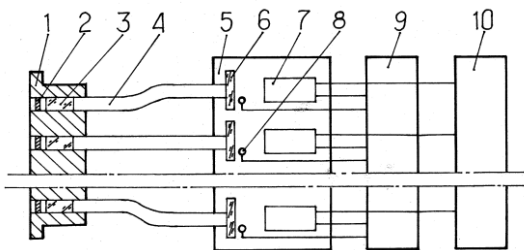
В работе также приведены результаты экспериментальных исследований зависимости энергетического разрешения сцинтилляторов от энергии гамма-квантов; зависимости световыхода кристаллов от температуры; временные характеристики кристаллов.

**В главе четыре** описана конструкция, алгоритм работы и функциональная схема аппаратуры, входящей в единый диагностический комплекс, состоящий из многоканальных сцинтилляционных спектрометров импульсного РИ, спектрометров импульсного РИ на основе термолуминесцентных детекторов и ядерных эмульсий, спектрометра нейтронов, магнитного спектрометра электронов,

камер-обскур и набора коллиматоров. Приборы, входящие в диагностический комплекс, взаимно дополняют друг друга.

Для проведения измерений спектрального состава однократных импульсов РИ плазмы в диапазоне энергий  $1,5 \div 500$  кэВ созданы три многодетекторных сцинтилляционных спектрометра, состоящих из 15, 7 и 4 каналов детектирования. Приборы использовались для регистрации РИ плазмы в различных диапазонах энергий  $1,5 \div 200$  кэВ,  $100 \div 400$  кэВ и  $200 \div 500$  кэВ.

В 15-детекторном спектрометре все 15 каналов регистрации РИ построены по следующей схеме: рентгеновский фильтр поглощения, сцинтиллятор, оптический световод, оптический фильтр коррекции, ФЭУ-85 (рис.2). В данном спектрометре используются детекторы из  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$  и  $\text{CsI(Tl)}$  ( $\varnothing 8 \times 15$  мм). Использование оптических волоконных световодов в спектрометре позволило создать компактную конструкцию детекторной части прибора ( $\varnothing 80 \times 30$  мм) и снизить воздействие электромагнитных наводок на его электронную часть.



**Рис. 2.** Функциональная схема многоканального сцинтилляционного спектрометра однократных импульсов РИ: 1 – корпус детекторной части спектрометра; 2 – фильтры РИ; 3 – сцинтилляторы; 4 – волоконные оптические световоды; 5 – блок фотоэлектронных умножителей; 6 – оптические фильтры; 7 – фотоэлектронные умножители; 8 – контрольные световоды; 9 – блок контроля калибровки и стабильности ФЭУ; 10 – система регистрации

Высокая чувствительность и эффективность регистрации РИ в 7-детекторном спектрометре достигнута за счет использования кристаллов  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  ( $\varnothing 15 \times 20$  мм) в непосредственном контакте с миниатюрными ФЭУ-60. Использование ФЭУ-60 позволило создать компактный прибор.

Для того, чтобы существенно расширить энергетический диапазон исследований рентгеновского спектра плазмы, был разработан

4-канальный спектрометр. Прибор построен по традиционной схеме: фильтр поглощения + сцинтилляционный кристалл + фотофильтр + ФЭУ. Для увеличения эффективности регистрации и точности измерений использованы кристаллы больших размеров:  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  ( $\varnothing 30 \times 35$ ),  $\text{CsI(Tl)}$  ( $\varnothing 30 \times 35$ ),  $\text{NaI(Tl)}$  ( $\varnothing 30 \times 50$ ) в сочетании со спектрометрическим ФЭУ-85. Данный спектрометр позволял проводить исследования в области до 550 кэВ.

В спектрометрах использовались фильтры поглощения из различных материалов: алюминия, меди, свинца.

В целом диагностическая система спектрометров имеет следующие технические характеристики:

- энергетический диапазон исследуемого РИ – 1,5 – 500 кэВ;
- нижний порог регистрации РИ, прошедшего через фильтр поглощения, – 30 кэВ;
- динамический диапазон интенсивности измеряемого РИ –  $10^{14}$ ;
- время обработки сигналов – 300 мкс.

Другой частью сцинтилляционного диагностического комплекса являлся 5-детекторный спектрометр РИ с наносекундным временным разрешением, предназначенный для исследования динамики спектров однократных импульсов РИ горячей плазмы. В приборе используются сцинтилляторы  $\text{PbS-III}$  и  $\text{CdI}_2$  с временем высвечивания сцинтилляционного сигнала 1,5 нс и временные ФЭУ-87. В экспериментах также использовались ФЭУ СНФТ8. В качестве регистраторов сигналов использовались осциллографы С9-4А, С8-14 и различные осциллографы фирмы TECTRONIX. Спектрометр был откалиброван на специальных калибровочных стендах, включающих наносекундный импульсный источник РИ МИРА-2Д. Прибор имеет следующие технические характеристики:

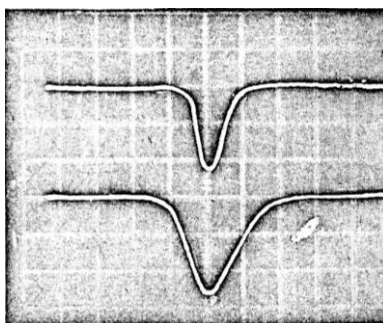
- число детекторов – 5;
- энергетический диапазон исследуемого РИ – 1,5 ÷ 100 кэВ;
- нижний порог регистрации РИ, прошедшего через фильтр поглощения (суммарная поглощенная энергия РИ), – 0,5 МэВ;
- динамический диапазон интенсивности измеряемого РИ –  $10^6$ ;
- ширина аппаратной линии  $\tau_{0,1}$  – 4 нс с использованием ФЭУ СНФТ8,  $\tau_{0,1}$  – 6 нс с ФЭУ-87.

