

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П.Н. ЛЕБЕДЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 533.9

Тиликин Иван Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИБРИДНЫХ X-ПИНЧЕЙ

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2016 г.

Работа выполнена в Лаборатории проблем новых ускорителей отделения ядерной физики и астрофизики Физического института им.П.Н.Лебедева РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Шелковенко Татьяна Александровна
в.н.с. ЛПНУ ОЯФА ФИАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Скобелев Игорь Юрьевич
ФГБУН ОИВТ РАН

кандидат физико-математических наук,
Митрофанов Константин Николаевич
АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"

Ведущая организация: НИЦ Курчатовский институт,
Курчатовский комплекс физико-химических
технологий

Защита состоится «___» _____ 2016 года в _____ часов на заседании
Диссертационного совета Д 002.023.02 в Физическом институте им.П.Н.Лебедева РАН по
адресу: 119991, г.Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на
сайте <http://www.lebedev.ru> .

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.023.02

Доктор физико-математических наук _____ Я. Н. Истомина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Эксперименты на сильноточных генераторах с нагрузкой в виде Z-пинчей, представляющих собой проволочку толщиной несколько микрометров и длиной в несколько сантиметров, проводятся с 1970-х годов. При протекании тока через подобную нагрузку образуется высокотемпературная плотная плазма. Так же возможно образование нескольких горячих точек (ГТ). В ходе экспериментов было выяснено, что ГТ являются источником мягкого рентгеновского излучения (МРИ). В 1982 году в Лаборатории проблем новых ускорителей (ЛПНУ) Физического Института им. П.Н.Лебедева АН СССР была предложена конфигурация X-пинча, состоящая из двух перекрещенных тонких проволочек. Такая конфигурация нагрузки сильноточного генератора позволяет локализовать область образования ГТ, а так же увеличивает вероятность образования единичной ГТ.

С момента открытия и по настоящее время X-пинчи используются на многих сильноточных генераторах в качестве нагрузки. При этом ГТ, образующаяся при протекании тока через проволочки, используется в качестве источника МРИ, обладающего уникальными параметрами. При длительности вспышки мягкого рентгеновского излучения (МРИ) меньше 1 нс, область излучения имеет размер порядка микрона, что позволяет использовать такой источник в схеме точечной проекционной рентгенографии. Спектр излучения ГТ представляет собой непрерывное излучение, близкое к излучению черного тела при мощности излучения от 1 до 10 ГВт. Схема получения изображений по схеме точечной проекционной рентгенографии представлена на рис.1. Она уникальна тем, что для получения изображения нет необходимости в использовании зеркал или линз, а так же тем, что изображение можно получить практически с любым увеличением, определяемым только расстоянием от источника излучения до объекта и от объекта до пленки, регистрирующей изображение. По данным, представленным на рис.1 увеличение будет составлять $(B+A)/A$.

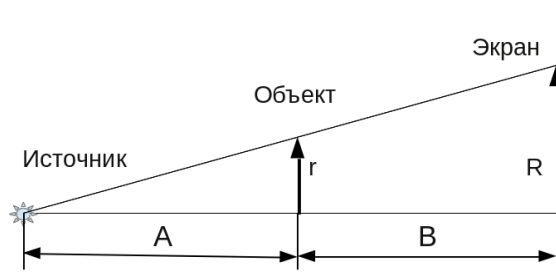


Рис.1. Построение изображения с помощью метода точечной проекционной рентгенографии

Несмотря на множество экспериментов по исследованию динамики проволочных X-пинчей, а так же непосредственно нацеленных на исследование процессов формирования ГТ в X-пинче, этот процесс до конца не изучен. Так, например, нет ясности в том, какими параметрами должен обладать генератор, чтобы ГТ могла сформироваться в процессе взрыва X-пинча. Так, например, в 2006 году экспериментально было обнаружено и опубликовано Т.А.Шелковенко, что время нарастания тока должно превышать значение 1 кА/нс. При этом, по настоящее время из этого правила не существует исключений.

X-пинч в первых экспериментах представлял собой две или четыре перекрещенные проволочки, хорошо работающие на сильноточных генераторах с токами от 150 до 450 кА. Такие X-пинчи впоследствии стали называть стандартными. Однако, со временем, были построены мегаамперные генераторы, что бы получить больший выход излучения МРИ из ГТ, количество проволочек в X-пинчах значительно увеличилось, чтобы согласовать нагрузку. Количество проволочек в X-пинче стало достигать нескольких десятков. Это привело к появлению симметричных многослойных X-пинчей, в которых используются проволочки разного диаметра. Схема подобной нагрузки приведена на рис.2. Как видно из рисунка структура X-пинча значительно усложнилась с возрастанием тока нагрузки.

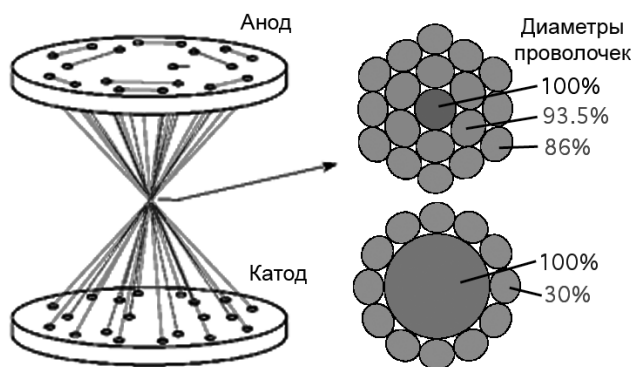


Рис.2. Схема многослойного симметричного X-пинча.

Как показали исследования процесса взрыва X-пинча, для формирования ГТ наиболее важную роль играет вещество проволочки, находящееся в пределах 2 мм от области перекрестия. При этом к моменту излучения ГТ оставшиеся части проволочек практически не изменяются и могут служить токопроводами для центральной части X-пинча.

Исходя из этого наблюдения, было предложено создать конфигурацию нагрузки, имитирующую плазменный минидиод, образующийся в стандартном X-пинче на стадии формирования первичной перетяжки. Минидиод в этом случае должен быть образован двумя

металлическими электродами, а перетяжка X-пинча может быть заменена одиночной провололочкой подходящей погонной массы и длины. Схема стандартного X-пинча из двух провололочек и новая схема с двумя коническими металлическими электродами изображена на рис.3. Конструкция такого X-пинча была названа гибридным X-пинчем (ГХП).

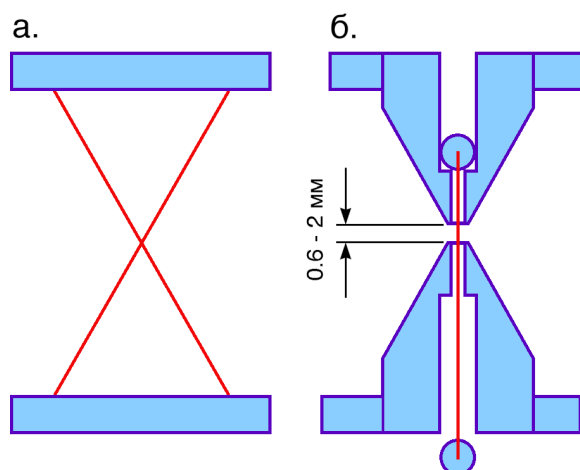


Рис.3. Схема стандартного двухпроволочного X-пинча (а) и гибридного X-пинча (б) с вольфрамовыми коническими электродами.

Известно, что при взрыве провололочных нагрузок генерируется интенсивное УФ излучение, под воздействием которого на высоковольтных электродах образуется расширяющаяся приэлектродная плазма. В стандартных нагрузках с длинным (> 10 мм) межэлектродным зазором эта плазма не имеет особого значения, а в ГХП может заколотить короткий межэлектродный промежуток равный $\sim 1-3$ мм. Поэтому для ГХП выбирается тугоплавкий материал, а электроды конической формы для уменьшения их площади. В наших экспериментах качестве такого материала был выбран сплав из вольфрама с 5% меди. Исследования гибридных X-пинчей с W электродами показали, что они прекрасно работают на тех же генераторах, что и стандартные X-пинчи. При этом мощность излучения рентгена сопоставима с мощностью излучения при взрыве стандартного X-пинча, но процесс создания нагрузки и подбора ее погонной массы был значительно упрощен.

