

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ТОЧКИ X-ПИНЧА НА УСТАНОВКЕ БИН

© 2023 г. И. Н. Тиликин^а, Т. А. Шелковенко^а, С. А. Пикуз^а,
И. Г. Григорьева^б, А. А. Макаров^б, Г. Х. Салахутдинов^{б,*}

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 16.11.2022 г.

Принята к публикации 17.12.2022 г.

Описана методика и приведены основные экспериментальные результаты исследования пространственной структуры плазменных объектов гибридного X-пинча в диапазоне рентгеновского излучения. Представлены результаты измерений спектральных характеристик источников рентгеновского излучения плазменных объектов. Исследования проведены с использованием термолюминесцентных детекторов на основе фторидов лития LiF(Mg, Ti).

DOI: 10.31857/S003281622303014X, EDN: IVAZQK

ВВЕДЕНИЕ

X-пинч является широкополосным источником излучения. При этом различные области X-пинча имеют разные параметры излучения: размеры излучающей области, длительность излучения и длину волны. Излучение горячей точки X-пинча лежит в основном в области мягкого рентгеновского излучения (0.2–2 нм) [1]. После образования горячей точки происходит генерация электронного пучка, имеющего более коротковолновую составляющую (<0.2 нм). В процессе протекания тока происходит генерация излучения в ультрафиолетовой области (>2 нм) [2]. При этом любое из этих излучений может быть использовано в различных отраслях науки и техники [3–5].

Несмотря на многолетние исследования излучения X-пинча, точное определение энергии, излучаемой различными областями X-пинча, представляет собой довольно сложную задачу. Поскольку X-пинч является достаточно ярким источником излучения, это позволяет использовать термолюминесцентные детекторы (ТЛД) на основе фторидов лития LiF(Mg, Ti) [6–8] для регистрации дозы излучения и ее дальнейшего пересчета в излучаемую энергию. После первых экспериментов стало ясно, что чувствительности таких детекторов достаточно для того, чтобы ре-

гистрировать излучение с пространственным разрешением.

Важно отметить, что ТЛД на основе LiF(Mg, Ti) не подвержены воздействию электромагнитных наводок и обладают линейностью отклика в широком диапазоне поглощенных доз (от 20 мЗв до 10 Зв), они практически нечувствительны к ультрафиолетовому излучению, образованному в сильноточном импульсном электроразряде [6–9].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по исследованию интенсивности рентгеновского излучения и энергетической составляющей горячей точки при сильноточном импульсном электрическом разряде проводились на установке БИН [1] (гибридный X-пинч с 30-микрометровой Mo-проволочкой длиной 2.3 мм, максимум тока 270 кА, время нарастания тока 100 нс, напряжение 300 кВ) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Принципиальная схема установки БИН представлена на рис. 1.

В вакуумной камере для диагностики установлены различные детекторы: зондовые детекторы и пояс Роговского предназначены для измерения тока, а фоточувствительные детекторы РСД (Photo conducting detectors) – для измерения распределения интенсивности излучения X-пинча