Алгоритм проведения исследования динамики спектров РИ с помощью спектрометра следующий.

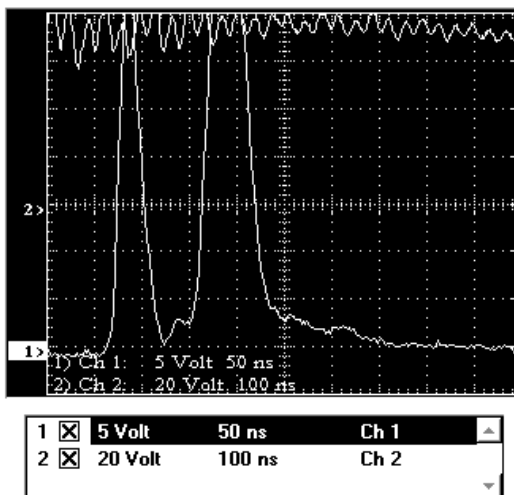
1. Фотографируются осциллограммы сигналов, полученные с каналов спектрометра, имеющих фильтры поглощения различной толщины и показывающие изменение интенсивности РИ за данные фильтры (рис. 3а, 3б, 3в).

2. Проводится обработка полученных осциллограмм и на основе результатов обработки строится зависимость интенсивности РИ от времени для различных каналов регистрации (с фильтрами поглощения различной толщины). Точки полученных зависимостей для определенного момента времени представляют собой кривую ослабления в данный момент времени. Такие кривые ослабления можно построить практически для любого момента времени микроразрядного разряда.

**Рис. 3а.** Фотографии осциллограмм сигналов с двух каналов спектрометра с фильтрами поглощения различной толщины из Al: 6 мкм (нижний луч) и 500 мкм (верхний луч) (масштаб временной оси абсцисс 50 нс)

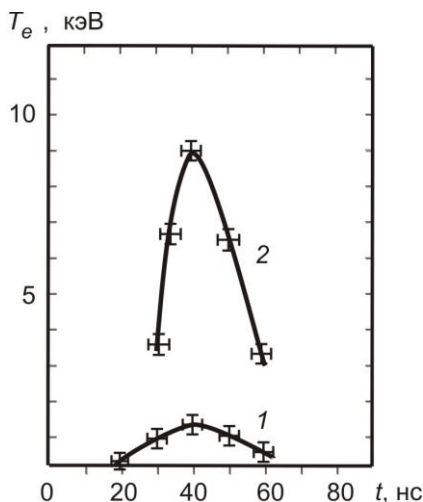
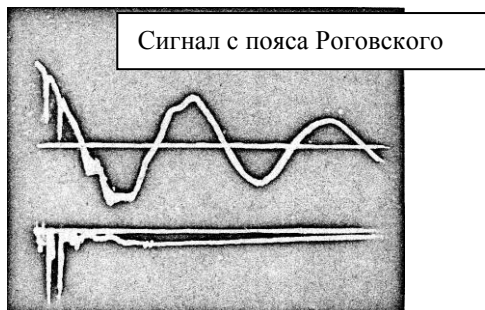


**Рис. 3б.** Фотография осциллограммы, полученной на установке «Зона-2» (фильтр поглощения 6 мкм из Al)





**Рис. 3в.** Фотография осциллограммы с микросекундной разверткой сигналов с пояса Роговского и канала спектрометра с фильтром поглощения 6 мкм из Al. Отчетливо видны «особенности» и сигналы РИ



**Рис. 4.** Эволюция температуры электронной компоненты плазмы микропинчевого разряда: 1 – «холодная» область рентгеновского спектра; 2 – «горячая» область рентгеновского спектра

3. Из полученных данным по кривым ослабления методом эффективных энергий получают спектры РИ плазмы в различные моменты времени от начала пинчевания, и таким образом определяется временная зависимость электронной температуры в процессе разряда (рис. 4).

Для измерения спектра РИ в области 1,0÷25 кэВ создан компактный ( $\varnothing$  30×30 мм) спектрометр рентгеновского излучения на основе ТЛД. Данный спектрометр мог размещаться в разрядной камере.

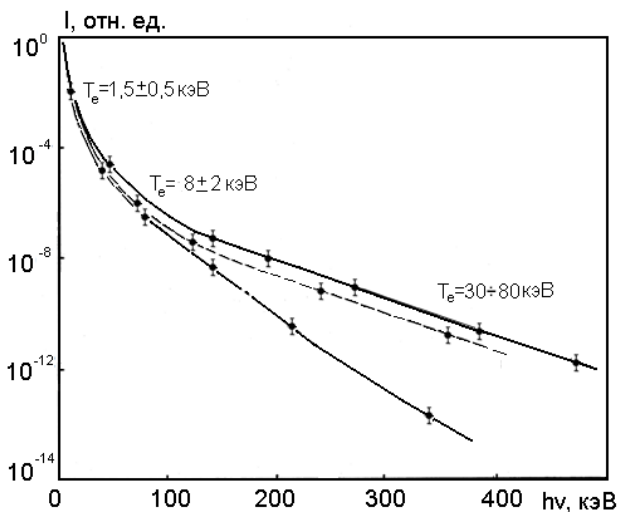
Для исследования спектрального состава пространственной структуры плазменных объектов и для измерения энергетических спектров электронов использовались системы детектирования, построенные на основе ядерных эмульсий.