Актуальность работы

Как видно из схемы гибридного X-пинча, он представляет собой Z-пинч – короткую провололочку, помещенную между двух конических электродов. При этом, в процессе взрыва в

ГХП, как и в стандартном X-пинче образуются одна или две ГТ с параметрами, близкими к параметрам горячих точек, образующихся в СХП. Таким образом, стало ясно, что гибридный X-пинч является уникальным источником излучения, при этом он обладает более простой конфигурацией, что делает его использование более предпочтительным по сравнению со стандартными X-пинчами. Именно поэтому с момента первых экспериментов с ГХП на многих установках, которые ранее работали с СХП, стали использовать ГХП в качестве источника излучения. Поэтому возникла необходимость исследования процессов, происходящих при взрыве ГХП. А также того, как происходит переход от Z-пинча к ГХП при помещении короткой проволоочки между коническими тугоплавкими электродами.

Цели диссертационной работы

1. Основной целью настоящей работы является исследование процесса взрыва и пинчевания проволоочки ГХП, приводящей к образованию единичной горячей точки.
2. Исследование процесса образования приэлектродной плазмы, ее расширения и влияния этой плазмы на динамику ГХП.
3. Оптимизация ГХП для установок с разными параметрами тока и напряжения.
4. Исследование процесса генерации мягкого и жесткого рентгеновского излучения ГХП.
5. Использование МРИ ГХП в качестве источника для проекционной рентгенографии, а также эмиссионной и абсорбционной спектроскопии.
6. Вывод электронного пучка из гибридного X-пинча и использования его излучения для проекционной рентгенографии.

Научная новизна работы

1. Впервые проведено детальное исследование динамики гибридных X-пинчей, включающее исследование начальной стадии взрыва на генераторах с невысокими параметрами (МИНИ-2, Микро-4, ГВП), а также финальной стадии взрыва, во время которой происходит формирование горячей точки и образование минидиода, на сильноточных генераторах (КИНГ, БИН, ХР).
2. Выявлено основополагающее влияние приэлектродной плазмы на процесс формирования горячей точки при взрыве гибридного X-пинча.

3. Метод расчета дифракционных картин впервые применен для определения размера источника мягкого рентгеновского излучения при взрыве гибридного X-пинча на сильноточных генераторах с различными выходными параметрами.

4. Метод определения распределения плотности плазмы с помощью анализа интерференционных картин применен для расчета плотности плазмы взорванных проволочек на начальной стадии взрыва гибридных X-пинчей на генераторах с невысокими параметрами.

5. Исследованы параметры источника мягкого рентгеновского излучения на основе горячей точки гибридного X-пинча. Показано, что параметры такого источника практически не отличаются от параметров источника при взрыве стандартного X-пинча.

6. Жесткое рентгеновское излучение также было зарегистрировано и исследованы параметры источника такого излучения. Показано, что источник жесткого рентгеновского излучения имеет размер в пределах 30-70 мкм при длительности вспышки излучения 2-6 нс. Данный источник не вызывает фоновой засветки пленок, разрушения фильтров и электродов сильноточного диода, что выгодно отличает ГХП от стандартного X-пинча.

7. Продемонстрирована возможность использования излучения гибридного X-пинча в качестве источника для проекционной рентгенографии, для эмиссионной и абсорбционной рентгеновской спектроскопии, а так же в качестве источника электронного пучка короткой длительности.

Практическая и научная ценность работы.

1. Имея значительно более простую конфигурацию, меньший уровень фоновой подсветки и более стабильную работу на генераторах с широким диапазоном параметров по сравнению со стандартными X-пинчами гибридные X-пинчи, могут успешно применяться в качестве источника мягкого и жесткого РИ для исследования различных плазменных и биологических объектов, а также для эмиссионной и абсорбционной спектроскопии плазменных объектов с высоким спектральным, временным и пространственным разрешением.

2. В ходе исследования динамики гибридных X-пинчей были получены результаты, которые могут иметь практическую ценность для создания новых генераторов для взрыва тонких проволочек и фольг в различных условиях. Для этого была произведена модернизация генератора МИНИ-2, увеличившая стабильность его работы, создан генератор

Микро-4 для исследования начальной стадии взрыва проволочек или X-пинчей.

3. Модернизированная конструкция гибридного X-пинча позволяет выводить электронный пучок из высоковольтного диода.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Взрыв гибридного X-пинча на ранних моментах времени представляет собой взрыв одиночной проволочки.

2. При взрыве проволочки гибридного X-пинча происходит образование приэлектродной плазмы, которая, расширяясь, сжимает межэлектродное расстояние, приводя к полному закорачиванию межэлектродного промежутка в поздние моменты времени, что приводит к уменьшению длительности жесткого рентгеновского излучения и уменьшению фоновой подсветки.

3. Расширение приэлектродной плазмы в аксиальном направлении и сжатие электродной плазмой расширяющегося ядра проволочки гибридного X-пинча является основным фактором, приводящим к переходу от взрыва одиночной проволочки к взрыву гибридного X-пинча.

4. В поздние моменты времени взрыв гибридного X-пинча происходит так же, как и взрыв стандартного X-пинча. Происходит формирование единичной перетяжки, приводящей к образованию горячей точки. После чего происходит обрыв перетяжки и генерация короткоживущего электронного пучка.

5. Гибридный X-пинч является простым и дешевым источником рентгеновского излучения в широком диапазоне энергии излучения с широкими возможностями использования как для проекционной рентгенографии различных объектов, так и для использования в качестве источника для эмиссионной и абсорбционной спектроскопии.

6. Модернизированная конструкция гибридного X-пинча позволяет выводить электронный пучок из высоковольтного диода для дальнейшего использования.

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, напечатанных в

рецензируемых журналах из списка ВАК. Список работ, приведен в конце автореферата.

Апробация работы

По основным результатам диссертационной работы был представлен 31 доклад на 12 конференциях, в том числе и международных.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично или в составе исследовательской группы при определяющем участии автора. Автор принимал непосредственное участие в модернизации существовавших (БИН, ГВП) и разработке новых (Мини-2, Микро-4, КИНГ) генераторов, используемых в диссертационной работе. Автор разработал алгоритмы для численной обработки результатов экспериментов с целью измерения размеров источника мягкого рентгеновского излучения в гибридном X-пинче и для оценки электронной плотности плазмы.

Структура представленной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст иллюстрируют 102 рисунка, библиография содержит 101 наименование. Общий объем работы 155 машинописных страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, научная новизна, сформулированы цели работы, описана структура работы, изложены положения, выносимые на защиту. Описана практическая и научная ценность работы, а так же описана апробация работы.

В **главе 1** диссертации представлен обзор работ по исследованию Z- и X-пинчей, начиная от первых экспериментов на установке Дон по взрыву Z-пинчей в 1970-х. Описана история открытия X-пинча в 1982 году. Приведен список установок, работающих по всему миру с X-пинчами, с кратким описанием параметров. Так же в главе приведено определение

горячей точки и мягкого рентгеновского излучения, регистрируемого при взрыве X-пинчей. Описан метод получения изображений по схеме точечной проекционной рентгенографии. Описаны основные методы использования X-пинчей в качестве источников МРИ, а также основные конфигурации X-пинчей, используемые в экспериментах. В конце главы приведены причины перехода от СХП к ГХП и описание процесса перехода от стандартного X-пинча к гибричному, а так же приведены результаты первых экспериментов по их использованию.

В главе 2 представлено описание используемых в экспериментах диагностик и экспериментальных установок, на которых проводились эксперименты. В параграфе 2.1 приведены характеристики электрических измерителей, используемых для контроля напряжения и тока протекающего через нагрузку на сильноточных установках. Приведено описание основных фотодетекторов используемых для регистрации рентгеновского излучения в различных спектральных областях: алмазный датчик с фотопроводимостью (ФПД) в диапазоне от 10 эВ до 5-8 кэВ и полупроводниковые диоды (ППД), чувствительные до 50кэВ и используемые для регистрации жесткого излучения. Приведено описание схем получения рентгеновских изображений по схеме проекционной точечной рентгенографии(ПТР). Схема получения изображения в данной схеме приведена на рис.4.