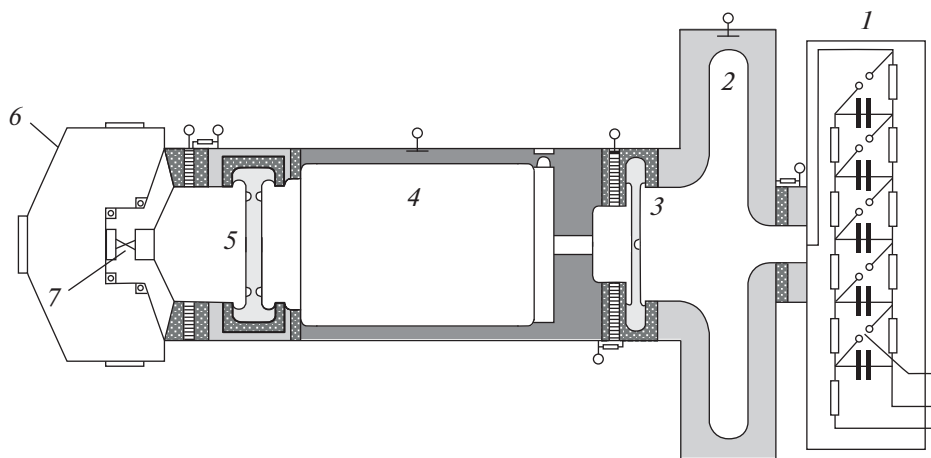


Рис. 1. Схема установки БИН. 1 – генератор Маркса; 2 – промежуточный конденсатор; 3 – коммутатор; 4 – формирующая линия; 5 – выходной разрядник; 6 – вакуумная камера; 7 – X-пинч.

во времени (калиброванные алмазные датчики с фотопроводимостью) [10].

Для регистрации излучения с пространственным разрешением была использована схема получения одномерного пространственного разрешения с помощью щели шириной 200 мкм, выполненной в пластине из тантала (Ta) толщиной 50 мкм. Длина щели составляла 2 мм, от фоновой подсветки защищал экран толщиной 50 мкм из свинца (Pb). Расстояние от X-пинча до щели составляло 7 см, а от щели до фотопластины – 28 см. Расстояние подбиралось таким образом,

чтобы излучение горячей точки попадало на один ТЛД. В данном случае размер области образования горячей точки равен ~200 мкм, размер детектора 1 мм, таким образом, пространственное увеличение составляет 5 раз. Схема получения изображения приведена на рис. 2.

Для получения распределения излучения вдоль длины проволочки гибридного X-пинча щель размещали перпендикулярно направлению проволочки. За пластиной устанавливалась сборка из ТЛД. При этом детекторы располагались торцом к излучению для увеличения пространственного разрешения. Рентгеновское излучение от горячей точки распространялось по нормали к плоскости OXY (см. рис. 2) и проходило через сборку ТЛД таким образом, чтобы изображение плазменной точки попадало в середину сборки (в эксперименте были установлены две сборки из ТЛД). Для регистрации рентгеновского излучения также использовалась фотопластина Fuji BAS TR [11], чувствительная как к ультрафиолетовому, так и к мягкому рентгеновскому излучению. Для регистрации излучения с временным разрешением в каждом выстреле использовались PCD, установленные за фильтрами из алюминия (Al) толщиной 4 мкм и титана (Ti) толщиной 12.5 мкм. На рис. 3 приведены сигналы с PCD и ток через X-пинч.

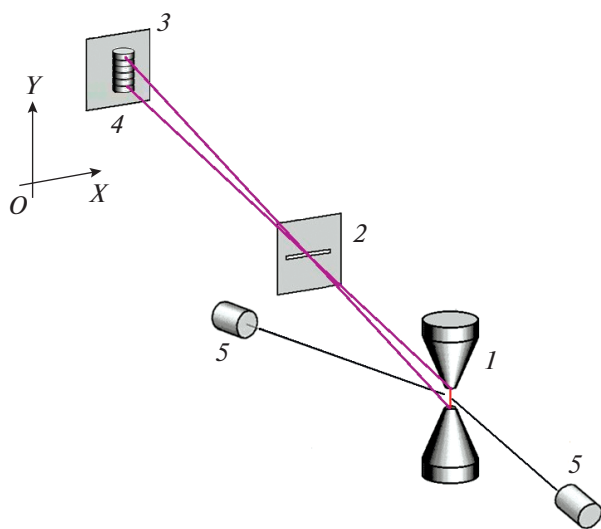


Рис. 2. Схема эксперимента по регистрации излучения гибридного X-пинча с пространственным разрешением с помощью ТЛД на основе LiF(Mg,Ti). 1 – вертикально расположенный гибридный X-пинч; 2 – горизонтальная щель шириной 200 мкм; 3 – вертикальная сборка ТЛД на основе LiF(Mg,Ti); 4 – фотопластина Fuji BAS TR; 5 – PCD.