Для измерения спектра электронов плазмы совместно с измерением спектра РИ был разработан портативный магнитный спектрометр электронов. Определенный в результате калибровки на электронном пучке интервал измерения энергии составил  $20 \leq E_e \leq 500$  кэВ.

**В пятой главе** приводится описание и результаты экспериментов по исследованию рентгеновского и электронного излучения плазмы, генерируемой на установках ПФМ-72 и «Зона-2» при различных режимах сильноточного разряда.

В ходе экспериментов кроме вышеуказанной аппаратуры, входящей в комплекс, использовались и другие диагностические средства (пояс Роговского, бипланарный вакуумный фотодиод, пиндиоды, вакуумная и воздушная камера-обскура, наборы коллиматоров).

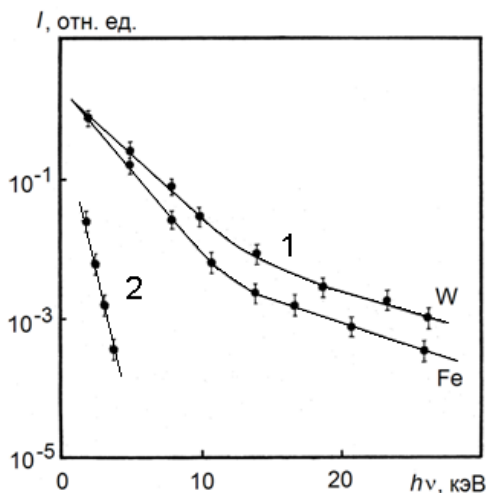
В ходе экспериментов были получены интегральные по времени спектры РИ однократных сильноточных разрядов в режиме микропинчевания (рис.5), позволяющие связать наблюдаемые спектральные характеристики с физическими процессами, происходящими в плазме разряда. Исследования проводились в диапазоне энергий рентгеновских квантов  $1,5 \div 500$  кэВ. Различные участки спектра отвечают различным стадиям микропинчевого разряда ( $h\nu \approx 1,5 \div 15$  кэВ – стадия формирования микропинча;  $h\nu \approx 15 \div 85$  кэВ – стадия развала микропинча; излучение с  $h\nu \geq 85$  кэВ связано с развитием ускорительных процессов). Часть спектра в диапазоне энергий до 85 кэВ отличается высокой повторяемостью от импульса к импульсу и хорошо согласуется с моделью радиационного сжатия; в диапазоне  $h\nu \geq 85$  кэВ спектр меняется случайным образом от разряда к разряду.



**Рис. 5.** Типичные спектры излучения плазмы с электродами из железа, полученные при токе разряда 150 кА.

На рис. 6 показаны типичные спектры РИ плазмы W и Fe сильноточных разрядов, осуществленных в различных режимах, в диапазоне энергий квантов  $2 \text{ кэВ} < hv < 30 \text{ кэВ}$ . Видна слабая зависимость спектра от материала электродов. При токах разряда в железе  $< 50 \text{ кА}$  режим микропинчевания не наблюдается. Это соответствует расчетному значению критического тока (для плазмы железа  $I_{\text{кр}} \sim 50 \text{ кА}$ ), определяемого балансом между потерями энергии на излучение и джоулевым тепловыделением в канале разряда. При значениях тока разряда выше значения критического тока наступит режим микропинчевания.

Проведенные исследования динамики спектра РИ плазмы сильноточного разряда в микропинчевом режиме позволили проследить эволюцию плазменного объекта в ходе разряда, а также получить зависимость температуры электронной компоненты плазмы от времени (см. рис. 4). Динамика спектра хорошо совпадает с представлениями модели радиационного сжатия.



**Рис. 6.** Типичные спектры излучения: 1 – плазмы W и Fe микропинчевого разряда в диапазоне  $1,5 \text{ кэВ} < h\nu < 30 \text{ кэВ}$  при токе разряда 150 кА; 2 – при токе разряда  $< 50 \text{ кА}$

Использование камер-обскур и коллиматоров (рис. 7) в совокупности с регистрацией излучения во времени позволило провести исследование пространственно-временной структуры плазмы, которое показало, что микропинч является источником мягкого РИ, а в момент его распада возникает импульс жесткого РИ длительностью не более 8 нс.

Эксперименты по непосредственной регистрации электронов магнитным спектрометром (рис.8) с одновременным измерением спектра РИ (см. рис. 5) показали, что высокоэнергетичная часть этих спектров ( $> 100 \text{ кэВ}$ ) коррелирует между собой. Наличие высокоэнергетичных электронов в спектре соответствует наличию высокоэнергетичного РИ ( $h\nu > 100 \text{ кэВ}$ ) в рентгеновском спектре, что указывает на наличие ускорительных процессов, приводящих к возникновению данного излучения. Как и рентгеновские спектры, спектры электронов имеют хорошую повторяемость в области энергий до 80 кэВ, далее спектр меняется случайным образом от разряда к разряду аналогично рентгеновскому спектру. Непостоян-

ство спектра определяется вероятностным характером протекания ускорительных процессов.



