

УДК 533.9.082

Исследование рентгеновского излучения микропинчевого разряда при помощи термолюминесцентных детекторов.

А.В. Баловнев, И.Г. Григорьева, Э.И. Додулат, А.С. Савелов, Г.Х. Салахутдинов.

Представлены экспериментальные результаты исследования спектра рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда получаемого на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра». Получены зависимости выхода рентгеновской эмиссии плазмы микропинчевого разряда от разрядного тока и конфигурации электродов, в том числе при их естественной эрозии.

PACS: 52.38 Ph

Ключевые слова: рентгеновское излучение, Z-пинч, плазма, метод фильтров поглощения, термолюминесцентные детекторы.

Введение

Сильноточные импульсные электроразрядные устройства (Z-пинчи) обладают исключительно высокой эффективностью преобразования вкладываемой в разряд электрической энергии в энергию рентгеновского излучения (РИ). К системам подобного типа относится установка «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НВИ), в которой реализуется при определенных условиях режим микропинчевания, сопровождающийся образованием уникального объекта, называемого плазменной точкой (ПТ) или микропинчом. В результате исследования микропинчевых разрядов (МПР) было показано [1–5], что ПТ представляет собой область плотной горячей плазмы ($N_e \approx 10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$) микронного размера ($\leq 40 \text{ мкм}$), в основном интенсивно излучающей рентгеновское излучение (до 10^{16} квантов за вспышку) за время не более 10 нс.

Высокие параметры плазмы, интересные физические процессы, относительная простота конструкции и эксплуатации делает микропинчевые установки перспективными как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач. На основе микропинчевого источника рентгеновского излучения разработа-

ны схемы рентгеновской литографии и контактной рентгеновской микроскопии биологических объектов [6, 7]. Обнаружен эффект полировки поверхности высокотемпературных сверхпроводящих пленок при воздействии на них импульсов ВУФ-излучения плазмы микропинча [8].

Исследования микропинчевого разряда проводятся во многих крупных лабораториях мира, однако физическая картина явлений в плазме МПР далека еще от полного понимания и является предметом интенсивных исследований.

Целью данной работы было исследование выхода рентгеновского излучения от разрядного тока и конфигурации электродов, в т.ч. при их естественной эрозии,

Описание установки и системы регистрации

Эксперименты производились на экспериментальной установке «Зона-2», которая представляет собой разрядное устройство типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», конструкция и параметры которой приведены в [4]. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до вакуума не хуже 10^{-5} Торр. Инициирование разряда производилось вспомогательным триггерным разрядом. Емкость накопительной конденсаторной батареи $C_0 = 20 \text{ мкФ}$. Рабочим веществом разряда являлись пары материала анода разрядного устройства, ток разряда достигал величины до 220 кА, период разряда — 8,5 мкс. Конструкция данной установки позволяла использовать различные конфигурации электродов (два острия, острие—плоскость, две плоскости и другие комбинации).

Поскольку классическая спектрометрия отдельных квантов рентгеновского излучения плазмы микропинча практически невозможна, то для

Баловнев Алексей Владимирович, аспирант.
Григорьева Ирина Гаяровна, аспирант.
Додулат Эмиль, инженер.
Савелов Александр Сергеевич, профессор.
Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.
Тел.: 8 (495) 344–14–99. E-mail: saip07@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2013 г.

© Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Додулат Э., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х., 2013

получения информации о спектре излучения приходится применять различные ядерно-физические методы. Одним из таких методов является метод фильтров поглощения [9]. Данный метод основан на спектральной селекции первичного рентгеновского излучения. Спектротелектрующим элементом в данном методе является набор фильтров различной толщины. В данном методе измеряется кривая ослабления импульсного рентгеновского излучения за фильтрами различной толщины из различных материалов или кривая поглощенной энергии рентгеновского излучения в детекторах [10].

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,5–25 кэВ использовались термомлюминесцентные детекторы (ТЛД) на основе LiF, представляющие собой набор калиброванных детекторов, каждый диаметром 5 мм и толщиной 1 мм.

Для регистрации рентгеновского излучения плазмы собирались сборки из пяти детекторов ТЛД, расположенных один за другим, причем было собрано семь сборок. Сборки помещались и крепились в камере за фильтрами поглощения (см. рис. 1) из различного материала (Be, Al, Cu) и толщины.

В ходе измерения спектра рентгеновского излучения использовались различные методы регистрации рентгеновского излучения в течение одного разряда. Использовался метод фильтров поглощения (сигналы с семиборок за фильтрами различной толщины), метод поглощенной энергии (анализ сигналов с каждого детектора ТЛД одной сборки), метод фильтров Росса (анализ сигналов соборок, расположенных за фильтрами из различных материалов).