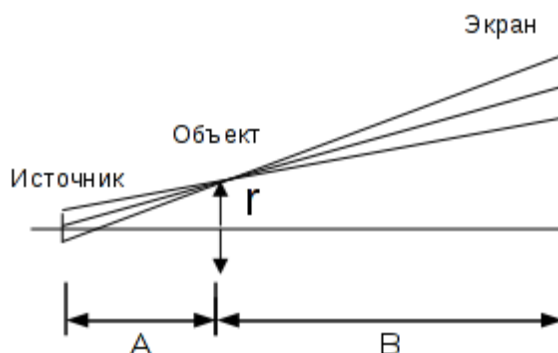


Рис.4. Построение изображения от источника ненулевого размера с помощью метода проекционной точечной рентгенографии.

Получение изображения данным методом позволяет определить размер области излучения, а так же приведен расчет дифракционного ограничения на пространственное разрешение. В данном параграфе приведены кривые пропускания различных фильтров, использованных в экспериментах. В конце параграфа приведены оптические схемы, используемые для получения теневых лазерных изображений. В параграфе 2.2.1 приведено описание генератора БИН, построенного по классической схеме с генератором Маркса и

формирующей линией. Максимум тока составляет 270 кА, а время нарастания тока 100 нс. В параграфе 2.2.2 представлен малогабаритный МИНИ-генератор, построенный с использованием 4-х быстрых конденсаторов совмещенных с разрядниками. Максимум тока составляет 250 кА, время нарастания тока — 200 нс. В параграфе 2.2.3 приведены изменения, произведенные в рамках модификации генератора МИНИ-2. Что привело к стабилизации работы генератора, но уменьшению максимума тока до значения 120-140 кА, при этом время нарастания тока составило 130 нс. Дополнительно в качестве диагностики на этом генераторе был подготовлен канал для получения оптических теневых изображений. В параграфе 2.2.4 представлено описание генератора ГВП, имеющего максимум тока 10 кА, а время нарастания — 400 нс. В параграфе 2.2.5 приведена схема генератора Микро-4, а так же схема его коммутации. При работе генератора максимум тока составляет 5 кА, а время нарастания тока — 50 нс. В параграфе 2.2.6 описан генератора КИНГ, а так же приведены сигналы измерения тока, максимум которого составляет 180 кА, время нарастания тока — 200 нс. В параграфе 2.2.7 приведено описание сильноточного генератора ХР, результаты экспериментов а котором так же приведены в данной работе , имеющего максимум тока 450 кА при этом фронт нарастания тока составляет 45-50 нс.

В главе 3 приведено описание численных методов для обработки экспериментальных результатов использованных в данной работе. В параграфе 3.1 представлено описание способа анализа интерферометрических картин для определения распределения плотности плазмы. В начале главы приведены схема интерферометра, использованного в экспериментах, приведенная на рис.5. Далее приведены формулы, используемые для определения плотности электронов, исходя из сдвига полос на интерферометрической картине, а также приведено описание способа их применения для анализа экспериментальных результатов. В конце параграфа представлено несколько изображений, по которым произведен анализ и определена зависимость электронной плотности от радиуса проволоки. В целом, можно сделать вывод, что интерферометрические способы исследования плазмы дают возможность наблюдать плазму с электронной плотностью лежащей в пределах от 4×10^{17} до 10^{21} см^{-3} . Использование подобной методики позволяет дополнить информацию о распределении плазмы, относительно теневых методов исследования плазмы.

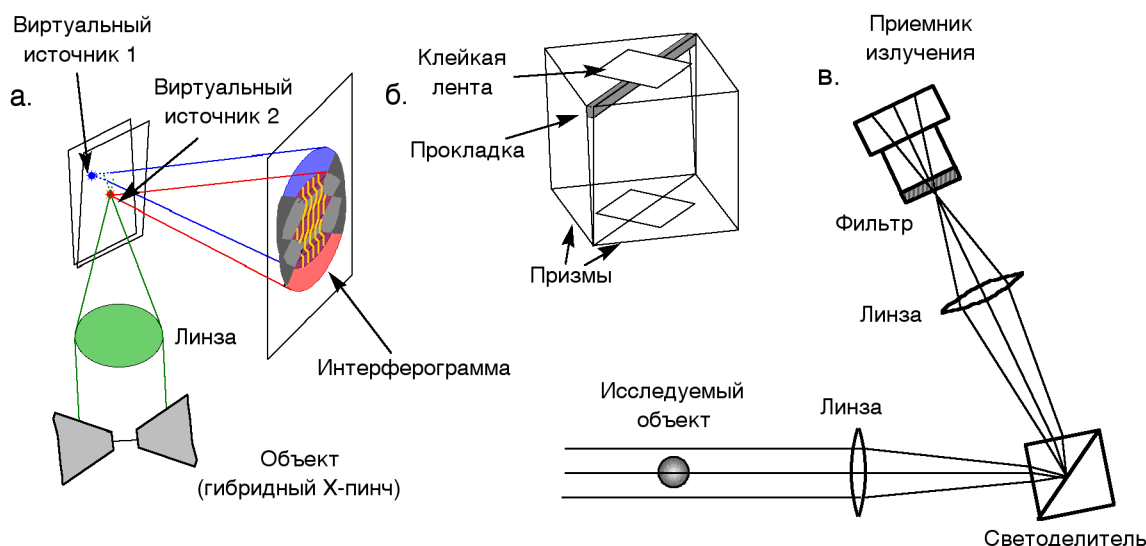


Рис.5. Принцип работы интерферометра (а); конструкция светоделителя (б); схема интерферометра (в).

В параграфе 3.2 представлен метод определения размера излучающей области с помощью расчета дифракционных картин. Данный метод позволяет превзойти дифракционный предел при определении размера излучающей области и дает размер источника излучения с учетом влияния всех волновых факторов излучения и геометрии. В начале параграфа показано, что при получении изображений методом проекционной рентгенографии на пространственное разрешение влияет размер источника излучения, дифракция, преломление и отражение. При этом эти факторы влияют в разной степени и наиболее важную роль помимо размера источника излучения влияет дифракция. Именно поэтому учет этого фактора позволяет увеличить точность определения размера источника. В рамках работы произведены множественные расчеты дифракционных картин для различных исходных параметров: таких как различные параметры источника излучения, геометрические расстояния, а также различные профили тест объектов. Ниже, на рис.6, приведены профили, рассчитанные для различных размеров источника излучения после прохождения через непрозрачную проволочку.

Из расчетов видно что картины существенно различаются для небольшого изменения размера источника излучения. Что дает право оценить точность определения размера источника излучения на уровне 20%. Далее приведено несколько экспериментальных результатов, обработанных описанным способом, из которых видно, что данный метод работает и может быть использован в данной работе.

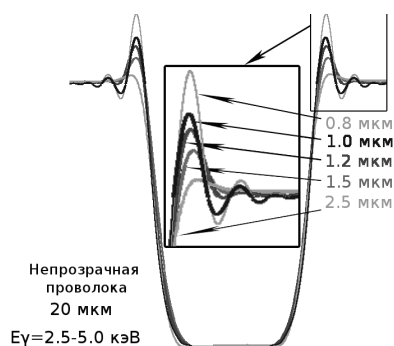


Рис.6. Профили дифракционной картины, рассчитанные для источников различного размера, после прохождения через непрозрачную проволочку усредненные по спектру в диапазоне от 2.5 до 5.0 кэВ.

В главе 4 представлено описание основных экспериментов по исследованию динамики гибридных X-пинчей на различных установках. Все эксперименты проводились с различными проволочками, относящиеся к различным группам материалов разделенные по их тугоплавкости и удельному сопротивлению. Параграф 4.1 посвящен исследованию начальной стадии взрыва гибридных X-пинчей. В параграфе 4.1.1 описано исследование начальной стадии на генераторе ГВП. Представлены результаты исследования зависимости скорости расширения проволочек от межэлектродного зазора и времени. На рис.7 приведен график зависимости скорости расширения ядра 25 мкм медной проволочки от межэлектродного расстояния.