Рис. 7. Типичная обскурограмма микропинчового разряда

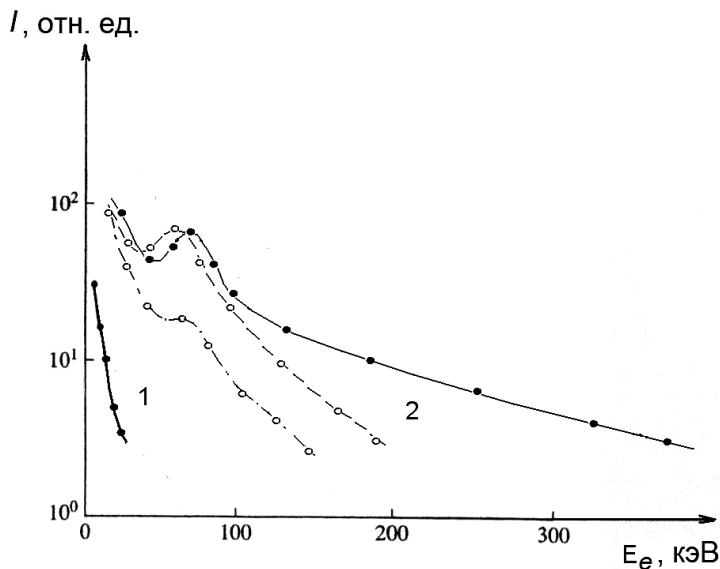


Рис. 8. Спектры быстрых электронов из плазмы железа при различных значениях тока разряда: 1 –  $< 50$  кА; 2 – 150 кА (три последовательных разряда)

Исследования спектрального состава рентгеновского излучения пространственной структуры микропинчового разряда (приэлектродной плазмы, системы электродов, микропинча) с использованием ядерной эмульсии дали одинаковые спектры для всех структур мик-

ропинчезого разряда. Использование ядерной эмульсии позволило получать изображения плазменных объектов с высоким пространственным разрешением одиночных сильноточных разрядов.

Наиболее важные физические результаты, полученные в ходе экспериментов на установках ПФМ-72 и «Зона 2», могут быть суммированы следующим образом:

- 1) обнаружены пороговые режимы пинчевания;
- 2) экспериментально подтверждено наличие в плазме микропинчезого разряда электронов с энергией до 400 кэВ, что свидетельствует о наличии ускорительных процессов;
- 3) экспериментально подтвержден последовательный разогрев плазмы в процессе формирования микропинчезой области в сильноточных импульсных разрядах;
- 4) определена временная зависимость электронной температуры в процессе формирования и развала микропинчезой области;
- 5) проведены пространственно-временные исследования плазмы сильноточных разрядов.

**В шестой главе** проводятся результаты экспериментов по исследованию импульсного рентгеновского и нейтронного излучений плазмы, получаемой на установках плазменный фокус (ПФ). Рассмотрены основные механизмы и физические процессы, протекающие в плазмофокусном разряде. Обсуждаются вопросы применения установок ПФ в современных технологических процессах.

Приведены результаты исследования спектра импульсного РИ плазмы в диапазоне энергий квантов  $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 500 \text{ кэВ}$ . Характер спектров РИ плазмы, получаемой на установке «Плазменный фокус», имеет большое сходство со спектром РИ плазмы, получаемой на установке типа низкоиндуктивной вакуумной искры, работающей в режиме микропинчезого разряда.

Плазма, образованная в разрядной камере, заполненной Ag, обладает достаточно устойчивой картиной спектра РИ в отличие от плазмы, образованной в дейтерии. Вид спектра РИ в случае с дейтерием зависит от выхода нейтронного излучения. Чем выше абсолютный выход нейтронного излучения, тем интенсивней спектральная составляющая жесткого РИ с энергией  $h\nu \geq 100 \text{ кэВ}$ .

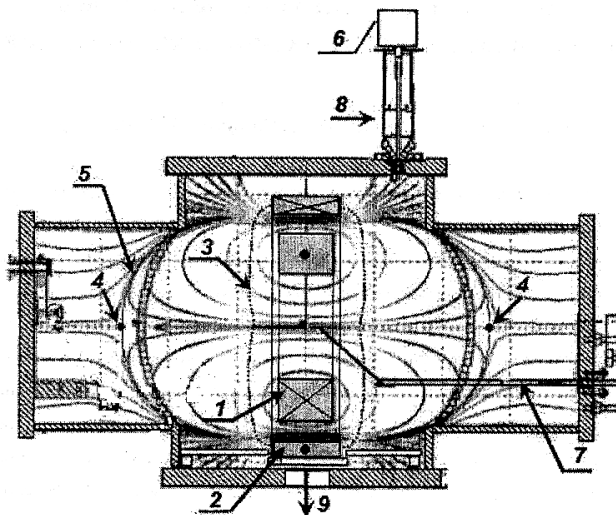
Результаты одновременного измерения спектров РИ и выхода нейтронов на установках «плазменный фокус» позволили устано-

вить влияние ускорительных процессов на образование в плазме жесткого рентгеновского и нейтронного излучений и их взаимосвязь.