Кроме того, контроль наличия импульсов рентгеновского излучения осуществлялся в реальном времени при помощи $p-i-n$ -диода и при помощи рентгеновской камеры-обскуры с пространствен-

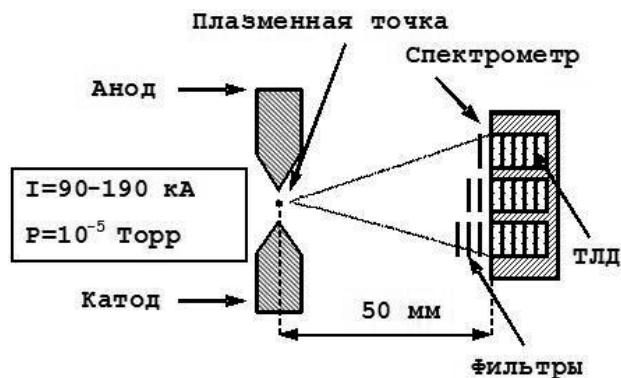


Рис. 1. Схема эксперимента.

ным разрешением 30 мкм. На данной установке были получены изображения области разряда при различной величине разрядного тока.

Данные, полученные при помощи метода фильтров поглощения, позволяют описать интегральный во времени спектр рентгеновского излучения и оценить эффективность преобразование электрической энергии, затраченной на разряд, в рентгеновское излучение микропинча.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение плазмы микропинча падает на поверхность спектрометра, в которой располагаются каналы регистрации, заполненные сборками термомлюминесцентных детекторов и закрытые фильтрами различной толщины. Одновременное облучение нескольких каналов позволяет производить измерения спектра более обширной области спектра за один раз. Это способствует увеличению точности получаемых результатов. Спектрометр располагался внутри вакуумной камеры установки, на расстоянии 50 мм от оси разряда. По полученному спектру и дозе облучения, полученной ТЛД при разряде, было определено значение коэффициента преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения измеренного спектрального диапазона.

Экспериментальные результаты и выводы

В ходе исследования были произведены измерения с разными конфигурациями электродов и различным напряжением, на них.

На рис. 2 представлены спектры рентгеновского излучения микропинча с различной конфигурацией электродов.

Несложно заметить, что характер получившихся кривых одинаков. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод, что процессы, приводящие к пинчеванию и генерации излучения, принципиально не отличаются для различных

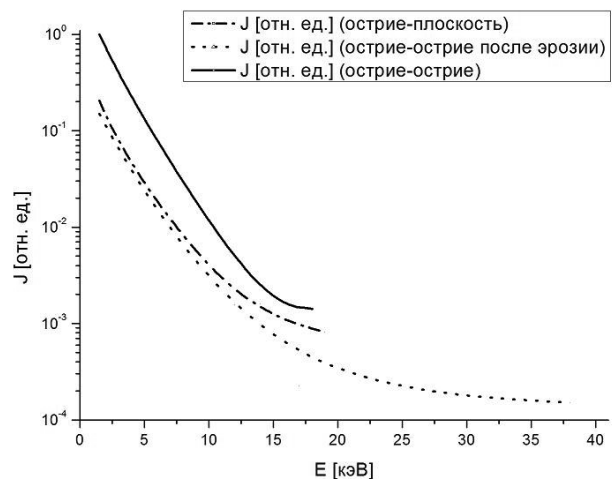


Рис. 2. Спектры рентгеновского излучения микропинча с различной конфигурацией электродов.

конфигураций электродов. Однако конфигурация электродов, тем не менее, оказывает значительное влияние на интенсивность генерируемого излучения.

В табл. 1 представлены измерения энергии рентгеновского излучения, поглощенной в детекторах, для различных конфигураций электродов.

Таблица 1

Конфигурация электродов	Энергия рентгеновского излучения, отн. единицы	Коэффициент преобразования
Острие-плоскость	0,204	0,002
Острие-острие	1,000	0,012
Острие-острие (после эрозии)	0,150	0,001

Конфигурация острие-острие, по результатам измерений, оказалась в 5 раз эффективнее конфигурации острие-плоскость. Такое поведение можно объяснить следующим образом. Область локализации первоначального разряда заметно сокращается при сохранении прочих разрядных параметров, таких как плотность и электронная температура плазмы. Однако из-за изначально меньшего радиуса плазмы большее число частиц участвует в процессе пинчевания.

При работе с данным типом разряда (НВИ) исследователи сталкиваются со значительной эрозией электродов под воздействием многократных разрядов.

Естественное изменение формы электродов за счет распыления приводит к уменьшению выхода рентгеновского излучения в 7 раз.

Все вышеперечисленные измерения проводились при токе разряда, равном 190 кА. При такой



Рис. 3. Рентгеновская обскураграмма плазмы микропинчового разряда

величине тока на обскурограммах наблюдается образование микропинчей, которые образуют цепочку отдельных источников (см. рис. 3). Большая часть рентгеновского излучения, приходится на источники с наибольшей степенью сжатия.