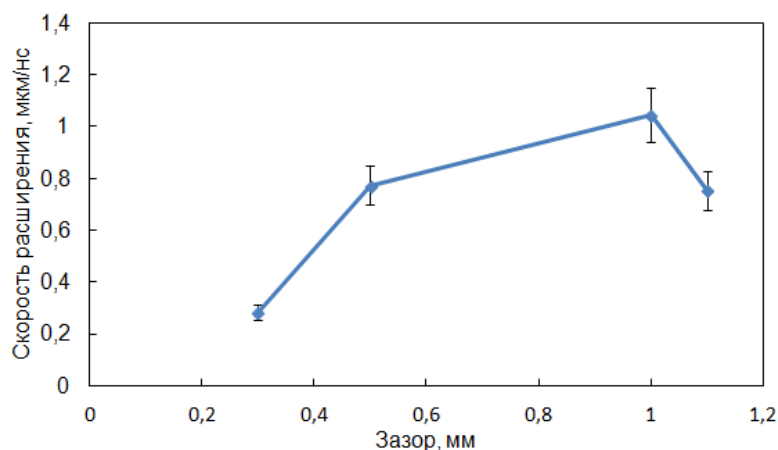


Рис.7. График зависимости средней скорости расширения ядра 25 мкм Си проволочки в ГХП на генераторе ГВП от межэлектродного расстояния.

Из графика видно, что сначала скорость расширения проволочки, а значит и энергия

вкладываемая в проволочку, растет, а после определенного зазора начинает падать, что говорит о том, что для максимального вложения энергии в проволочку необходимо подбирать оптимальную длину межэлектродного зазора. На рис.8 представлена зависимость скорости расширения керна проволочек от времени, видно, что с течением времени скорость становится постоянной или начинает падать, что говорит о том, что наиболее быстрое вложение энергии в проволочку происходит в начальный момент времени.

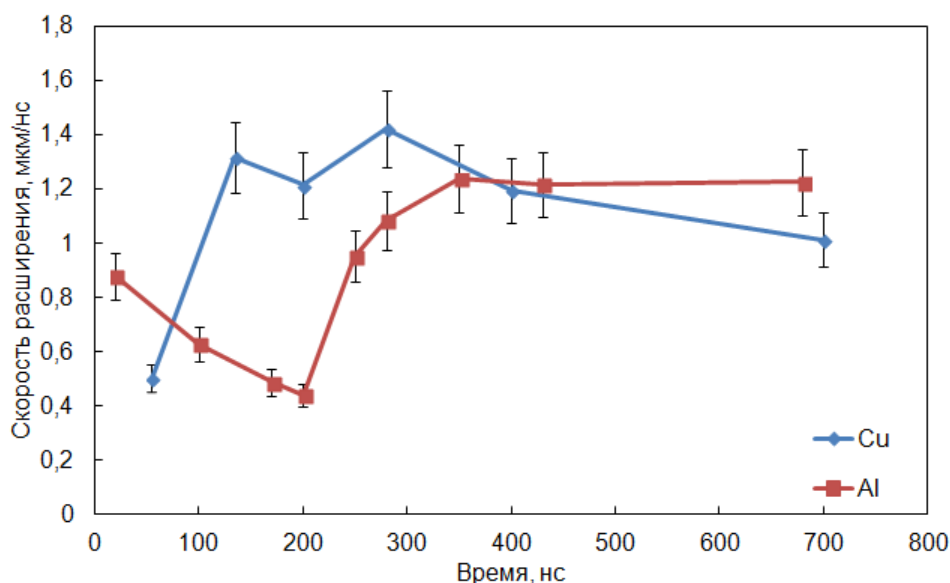


Рис.8. Зависимость средней скорости расширения керна 35 мкм Al и 25 мкм Cu проволочки от времени при взрыве ГХП на генераторе ГВП.

В параграфе 4.1.2 описаны эксперименты на генераторе Микро-4 по исследованию зависимости расширения проволочек от времени и скорости нарастания тока. По результатам экспериментов сделан вывод, что, во-первых, даже небольшие токи (~ 5 – 10 кА) и напряжения, соответствующие предымпульсу некоторых сильноточных генераторов, приводят к взрыву и расширению проволочки в ГХП. Динамика ГХП на подобных генераторах не исследовалась, поскольку в нашем распоряжении нет генераторов с поддающимся измерению предымпульсом. Поэтому на установках, на которых имеется предымпульс, лучше не использовать для питания ГХП. Во вторых, эксперименты по исследованию стадии формирования ГТ в ГХП необходимо производить на сильноточных установках с большим максимумом тока, имеющим максимальную скорость нарастания тока. При этом межэлектродный зазор необходимо подбирать таким образом, чтобы образовывалась одна горячая точка, дающая вспышку МРИ. Эти эксперименты были

проделаны и описаны далее. В параграфе 4.2 представлены результаты исследования конечной стадии формирования ГТ гибридного X-пинча. В параграфе 4.2.1 описаны эксперименты на генераторе МИНИ-2 по исследованию процесса формирования ГТ в зависимости от межэлектродного расстояния. На рис.9 представлены результаты измерения интенсивности МРИ из ГТ при различных межэлектродных расстояниях.

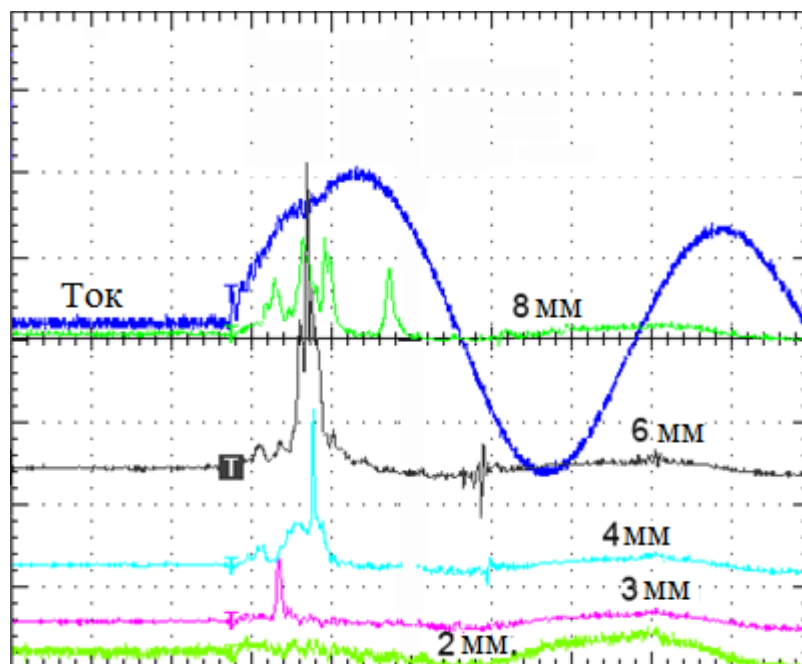


Рис.9. Осциллограммы тока и сигналов с фотодетектора (ФПД) за 1 мкм лавсановым фильтром при взрыве 12.7 мкм Мо гибридного X-пинча в зависимости от длины межэлектродного зазора на генераторе МИНИ-2. Длина зазора указана на рисунке.

Из осциллограмм видно, что при маленьком зазоре отсутствует МРИ. Далее при увеличении зазора растет интенсивность излучения, однако, начиная с 6 мм, начинают появляться несколько всплесков излучения, что говорит о многократном пинчевании. Таким образом, видно, что существует оптимальный зазор, который обеспечивает наибольшую интенсивность единственной вспышки МРИ. Дополнительно на генераторе произведены измерения расширения приэлектродной плазмы и кернов различных проволочек в зависимости от времени и межэлектродного расстояния. В конце раздела представлены изображения взрыва ГХП в моменты времени за 3 нс до и через 2 нс после образования ГТ. Эти изображения представлены ниже, на рис.10. Они схожи с подобными изображениями взрыва стандартного X-пинча.