Плазменные объекты, генерируемые на установках ПФ, являются мощным импульсным источником электромагнитных, корпускулярных и плазменных потоков. Именно эти свойства плазмы и необходимы для дальнейшего развития технологий создания новых материалов.

**Седьмая глава** посвящена исследованию высокоэнергетических электронов плазмы СВЧ-разряда в конфигурации би-дипольной магнитной ловушки «Магнетор» по анализу РИ.

Схематичный вид установки «Магнетор» представлен на рис. 9.



**Рис. 9.** Схематичный вид установки «Магнетор»: 1 – основная катушка; 2 – дополнительная катушка; 3 – поверхность с  $B_{рез} = 875$  Гс; 4 – нуль магнитного поля; 5 – сепаратриса; 6 – магнетрон; 7 – зонд; 8 – ввод СВЧ-мощности; 9 – вакуумная откачка

Магнитная конфигурация образована двумя размещенными внутри разрядной камеры вложенными одна в другую катушками, находящимися на одной оси и имеющими общий центр, токи в которых имеют противоположное направление. В данной установке плазма формируется за счет нагрева электронов СВЧ-полем в об-

ласти электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР). Рабочие давление в газе  $10^{-5}$  Тор. В качестве источника СВЧ-излучения используется магнетрон мощностью 1 кВт с частотой генерации 2,45 ГГц. Основной гармонике ЭЦР соответствует магнитное поле  $B_{res} = 875$  Гс.

Как известно, наиболее благоприятными областями для генерации быстрых ЭЦР-электронов являются области, где магнитные силовые линии параллельны резонансным поверхностям с равной напряженностью поля ( $B = B_{рез}$ ,  $B = B_{рез}/2$ ,  $B = B_{рез}/3$  и др.) В нашем случае такие условия выполняются в областях вблизи внутренней катушки.

Регистрация высокоэнергетичных электронов возможна по анализу РИ, возникающего при взаимодействии этих электронов с элементами конструкции установки или в самой плазме при торможении на ионах. Для определения положения и формы источника РИ была проведена серия экспериментов с камерой-обскурой, дополнительно проведены эксперименты с системами, коллимирующими РИ. Коллиматор был закреплен в боковой трубке параллельно плоскости токовых колец. Благодаря коллимирующей системе излучение передает реальные размеры и структуру объекта, исключая засветку рентгеновскими квантами из соседних областей. Результаты экспериментов показаны на рис. 10а, 10б, где четко определена область РИ, соответствующая области локализации быстрых электронов.

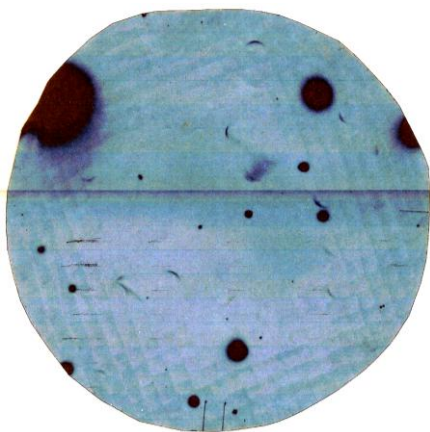
Спектр РИ измерялся с помощью термомлюминесцентных детекторов. Результаты экспериментов представлены на рис. 11.

В результате проведенных экспериментов обнаружено, что основной причиной возникновения РИ в установке «Магнетрон» является взаимодействие быстрых электронов с бандажом внутренней катушки. Это вызвано тем, что часть силовых линий, на которых происходит интенсивная передача энергии электронам от СВЧ-поля, пересекает край бандажа внутренней катушки (верхний край). Несмотря на это, энергия быстрых электронов достигает 25 кэВ.

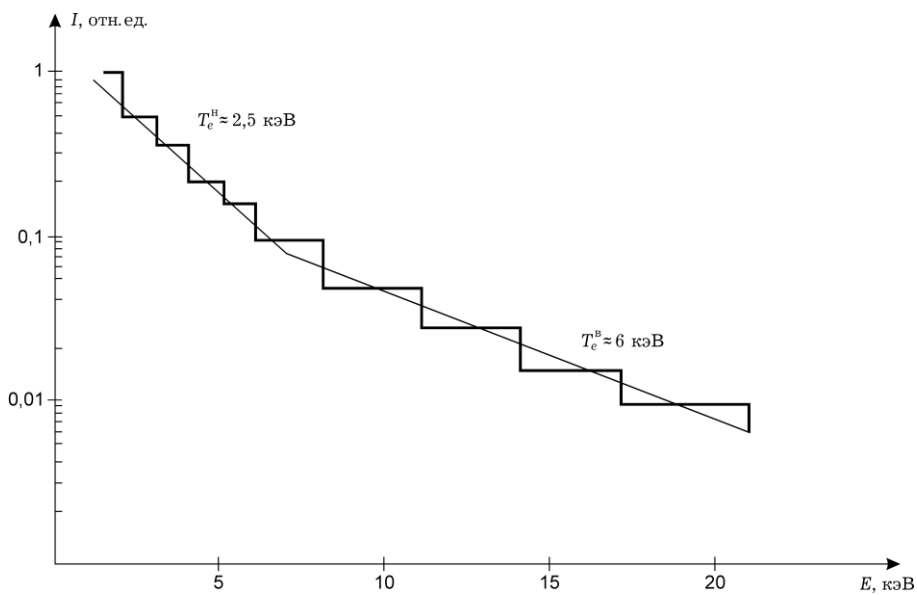




**Рис. 10а.** Обскурограмма плазмы установки «Магнетрон»



**Рис. 10б.** Рентгеновское изображение плазменного объекта установки «Магнетрон» (фронтальный вид)



**Рис. 11.** Спектр РИ на установке «Магнетрон»

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертации.