Сигнал с фотодетектора за фильтром из Ti толщиной 12.5 мкм показывает наличие мягкого рентгеновского излучения с длиной волны от 0.25 до 0.5 нм, что говорит об образовании горячей точки [11, 12]. При этом PCD с фильтром из Al толщиной 4 мкм регистрирует излучение с длиной волны менее 1.8 нм, что обеспечивает более широкую полосу пропускания излучения. Данный детектор показывает наличие излучения до и после излучения горячей точки. Это говорит о

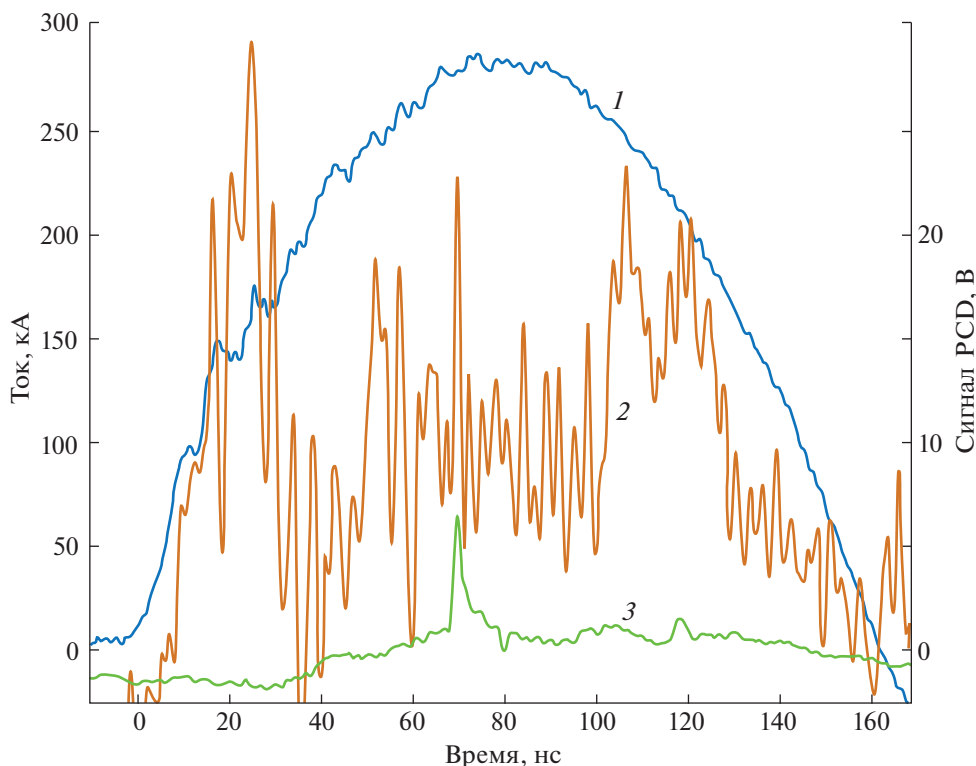


Рис. 3. Сигналы тока через X-пинч (1) и сигналы PCD за фильтрами из Al толщиной 4 мкм (2) и Ti толщиной 12.5 мкм (3).

других источниках излучения в данном выстреле, кроме горячей точки X-пинча.

На рис. 4 приведено полученное на фотопластине изображение от излучения гибридного X-пинча, зарегистрированное через щель. Изменением контраста изображения можно восстановить положение каждого из установленных в эксперименте ТЛД (в эксперименте были установлены две сборки 1 и 2 из ТЛД, см. рис. 4).

Профиль распределения интенсивностей излучений, зарегистрированных фотопластиной, приведен на рис. 5а. Профиль построен вдоль оси OY внутри области, обозначенной позицией 3 на рис. 4. На профиле почернений заметны два участка, имеющие наибольшую интенсивность при наименьшем размере излучающей области. Размер можно оценить, исходя из размытия края изображения щели. Данные участки соответствуют положению горячей точки в X-пинче [11, 12]. В данном эксперименте наблюдалось излучение от двух горячих точек, одна из которых была более интенсивной, согласно сигналам с фотодатчиков. Для того чтобы иметь возможность сравнить поглощенную энергию излучения, которую регистрирует каждый ТЛД, рассчитан интеграл почернений внутри той области, которую перекрывает каждый из детекторов (рис. 5б, кривая 3). Распределение энергии излучения, поглощенной ТЛД, приведено на рис. 5б (кривые 1 и 2).