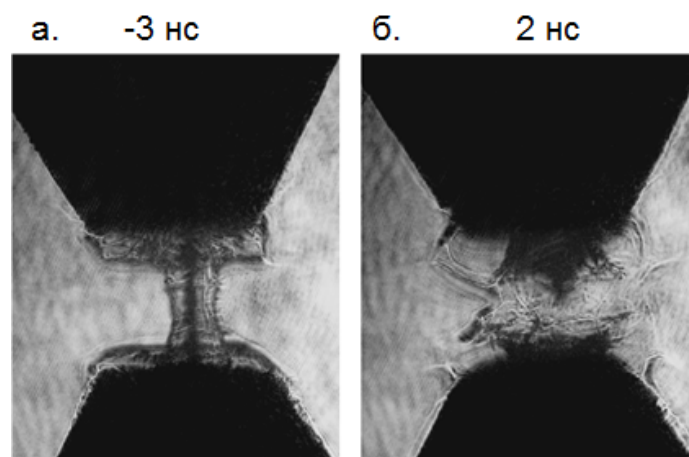


Рис.10. Оптические тенеграммы 12.7 мкм Мо ГХП, полученные а) за 3 нс до и б) через 2 нс после образования ГТ на установке МИНИ-2 при межэлектродном зазоре 3 мм.

На основании этой части экспериментов сделан вывод о том, что межэлектродный зазор необходимо выбирать наименьшим, для того чтобы образовывалась только одна ГТ, но при этом не слишком маленьким, чтобы ГТ успевала образоваться до закорачивания межэлектродного пространства приэлектродной плазмой. В параграфе 4.2.2 описаны эксперименты, проведенные на генераторе БИН, в которых так же исследованы скорости расширения различных проволочек. Отличие от экспериментов на других установках состоит в том, что изображения получены в МРИ от ГХП. На рис.11 представлены рентгенограммы взрыва Мо, W и Cu проволочек, на которых видна внутренняя структура керна проволочек, а так же можно оценить скорость расширения ядер проволочек.

В параграфе 4.2.3 представлены результаты исследования излучения ГТ на генераторе КИНГ. Данный генератор уникален тем, что имеет необычную форму импульса, которая имеет более высокую производную в начальные моменты времени и более низкую вблизи максимума тока. Таким образом, образование ГТ возможно только на более крутом участке фронта тока.

В параграфе 4.2.4 представлены результаты экспериментов, проведенных на генераторе ХР. В конце проведено сравнение результатов измерения скорости расширения ядер проволочек и приэлектродной плазмы на установках МИНИ-2 и ХР. На рис. 12 представлен график зависимости скорости расширения приэлектродной плазмы. Видно, что скорости расширения отличаются для генераторов с различными параметрами, однако общий вид зависимости скорости расширения от времени сохраняется. В начальные моменты времени скорость расширения возрастает, после чего достигает максимума, а затем падает.

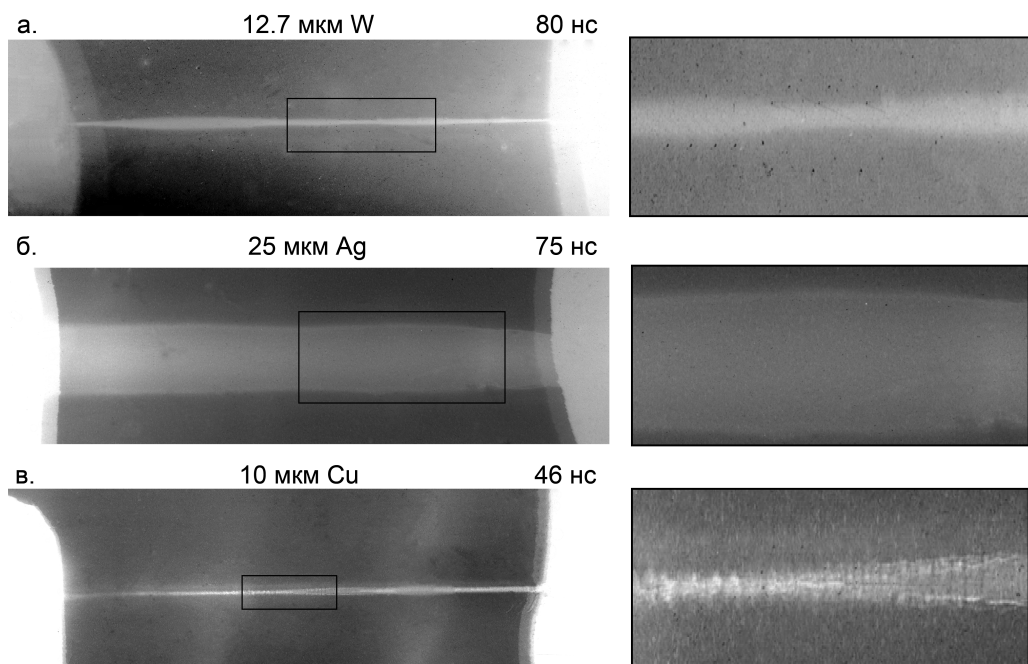


Рис.11. Рентгенограммы взрыва проволочек ГХП с межэлектродным расстоянием 2 мм в цепи обратного тока генератора БИН в излучении 20 мкм Мо ГХП: 12.7 мкм W (а) через 80 нс от начала тока, 25 мкм Ag (б) через 75 нс и 10 мкм Cu (в) через 46 нс и увеличенные фрагменты изображений.

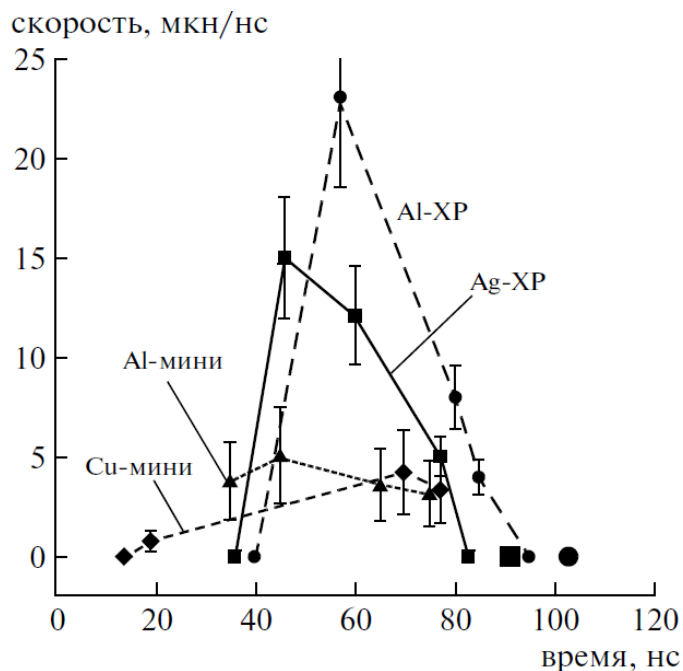


Рис. 12. Зависимость скорости расширения приэлектродной плазмы ГХП с 20 мкм Cu и 35 мкм Al проволочками на генераторе МИНИ-2, и 50 мкм Al и 50 мкм Ag на генераторе XP. Большими маркерами отмечено соответствующее время образования ГТ.

Видно, что значения максимума, а также времени в который этот максимум достигается, зависит от параметров генератора, а также от параметров проволоочки. Также на графиках видно, что скорость расширения приэлектродной плазмы зависит от параметров проволоочек.

В целом, из экспериментов по исследованию динамики гибридных X-пинчей можно сделать вывод, что на ранних этапах развития ГХП, происходит процесс взрыва одиночной проволоочки. Происходит взрыв по поверхности проволоочки, образование ядра и короны и их расширение. При этом возможно начинается образование нескольких перетяжек. Однако, в то же самое время, под действием УФ излучения проволоочки, которое генерируется в процессе взрыва проволоочки, на поверхности электродов образуется плазма, которая движется вдоль оси диода и, со временем, начинает сжимать межэлектродный промежуток. При этом сокращается эффективный размер межэлектродного промежутка, в котором возможно формирование перетяжек с последующим образованием ГТ. После чего, движущаяся приэлектродная плазма закорачивает межэлектродный промежуток. Что в свою очередь будет препятствовать возможному вторичному пинчеванию плазмы проволоочки или образованию электронного пучка в межэлектродном пространстве. Таким образом, образование и расширение приэлектродной плазмы играет существенную роль в формировании ГХП. В целом сделан вывод о том, что взрыв ГХП на ранних стадиях схож с взрывом Z-пинча. На поздних, под действием приэлектродной плазмы, становится похож на взрыв X-пинча, приводящий к образованию ГТ. В параграфе 4.3 представлены результаты исследования жесткого рентгеновского излучения и электронного пучка, возникающие при взрыве ГХП, проведенные на генераторе БИН. Параграф 4.3.1 посвящен исследованию жесткого РИ. Показано, что на установке БИН при взрыве ГХП образуется источник жесткого РИ с размером области излучения от 30 до 60 мкм с энергией квантов более 8 кэВ. При этом длительность вспышки излучения составляет от 1 до 10 нс. Характерные сигналы излучения мягкого и жесткого излучения представлены на рис.13.