Для продолжения исследований в выбранном направлении следует рассмотреть, как повлияет на интенсивность и спектр излучения уменьшение тока разряда.

На рис. 4 представлены спектры рентгеновского излучения, измеренные при различной величине разрядного тока. Кроме того, в табл. 2 представлены значения энергии рентгеновского излучения, поглощенной в детекторах, и значения коэффициента преобразования электрической энергии, подведенной к установке, в энергию рентгеновского излучения данного спектрального диапазона.

Таблица 2

Ток разряда, кА	Энергия рентгеновского излучения, отн. единицы	Коэффициент преобразования
190	1,000	0,012
130	0,560	0,012
90	0,025	0,001

Таким образом, нетрудно заметить, что уменьшение разрядного тока до 130 кА привело к уменьшению интенсивности излучения в 2 раза. Это легко объясняется в рамках все той же радиационной модели, т.е. снижением энергии электронов бомбардирующих анод, а, следовательно, и уменьшением испарения его поверхности, приводящим к уменьшению общего числа частиц, задействованных в разряде.

Дальнейшее снижение разрядного тока до 90 кА приводит к нарушению режима микропинчевания на данной установке и к значительному уменьшению интенсивности излучения и,

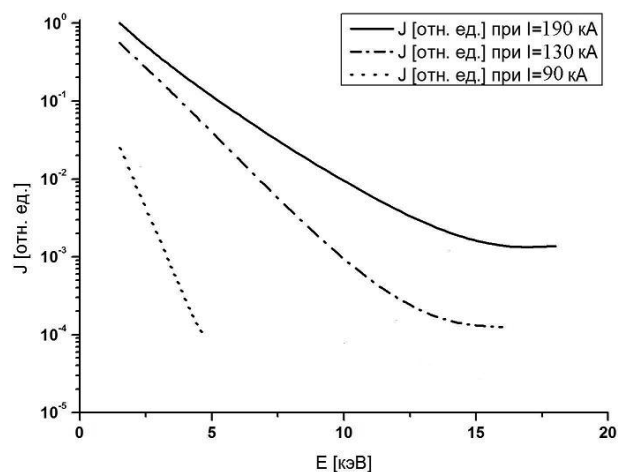


Рис. 4. Спектры рентгеновского излучения, измеренные при различной величине разрядного тока.

соответственно, к уменьшению на порядок коэффициента преобразования электрической энергии в энергию рентгеновского излучения.

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

Заключение

В ходе измерений исследована зависимость эффективности работы установки Зона-2 в качестве рентгеновского источника от формы используемых электродов и величины разрядного тока. Все полученные в ходе измерений результаты не противоречат модели радиационного сжатия.

Наибольшая интенсивность рентгеновского излучения достигалась при использовании электродов типа «острие» и разрядном токе 190 кА. Показано, что изменение формы электродов, в том числе за счет эрозии в процессе эксплуатации, приводит и многократному снижению эффективности рентгеновского источника.

Литература

1. Вихрев В.В. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. С. 981.
2. Анциферов П.С., Вихрев В.В., Иванов В.В. и др. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. Вып. 8. С. 1018.
3. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1211.
4. Башутин О.А., Савелов А.С., Вовченко Е.Д. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 8. С. 1015.
5. Долгов А.Н., Салахутдинов Г.Х. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 9. С. 818.
6. Валиев К.А., Великов Л.В., Леонов Ю.С., Семенов О.Г. // Электронная промышленность. 1984. Т. 13. С. 75.
7. Веретенников В.А., Гурей А.Е., Караев К.Т. и др. // Препринт № 10. — М.: ФИАН, 1994.
8. Афанасьев Ю.В., Веретенников В.А., Емельянов Д.Г. и др. // Препринт № 59. — М.: ФИАН, 1991.
9. Кушин В.В., Ляпидевский В.К., Пережогин В.Б. Ядерно-физические методы диагностики плазмы. — М.: МИФИ, 1985.
10. В.Н. Дементьев, С.А. Зверев, В.М. Калабашкин, и др. // Экспериментальные методы ядерной физики. Сборник статей. — М.: Атомиздат, 1979. Вып. 5. С. 58.

Research of micropinch X-rays using thermoluminescent detectors

A.V. Balovnev, I.G. Grygoryeva, E.I. Dodulad, A.S. Savelov, and G.Kh. Salakhutdinov

National Research Nuclear University «MEPhI»
31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: saip07@mail.ru

Experimental results of micropinch plasma X-rays spectrum research on «low-inductive vacuum spark» device are presented. The dependences of X-rays yield emission of the plasma as function of discharge current, share of electrodes (including their erosion) are obtained.

PACS: 52.38 Ph

Keywords: X-ray, Z-pinch, plasma, method of grey filters, thermoluminescent detectors.

Bibliography — 10 references

Received October 15, 2013