Из графиков видно неплохое соответствие кривых, если сравнивать в относительных единицах энергию, поглощенную ТЛД, и интеграл почернений, который пропорционален поглощенной энергии. Это дает возможность использовать ТЛД для получения распределения поглощенных доз, используя щель (или камеру-обскуру) для построения изображения горячей точки на сборке ТЛД. В случае использования фотопластин определение абсолютной величины поглощенной энергии излучения представляет определенную сложность.

ТЛД позволяют вычислить энергию, излученную из конкретной области плазменного объекта. В данном случае ТЛД № 5 и № 9 регистрировали излучение из горячей точки. Вычисление поглощенной дозы излучения и пересчет поглощенной дозы в энергию излучения позволили определить энергию, воздействующую на детектор. Энергия излучения составила 69 и 94 мкДж для каждой из горячих точек. Учитывая изотропность излучения, общая излученная энергия во все направления составила 11 и 15 мДж для каждой из двух горячих точек. Значение излученной энергии из горячей точки можно также определить по сигналу PCD как интеграл зарегистрированной кривой излучения. В данном выстреле излученная энергия составила 9 и 13 мДж для каждой из горячих точек. Однако, поскольку PCD был установлен за

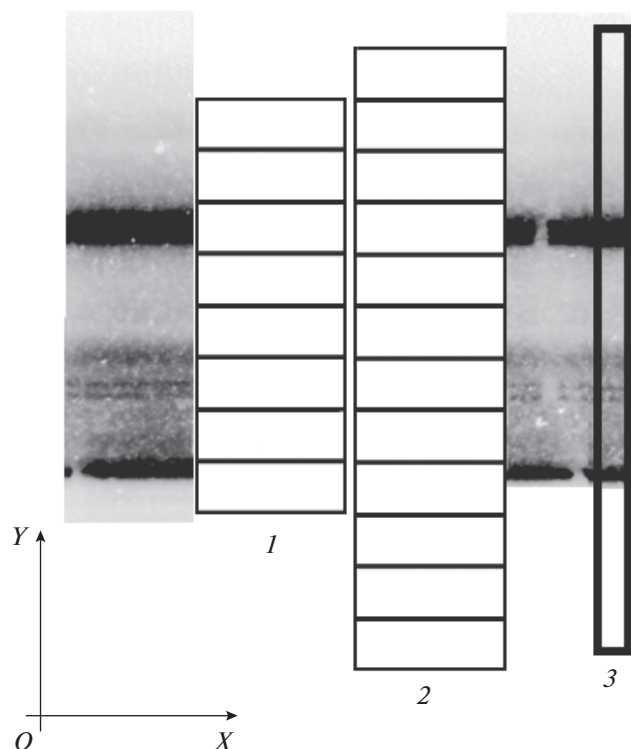


Рис. 4. Изображение на фотопластине, полученное при взрыве гибридного X-пинча с 30-микрометровой Mo-проволочкой, на котором видна тень от ТЛД. По тени восстановлено положение сборки из ТЛД. 1 – первая сборка, 2 – вторая сборка, 3 – область, по которой строился профиль поглощенной энергии.

Al-фильтром толщиной 4 мкм, его эффективная спектральная чувствительность оказалась ниже, поэтому и полученное значение излученной энергии чуть ниже, чем за ТЛД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования ТЛД в схеме с пространственным разрешением, что позволяет определять излучаемую энергию из конкретных областей плазменного объекта. В случае сложных объектов, таких как X-пинч, например, это позволяет определить излучаемую энергию от разных плазменных объектов, в том числе и от такого наиболее интересного объекта, как горячая точка X-пинча, которая является наиболее широко используемым источником мягкого рентгеновского излучения. В проведенной серии экспериментов была определена излученная энергия, которая составила 11 и 15 мДж для каждой из горячих точек, образовавшихся при взрыве X-пинча.