Так же проведены исследования наличия более жесткого рентгеновского излучения. Для регистрации излучения использовался сцинтилляционный детектор перед которым устанавливались фильтры из свинца различной толщины. С помощью этого детектора было обнаружено, что в излучении присутствуют фотоны с энергией до 300 кэВ.

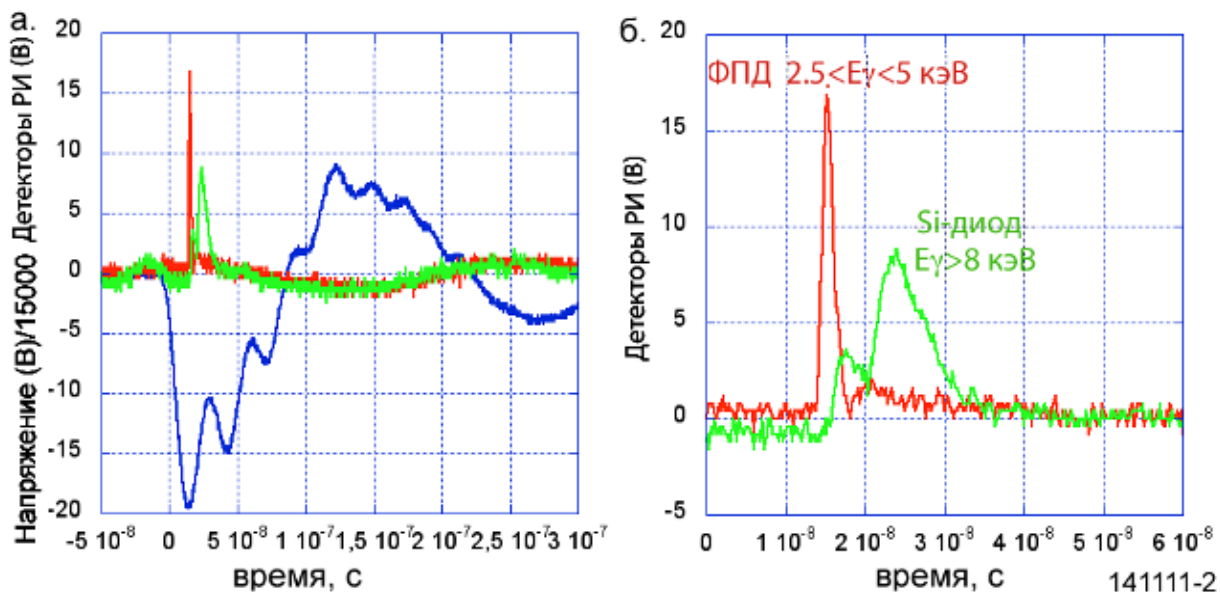


Рис.13. Сигналы напряжения, ФПД ($2.5 < E_{\gamma} < 5$ кэВ) и кремниевого диода ($E_{\gamma} > 8$ кэВ) (а) и сигналы детекторов в увеличенном масштабе (б), зарегистрированные в излучении ГХП с 25 мкм Мо проволочкой на установке БИН.

В параграфе 4.3.2 представлены результаты исследования влияния вакуума на излучения при взрыве ГХП. По результатам сравнения сигналов при различных значениях давления воздуха в камере видно, что излучение ГТ наблюдается только в случае достаточно высокого вакуума, причем чем лучше вакуум, тем более интенсивное мягкое рентгеновское излучение наблюдается. В случае ухудшения вакуума мягкое РИ исчезает, в то время как интенсивность и длительность излучения средней жесткости растет. Интенсивность жесткого излучения не так жестко коррелирует с изменением вакуума. При наличии высокого вакуума в камере наиболее жесткое излучения зарегистрировано за фильтром, пропускающим кванты с энергией выше 240 кэВ.

В параграфе 4.3.3 представлены результаты исследования электронного пучка, генерируемого при взрыве ГХП. Для того, чтобы измерить ток электронного пучка необходимо было вывести пучок из области диода. Для этого была изменена конструкция ГХП. Схема наиболее успешной конструкции, позволяющей вывести электронный пучок из диода, представлена на рис.14.

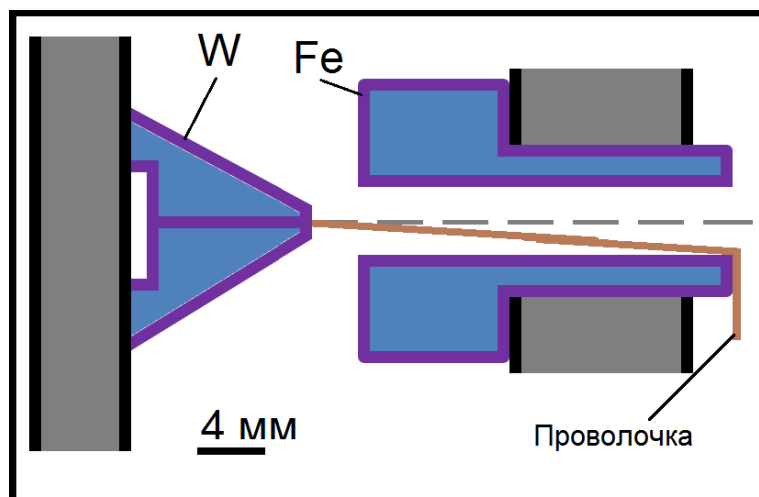


Рис.14. Схема модификации GXП с анодом в виде железой плоскости для исследования электронного пучка.

В результате зарегистрирован и измерен электронный пучок. Измерение тока электронного пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея. Измеренная мощность излучения составляет около 20 кВт, а длительность генерации составляет 1-2 нс в случае фильтрации электронов с энергиями выше 120 кэВ. Проведено исследование наличия электронного пучка в зависимости от энергии отсечки используемого фильтра. График этой зависимости представлен на рис.15.

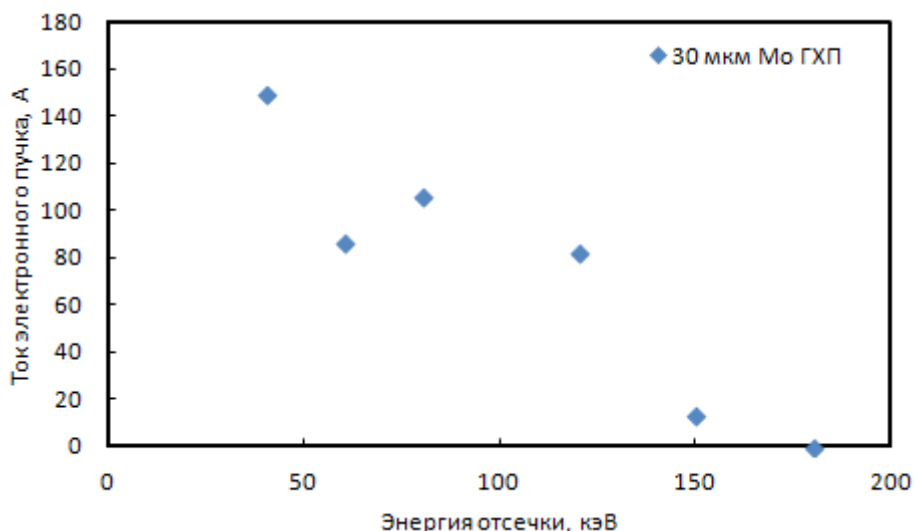


Рис.15. Зависимость максимально тока электронного пучка зарегистрированного с помощью цилиндра Фарадея от энергии отсечки при взрыве X-пинча на установке БИН.