## **Основные результаты и выводы диссертационной работы**

1. Разработан комплекс диагностической аппаратуры для исследования РИ и корпускулярных потоков плазмы сильноточных разрядов, включающий:

- 26-детекторную сцинтилляционную помехоустойчивую систему спектрометров, позволяющую проводить измерения спектрального состава однократных импульсов РИ в широком энергетическом диапазоне от 1,5 до 500 кэВ;
- многодетекторный сцинтилляционный спектрометр рентгеновского и нейтронного излучений с наносекундным временным разрешением не хуже 3 нс;
- компактный помехоустойчивый многодетекторный спектрометр РИ на основе сборок термолюминесцентных детекторов;
- спектрограф на основе сборки ядерных эмульсий для исследования спектрального состава и пространственной структуры РИ плазменных объектов;
- магнитный спектрометр электронов для исследования электронной эмиссии из плазмы сильноточных разрядов;
- комплект камер-обскур для проведения пространственно-временных исследований плазмы сильноточных разрядов;
- ряд стандартных приборов, таких, как пояс Роговского, пиндиода, вакуумного фотодиода.

2. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования наиболее важных сцинтилляционных свойств радиационной стойкости, временных параметров, линейности отклика, наличия «мертвого» слоя кристаллов, которые существенно могут повлиять на точность измерения импульсного, высокоинтенсивного РИ плазменных объектов. Учет результатов проведенных исследований позволяет эффективно проводить исследования РИ плазмы.

Исследования сцинтилляционных свойств кристаллов позволили дать интерпретацию физических процессов, происходящих в сцинтилляционном световом импульсе.

3. Разработаны методы оперативной многодетекторной рентгеновской диагностики плазменных объектов, позволяющие проводить измерения спектрального состава однократного импульсного РИ плазмы в широком энергетическом диапазоне энергий квантов (1,5 – 500 кэВ) благодаря использованию в качестве детекторов сцинтилляционных кристаллов с высокой эффективностью регистрации РИ.

4. На основании многочисленных экспериментов, проведенных на созданном лабораторном стенде, по дальнейшему совершенствованию методов спектрометрии импульсного РИ был разработан и протестирован алгоритм восстановления спектра однократного импульсного РИ на основе метода эффективных энергий и физического моделирования.

5. Разработаны методы использования многослойных трековых детекторов для исследования пространственной структуры плазменных объектов в рентгеновском диапазоне.

6. Разработана методика проведения пространственно-временных исследований плазменных объектов сильноточных разрядов.

7. Приведены результаты экспериментальных исследований спектрального состава однократных импульсов РИ плазмы сильноточных разрядов в широком диапазоне энергий 1,5 – 500 кэВ при различных условиях и режимах разряда.

Измерения проводились на установках типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» и «плазменный фокус». При токах разряда  $I_{\text{раз}}$ , меньших значения  $I_{\text{крит}}$ , спектр РИ обрывается на значении энергии квантов порядка  $h\nu \approx 5$  кэВ, в случае если  $I_{\text{раз}} > I_{\text{крит}}$ , наблюдается излучение вплоть до  $h\nu \approx 500$  кэВ. При дальнейшем увеличении  $I_{\text{раз}}$  растет интенсивность излучения при неизменной форме спектра.

Получены спектры импульсного РИ плазмы микропинчового разряда в широком энергетическом диапазоне  $1,5 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 500 \text{ кэВ}$ . По результатам измерений на полученных спектрах можно выделить три различных участка, соответствующих различным фазам: образования, развала и ускорительных процессов, происходящих в плазме микропинчового разряда.

Вид двух участков спектра  $h\nu \approx 1,5 - 15$  кэВ и  $h\nu \approx 15 - 85$  кэВ имеет хорошую повторяемость от разряда к разряду в отличие от третьего участка  $h\nu > 85$  кэВ. Непостоянство спектра РИ участка

$h\nu > 85$  кэВ зависит от ряда факторов, складывающихся случайным образом.

Полученный спектр совпадает с теоретическими представлениями образования плазмы микропинчевого разряда. Образование высокоэнергетических рентгеновских квантов может быть объяснено развитием ускорительных процессов в электрических полях, возникших в результате аномального роста омического сопротивления в области развала микропинча.

8. Проведенные пространственно-временные исследования структуры плазменных объектов и динамики спектров импульсного РИ при различных условиях и режимах разряда показали соответствие полученных результатов с расчетными значениями модели радиационного сжатия с учетом ускорительных процессов.

9. Получены результаты измерения относительной величины преобразования электрической энергии, вложенной в разряд, в энергию РИ с  $h\nu \geq 1$  кэВ. На установках типа низкоиндуктивной вакуумной искры в микропинчевом разряде плазмы железо достигало 0,5 %. На установках «плазменный фокус» эта величина достигала значения от 0,7 – 1 %. Полученные результаты близки к расчетным значениям.