Несмотря на большие размеры ТЛД (порядка 1 мм в минимальном сечении), его высокая чувствительность позволяет, используя схему с большим увеличением, регистрировать излучение с

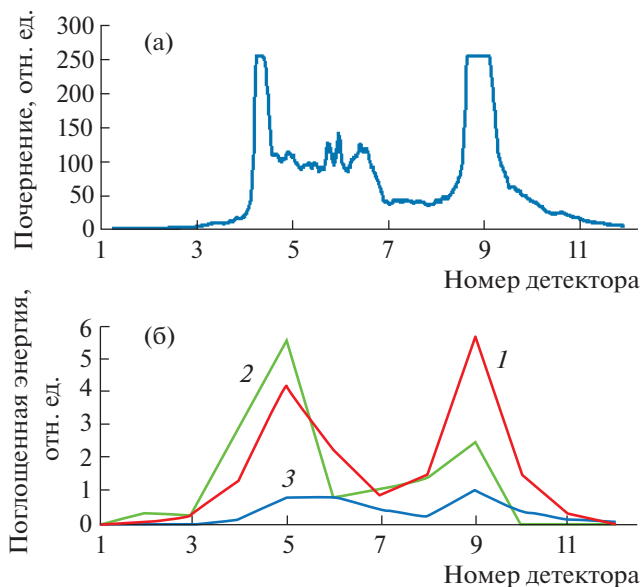


Рис. 5. а – профиль почернений фотопластины; б – суммарная зарегистрированная энергия излучения (3), полученная в области, аналогичной положению ТЛД, и поглощенная энергия, зарегистрированная с помощью первой и второй сборок ТЛД (соответственно 1 и 2).

пространственным разрешением порядка 200 мкм. В данной серии экспериментов энергия излучения определялась двумя независимыми способами: по ТЛД и по РСД. При этом результаты совпали с точностью более 80%. С учетом разной спектральной чувствительности ТЛД и РСД это позволяет судить о неплохой точности нового метода измерения энергии излучения.

Как показывают эксперименты, ТЛД могут быть успешно использованы при диагностике плазменных объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана программой НИЯУ МИФИ “Приоритет 2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 4. С. 319.
2. Pikuz S.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 115012. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac3211>
3. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Douglass J.D., Blesener I.C., Greenly J.B., McBride R.D., Hammer D.A., Kusse B.R. // Phys. of Plasmas. 2007. V. 14. P. 102702.
4. Grabovskii E.V., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Porofeev I. Yu. // Plasma Physics Reports. 2004. V. 30. № 2. P. 121.
5. Shelkovenko T.A., Sinars D.B., Pikuz S.A., Hammer D.A. // Phys. of Plasmas. 2001. V. 8. № 4. P. 1305.

6. *Balovnev A.A., Bashutin O.A., Grigoryeva I.G., Salakhutdinov G.Kh.* // Plasma Physics Reports. 2019. V. 45. № 3. P. 277.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X19020028>
7. *Grigoryeva I.G., Khil'ko M.V., Salakhutdinov G.Kh.* // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1390. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012105>
8. *Григорьева И.Г., Макаров А.А., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х.* // ПТЭ. 2022. № 4. С. 90.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040115>
9. *Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 84.
<https://doi.org/10.7868/S0032816218010135>
10. *Spielman R.B., Ruggles L.E., Pepping R.E., Breeze S.P., McGurn J.S., Struve K.W.* // Rev. of Scie. Instruments. 1997. V. 68. P. 762.
11. *Tilikin I.N., Tskhai S.N., Shelkovenko T.A., Savinov S.Y., Pikuz S.A.* // Plasma Physics Reports. 2018. V. 44. № 6. P. 600.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X18060107>
12. *Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Иваненков Г.В.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 1. С. 54.
<https://doi.org/10.7868/S0367292115010035>