В целом эксперименты по исследованию излучения ГТ при взрыве ГХП показали, что ГТ является широкополосным источником излучения. ГТ является ярким источником мягкого РИ с длительностью излучения менее 1 нс, при этом размер излучающей области равен 1-5 мкм. Так же наблюдается жесткое РИ. Излучение с энергией квантов выше 8 кэВ, но ниже 50 кэВ, имеет длительность несколько наносекунд (5-10 нс). При этом размер излучающей области оказывается равен нескольким десяткам микрометров (40-100 мкм). В излучении присутствуют кванты с энергией выше 150 кэВ. Исследования генерации электронного пучка показывают, что конструкцию ГХП можно видоизменить таким образом, чтобы иметь возможность выводить пучок из диода, для дальнейшего использования. При этом пучок состоит из электронов с энергиями выше 40 кэВ, но ниже 180 кэВ. Время генерации пучка составляет от 1 нс до 5 нс.

Глава 5 посвящена возможностям использования ГХП в качестве источника МРИ. В параграфе **5.1** показаны примеры использования ГХП в качестве источника для получения изображений объектов по схеме точечной проекционной рентгенографии. Так как X-пинч является широкополосным источником рентгеновского излучения с коротким временем вспышки, то это позволяет использовать его в качестве источника для получения изображений различных биологических или плазменных объектов. При этом если объект достаточно плотный, можно использовать более жесткую компоненту спектра излучения ГТ X-пинча. В качестве примера на рис.16 приведено изображение жука в излучении 25 мкм Мо ГХП с энергией квантов от 2.5 кэВ до 5 кэВ.

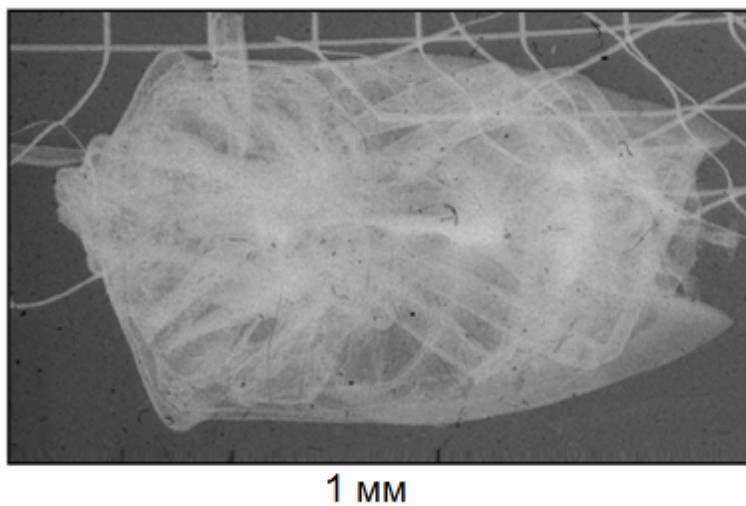


Рис.16. Изображение жука, полученное при взрыве ГХП с 25 мкм Мо проволокой на установке БИН, зарегистрированное в излучении с энергией фотонов от 2.5 до 5 кэВ с 3-х кратным увеличением. Размер источника 4 мкм.

Параграф 5.2 посвящен эмиссионной спектроскопии. В начале раздела описана схема использования спектрографа с выпуклым кристаллом, используемая в наших экспериментах, представленная на рис.17.



Рис.17. Схема кристаллического спектрографа с выпуклым кристаллом.

Далее приведен один из полученных спектров Ne подобной меди и описан способ определения длин волн линий спектра, регистрируемых на пленку. В конце параграфа приведен непрерывный спектр излучения ГХП с Мо провололкой в диапазоне К-оболочки Al, параллельно которому поставлен спектр излучения He- и H- подобного Al, в том же спектральном диапазоне(см.рис.18). Наличие такого спектра излучения позволяет использовать данный источник излучения в качестве источника для рентгеновской абсорбционной спектроскопии(РАС).

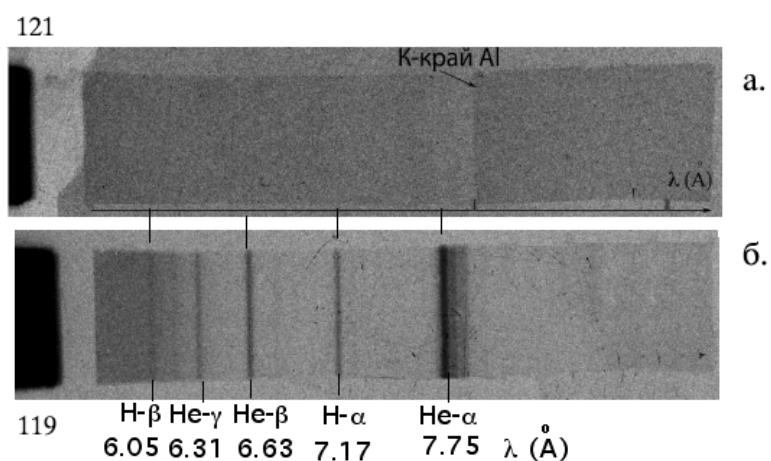


Рис.18. Спектр непрерывного излучения в ГХП с Мо провололкой в диапазоне линий К-оболочки Al (а) и спектр излучения He- и H- подобного Al, зарегистрированный в том же диапазоне излучения (б).

Данной теме посвящен параграф 5.3. В начале раздела описаны преимущества метода абсорбционной спектроскопии по отношению к эмиссионной, с точки зрения исследования низкотемпературной плазмы. На рис.19 приведена схема применения РАС на основе плоского кристалла КАР в излучении ГХП.

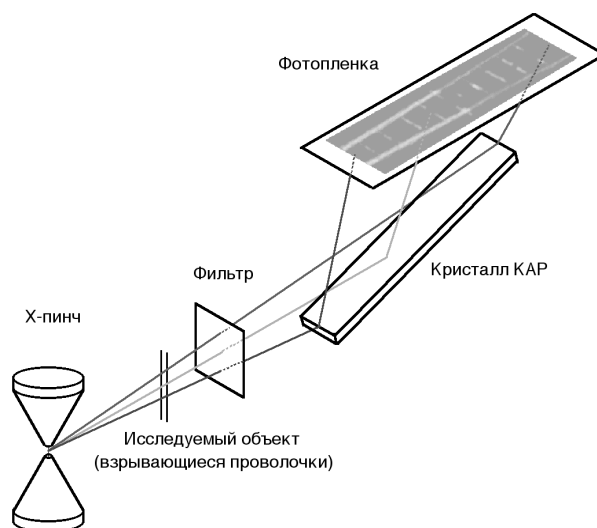


Рис.19. Схема применения РАС на основе плоского кристалла КАР для исследования спектров поглощения плазмы взорванных проволочек при зондировании излучением ГХП.

Использование данной схемы позволяет получать изображения, как со спектральным разрешением, так и с пространственным в перпендикулярном направлении. Далее приведены экспериментальные спектры взорванных Al проволочек, из которых с помощью расчетов специальными кодами можно получить температуру плазмы. На рис.20 приведен абсорбционный спектр алюминиевой плазмы, зарегистрированный при взрыве четырех Al проволочек диаметром 35 мкм. Расчет показывает, что максимум температуры предвестника, образованного между проволочками, составляет 20 эВ, а вещества вблизи кернов проволочек — 15 эВ.