10. Получены результаты измерения одновременного с рентгеновским спектра электронов плазмы одиночного сильноточного разряда в различных его режимах, подтвердившие наличие в режиме микропинчевого разряда ускорительных процессов.

11. Исследован и экспериментально подтвержден последовательный разогрев плазмы в процессе формирования микропинчевой области в сильноточных импульсных разрядах.

12. Получены результаты одновременного измерения спектров РИ и выхода нейтронов на установках «плазменный фокус», позволившие установить влияние ускорительных процессов на образование в плазме жесткого рентгеновского и нейтронного излучений и их взаимосвязь.

13. Изложены доводы на основании полученных экспериментальных результатов, подтверждающие действенность модели радиационного сжатия для определения и интерпретации механизмов протекания сильноточного разряда в микропинчевом режиме.

14. Проведены исследования РИ плазмы на установке «Магнетор» с удержанием плазмы би-дипольной магнитной конфигурации:

- разработана методика и получены результаты по исследованию пространственной структуры источников РИ на установке «Магнетор»;
- измерен и исследован спектр РИ в диапазоне энергий 1,5 – 25 кэВ на установке «Магнетор», показано наличие ускорительных процессов в плазме.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Бабаев А.И., Балакин А.А., Салахутдинов Г.Х. Измерение дрейфовой подвижности и времени жизни электронов в образцах отечественного тетраметилсилана // ПТЭ. 1987. № 14. С. 52 – 54.

2. Аверкиев В.В., Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Применение неорганических сцинтилляционных детекторов для регистрации рентгеновского излучения. Тезисы докладов VI Всесоюзного совещания «Физика, химия и технология люминофоров». Ставрополь, 11 октября 1989 г. С. 51.

3. Аверкиев В.В. Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Зависимость световыхода кристаллов  $\text{Bi}_4\text{Cl}_3\text{O}_{12}$  от энергии фотонов в диапазоне 4,5÷662 кэВ. Ставрополь, 11 октября 1989 г. С. 95.

4. Кушин В.В., Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Магнитный спектрометр электронов с детектором на основе ядерной эмульсии. Тезисы доклада 2-й Всесоюзной школы-семинара по твердотельным трековым детекторам и автордиографии. Одесса, 1 – 7 июня 1989 г.

5. Аверкиев В.В., Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Спектрометрические характеристики детекторов из германата висмута в области энергий рентгеновских и гамма-квантов от 4,5 до 662 кэВ // ПТЭ. 1990. № 4. С. 70.

6. Аверкиев В.В., Гулин М.А., Кушин В.В. и др. Многоканальный сцинтилляционный спектрометр рентгеновского излучения для плазмозфизического эксперимента: Препринт 011-90. М.: МИФИ, 1990.

7. Аверкиев В.В., Гулин М.А., Долгов А.Н. и др. Диагностика жесткого рентгеновского излучения и быстрых электронов плазмы микропинча: Препринт 014-90. М.: МИФИ, 1990.

8. Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х., Самойлова Л.Б. Методы определения спектров импульсного рентгеновского излучения: Препринт 005-90. М.: МИФИ, 1990.

9. Аверкиев В.В., Ляпидевский В.К., Пережогин В.Б., Салахутдинов Г.Х. Комплекс аппаратуры для рентгеновской диагностики плазменных установок. Тезисы на 5-м Всесоюзном совещании по диагностике высокотемпературной плазмы. Минск, 18 – 22 июня 1990 г.

10. Аверкиев В.В., Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Применение сцинтилляционных кристаллов для регистрации рентгеновского излучения: Препринт 064-90. М.: МИФИ, 1990.

11. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К. и др. Измерение спектра рентгеновского излучения микропинчового разряда многоканальным сцинтилляционным спектрометром // ПТЭ. 1991. № 2. С. 173 – 176.

12. Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. и др. Оценка непрерывного спектра рентгеновского излучения при измерениях методом фильтров. Проблемы методики современного ядерно-физического эксперимента: Сборник научных трудов / Под ред. В.А. Григорьева. М.: МИФИ, 1991. С. 20 – 29.

13. Аверкиев В.В., Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Нелинейные эффекты в щелочно-галлоидных сцинтилляторах // Сб. науч. тр. «Экспериментальные методы в задачах прикладной и фундаментальной ядерной физики». М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 68 – 73.

14. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К. и др. Исследование динамики и спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда. II Всесоюзное совещание по радиационной плазмодинамике. г. Кацевели, сентябрь 1991 г.

15. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К. и др. Многоканальный сцинтилляционный спектрометр для диагностики радиационных процессов в плазмодинамических системах. II Всесоюзное совещание по радиационной плазмодинамике. г. Кацевели, сентябрь 1991 г.

16. Малогабаритный комплекс для анализа рентгеновского излучения и потоков заряженных частиц / М.А. Гулин, А.Н. Долгов,

О.В. Николаев, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // 6-е Совещание по диагностике высокотемпературной плазме. С.-Петербург, май – июнь 1993. М.: ТРИНИТИ, 1993. С. 92 – 93.

17. Экспериментальное исследование динамики спектра мягкого рентгеновского излучения микропинча / М.А. Гулин, А.Н. Долгов, О.В. Николаев, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // Семинар «Физика быстропротекающих плазменных процессов», май 1992 г. Гродно, респ. Беларусь. С. 18.

18. Результаты исследования спектра излучения микропинча в диапазоне  $1 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 300 \text{ кэВ}$  / М.А. Гулин, А.Н. Долгов, О.В. Николаев, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов // Семинар «Физика быстропротекающих плазменных процессов», май 1992 г. Гродно, респ. Беларусь. С. 34.

19. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Динамика температуры плазмы микропинча в процессе радиационного сжатия // 3-й Межгосударственный симпозиум по радиационной плазме динамики. Тезисы докладов. М.: Изд-во «Инженер», 1994. С. 92 – 94.

20. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Каплин В. и др. Комплекс многоканальных сцинтилляционных спектрометров рентгеновского излучения для диагностики плазмы микропинчевого разряда // ПТЭ. 1992. № 5. С. 158 – 162.

21. Кириченко Н.Н., Пережогин В.Б., Ляпидевский В.К. и др. Сравнение метода амплитудного анализа и метода фильтров при регистрации рентгеновского излучения // ПТЭ. 1992. № 3. С. 206 – 210.

22. Аверкиев В.В., Долгов А.Н., Ляпидевский В.К. и др. Многоканальная регистрация динамики рентгеновского излучения микропинчевого разряда // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 6. С. 596 – 604.

23. Долгов А.Н., Кириченко Н.Н., Ляпидевский В.К. и др. Наблюдаемый спектр излучения микропинча в диапазоне  $1 \text{ кэВ} \leq h\nu \leq 300 \text{ кэВ}$  // Физика плазмы. 1993. Т. 19. Вып. 1. С. 90 – 103.

24. Долгов А.Н., Салахутдинов Г.Х. Процессы переноса вещества в быстром зет-пинчевом разряде (малоиндуктивной вакуумной искре) // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 818 – 825.

25. Байков А.Ю., Долгов А.Н., Прохорович Д.Е. и др. Комплексные измерения параметров плазмы микропинчевого разряда на установке ПФМ-72 // X Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». г. Троицк, 8 – 13 июня 2003 г.

26. Долгов А.Н., Салахутдинов Г.Х. Исследования сильноизлучающего зет-пинча // VI Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике. Сборник научных трудов. М., 2003. С. 142 – 144.

27. Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Прохорович Д.Е. и др. Исследование структуры и динамики излучающей плазмы в микропинчевом разряде // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 2. С. 192 – 202.

28. Ляпидевский В.К., Салахутдинов Г.Х. Сцинтилляционные кристаллы для плазмозфического эксперимента: Препринт 011-2005. М.: МИФИ, 2005.

29. Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование спектра рентгеновского излучения и электронной эмиссии в плазме зет-пинчевого разряда: Препринт 001-2006. М.: МИФИ, 2006.

30. Байков А.Ю., Башутин О.А., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Диагностика сильноизлучающего Z-пинча различными методами. Материалы V Российского семинара «Современные средства диагностики веществ и окружающей среды». 27 – 29 июня 2006 г. М.: МИФИ, 2006. С. 108 – 110.

31. Долгов А.Н., Ляпидевский В.К., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения в плазме тяжелых элементов зет-пинчевого разряда // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 88 – 93.

32. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Особенности восстановления спектра рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне. XII Всероссийская конференция «Динамика высокотемпературной плазмы». 3 – 9 июня 2007 г., г. Звенигород, Московской обл. С. 174 – 175.

33. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Методика восстановления спектров импульсного рентгеновского излучения в ядерно-физическом эксперименте: Препринт 006-2007. М.: МИФИ, 2007.

34. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. Применение спектрометрического комплекса аппаратуры для рентгеновской диагностики плазмы импульсных установок // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 103 – 107.

35. Plasma confinement in the compact doubledipole magnetic trap / V.A. Kurnaev, G.V. Krashevskaya, M.M. Tsventoukh, P.E. Vovchenko, G.V. Khodachenko, G.H. Salahutdinov // International Congress on



Plasma Physics 2008. FUKUOKA International Congress Center. FUKUOKA. Japan. September 8 – 12. 2008. P. 79.

36. Исследование быстрых электронов на установке «Магнетор» / С.А. Бойко, Г.В. Крашевская, Г.Х. Салахутдинов // Материалы VI Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». Москва. МИФИ. 22 – 24 октября 2008 г. С. 32.

37. О применении комплекса диагностических средств для исследования импульсной плазмы Z-пинча в МИФИ / О.А. Башутин, Е.Д. Вовченко, А.С. Савелов, Е.В. Светлов, Г.Х. Салахутдинов, С.А. Саранцев // Материалы VI Российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». Москва. МИФИ. 22 – 24 октября 2008 г. С. 132.

38. Крашевская Г.В., Курнаев В.А., Салахутдинов Г.Х., Цвентух М.М. Исследование высокоэнергетических электронов плазмы СВЧ-разряда в конфигурации би-дипольной магнитной ловушки «Магнетор» по анализу рентгеновского излучения // Прикладная физика. 2010. № 1. С.35.

39. Исследование импульсного рентгеновского излучения плазменного фокуса в широком энергетическом диапазоне / М.В. Колтунов, Б.Д. Лемешко, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов, Д.И. Юрков, П.П. Сидоров // Прикладная физика. 2010. № 4. С.52.