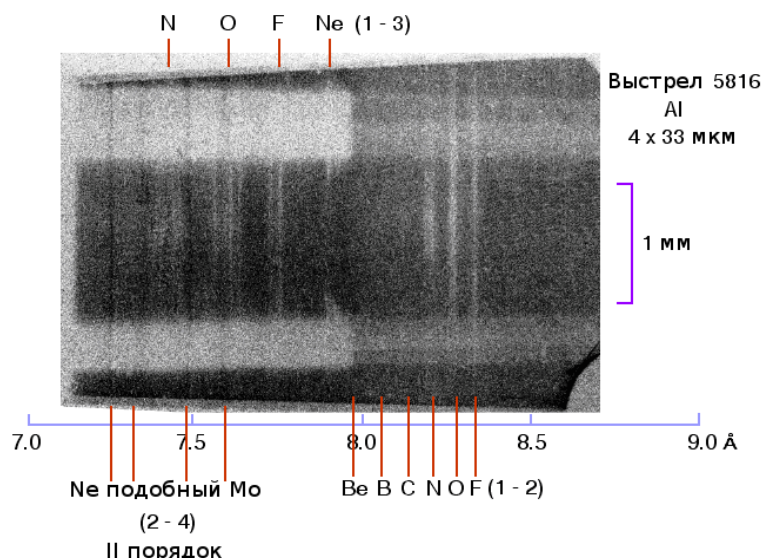


Рис.20. Рентгеновские абсорбционные спектры алюминиевой плазмы, зарегистрированные при взрыве четырех Al проволочек диаметрами 35 микрон на установке ХР при помощи плоского кристалла КАР и гибридного Х-пинча с Мо проволочкой диаметром 40 микрон.

В конце раздела описаны эксперименты по РАС на установке БИН, в которой использовался выпуклый кристалл CsAP. Приведены спектры поглощения Al при взрыве Al проволочек. В конце параграфа сделаны выводы о возможности использования излучения ГХП в качестве источника для РАС.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы, кратко приведенные ниже.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Эксперименты, проведенные на установках с небольшим током ($\sim 5 - 10$ кА) и напряжением, соответствующие предимпульсу некоторых сильноточных генераторов, показали, что протекание тока приводит к взрыву и расширению проволочки в ГХП, однако ГТ не образуется. В экспериментах показано, что динамика взрыва проволочки ГХП на ранних этапах происходит так же, как взрыв одиночной проволочки. Происходит взрыв по поверхности проволочки, образование керны и короны и их дальнейшее расширение. При этом начинается образование нескольких перетяжек.

2. В то же самое время, под действием УФ излучения проволочки, которое генерируется в процессе взрыва проволочки, на поверхности электродов образуется плазма,

которая расширяется вдоль оси диода и, со временем, начинает сокращаться эффективное межэлектродное расстояние. А, значит, сокращается промежуток, в котором возможно формирование перетяжек с последующим образованием ГТ, что приводит к сокращению разброса в местоположении ГТ. Так же замечено, что с ростом тока движение приэлектродной плазмы замедляется и даже останавливается, если ток достаточно велик. Через 2-5 нс после образования ГТ расширяющаяся приэлектродная плазма закорачивает межэлектродный промежуток. Это препятствует возможному вторичному пинчеванию плазмы проволочки и образованию долгоживущего электронного пучка в межэлектродном пространстве.

3. Скорость процессов взрыва ГХП зависит как от параметров установки, так и от материала и диаметра проволочки, а так же от материала электродов. Таким образом, образование и расширение приэлектродной плазмы играет существенную роль в формировании ГХП. Если первоначальный зазор оказывается достаточно большой, чтобы он не успел закоротиться до образования ГТ – тогда можно наблюдать вспышку МРИ, говорящую об образовании ГТ. При этом если первоначальный зазор оказывается достаточно большим – то успевает образоваться несколько источников излучения. Эти результаты говорят о том, что при работе с ГХП особенно важным является момент выбора первоначального межэлектродного зазора, а так же подбора материала проволочек и электродов.

4. На менее мощных установках, таких как МИНИ и КИНГ, удавалось добиться образования ГТ за счет использования быстро расширяющихся материалов проволочек, которые при взрыве расширялись с большой скоростью и препятствовали закорачиванию межэлектродного пространства приэлектродной плазмой.

5. Исследование излучения ГТ при взрыве ГХП показали, что ГТ является широкополосным источником излучения. При этом измерены параметры излучения в различных диапазонах энергий. Источник мягкого РИ имеет длительность излучения менее 1 нс, при этом размер излучающей области равен 1-5 мкм. Наблюдается жесткое РИ с энергией квантов выше 8 кэВ, но ниже 50 кэВ, зарегистрированное на генераторе БИН, имеет длительность несколько наносекунд (3-7нс), при этом размер излучающей области оказывается равен 30-70 мкм. В излучении зарегистрированы кванты с энергией выше 150 кэВ. Исследования генерации электронного пучка показывают, что при взрыве ГХП образует электронный пучок. Однако, для его регистрации, необходимо изменить конфигурации гибридного X-пинча. При этом удается зарегистрировать электронный пучок с электронами с

энергиями выше 40 кэВ, но ниже 180 кэВ. Время генерации пучка составляет от 1 нс до 5 нс.

6. Показано, что ГХП можно использовать в качестве источника рентгеновского излучения для исследования различных объектов, как плазменных, так и биологических. Технология получения таких изображений достаточно простая и не требующая какой-либо оптики. При этом качество изображения превосходит многие аналоги.

7. Исследование излучения ГХП показало, что ГХП можно использовать в качестве источника для эмиссионной и абсорбционной рентгеновской спектроскопии. Излучение ГТ X-пинча имеет большую интенсивность излучения, что позволяет использовать различные схемы спектрографов, включая схемы с дефокусирующими кристаллами. Высокое спектральное, пространственное и временное разрешение позволяет исследовать короткоживущие плазменные объекты в широком диапазоне размеров объектов и параметров плазмы. Так как X-пинч имеет малые размеры излучающей области во всех направлениях, то возможно получения на одном изображении и спектрального разрешения и пространственного.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] Г. А. Месяц, Т. А. Шелковенко, Г. В. Иваненков, А. В. Агафонов, С. Ю. Савинов, С. А. Пикуз, И. Н. Тиликин, С. И. Ткаченко, С. А. Чайковский, Н. А. Ратахин, В. Ф. Федущак, В. И. Орешкин, А. В. Русских, Н. А. Любецкая, А. П. Артемов, Д. А. Хаммер, Д. В. Синарс, Источник субнаносекундных импульсов мягкого рентгеновского излучения на основе X-пинча и малогабаритного низкоиндуктивного генератора тока, ЖЭТФ, 138, 411-420, 2010.
- [2] T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz, A. D. Cahill, P. F. Knapp, D. A. Hammer, D. V. Sinars, I. N. Tilikin, S.N.Mishin, Hybrid X-pinch with conical electrodes, Phys. Of Plasmas, 17, 112707, 2010
- [3] Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз, С.А. Мишин, А.Р. Мингалеев, И.Н. Тиликин, П.Ф. Кнапп, А.Д. Кахилл, К.Л. Хойт, Гибридные X-пинчи, Физика Плазмы, том.38, № 5, стр. 395, 2012
- [4] И.Н. Тиликин, Т.А. Шелковенко, С.А. Пикуз, Д.А. Хаммер, Определение размеров источника излучения методом расчета дифракционных картин, Оптика и спектроскопия, том.115, № 1, стр. 147, 2013
- [5] Mingaleev A.R., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mishin S.N., Romanova V.M., Ter-Oganesyan A.E., Hoyt C.L., Cahill A.D., Hammer D.A., Study of hybrid X pinches in different conditions, Problems of atomic science and technology, V.1(83), p. 119-121, 2013
- [6] И. Н. Тиликин, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, П. Ф. Кнапп, Д. А. Хаммер, Рентгеновская абсорбционная спектроскопия на основе излучения гибридного X-пинча, физика плазмы, том 41, № 7, с. 580–587, 2015
- [7] Т. А. Шелковенко, И. Н. Тиликин, Г. В. Иваненков, В. Степниевски, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. В. Агафонов, А. Д. Кахилл, К. Л. Хойт, П. А. Гордан, Д. А. Хаммер, С. А. Пикуз, Динамика гибридных X-пинчей, Физика плазмы, том 41, № 1, с. 54–72, 2015
- [8] Е. В. Паркевич, И. Н. Тиликин, А. В. Агафонов, Т. А. Шелковенко, В. М. Романова, А. Р. Мингалеев, С. Ю. Савинов, Г. А. Месяц, С. А. Пикуз, Проекционная рентгенография высокого разрешения острейного катода в сильноточном вакуумном диоде в излучении X-пинча, Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 5, с. 402 – 407, 2016