

УДК 53.08

**МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ АБСОЛЮТНЫХ ПОТОКОВ  
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ  
В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0.15–1.0 кэВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ  
 $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$  И ВРЕМЕННЫМ 30 пс РАЗРЕШЕНИЯМИ**

© 2021 г. А. Н. Мунтян<sup>а</sup>, С. И. Петров<sup>а</sup>, Н. М. Романова<sup>а,\*</sup>, Е. В. Санкин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики, Институт лазерно-физических исследований  
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

\*e-mail: natusromashka@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2020 г.

После доработки 07.08.2020 г.

Принята к публикации 10.09.2020 г.

Разработана методика регистрации рентгеновского излучения со спектральным разрешением  $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$  в пяти спектральных каналах в диапазоне энергий 0.15–1.0 кэВ и временным разрешением  $\sim 30$  пс на основе многослойных рентгеновских зеркал и рентгеновского электронно-оптического фотохронографа. Методика применяется для регистрации динамики формирования поля рентгеновского излучения в полости конвертора.

10.31857/S0032816221010353

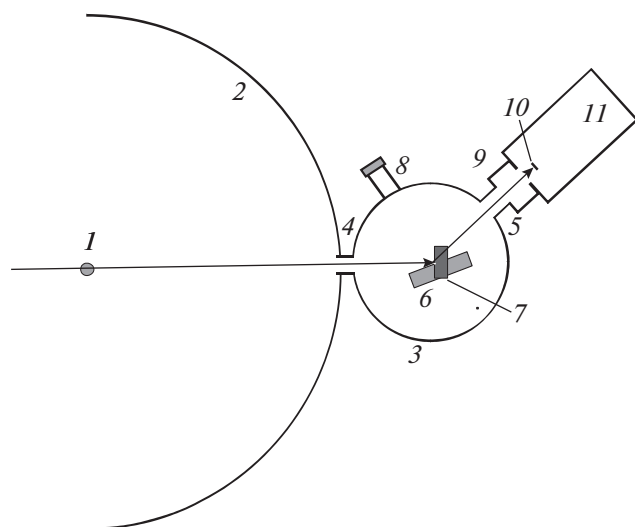
Значительная часть экспериментов, проводимых на установке “Искра-5”, основана на облучении исследуемых мишеней рентгеновским излучением, которое формируется в различных боксах-конверторах при воздействии на них лазерным излучением [1]. Характерные температуры рентгеновского излучения в полости конвертора лежат в диапазоне 100–200 эВ, следовательно, регистрацию необходимо проводить в спектральном диапазоне 0.1–1 кэВ с временным и спектральным разрешением. Ранее для таких измерений использовалась методика, в которой спектральные каналы вырезались при помощи зеркал полного внешнего отражения и краевых фильтров, что обеспечивало спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \approx 3–7$  [2].

В данной работе представлена методика регистрации рентгеновского излучения со спектральным разрешением  $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$  в пяти спектральных каналах в диапазоне энергий 0.15–1.0 кэВ и временным разрешением  $\sim 30$  пс на основе многослойных рентгеновских зеркал (м.р.з.) и рентгеновского электронно-оптического фотохронографа. Для реализации методики разработан спектрограф РИВС-5. Спектрограф обеспечивает необходимый угол падения излучения на сборку из пяти м.р.з. и отраженного излучения – на фотокатод фотохронографа РФР-4 [3]. Фотография спектрографа РИВС-5 представлена на рис. 1.

Для калибровки м.р.з. подготовлен стенд на основе рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 и измерены кривые отражения пяти м.р.з. в трех первых порядках отражения на излучении линии  $K_{\alpha}\text{Cr}$  5.415 кэВ. По известным формулам [4, 5] определены межплоскостные расстояния, отно-



Рис. 1. Фотография спектрографа РИВС-5.



**Рис. 2.** Оптическая схема регистрации. 1 – мишень; 2 – камера взаимодействия; 3 – корпус РИВС-5; 4 – входной фланец; 5 – выходной фланец; 6 – сборка многослойных зеркал; 7 – вспомогательное зеркало; 8 – окно для наблюдения за плоскостью зеркал; 9 – вакуумный затвор; 10 – фотокадод РФР-4; 11 – РФР-4.

шение толщин слоев материалов в зеркале и шероховатости слоев зеркал.

По стандартным методикам [6] проведена калибровка абсолютной чувствительности фотохронографа РФР-4 в центре экрана, составившей  $7.8 \cdot 10^{-3}$  отсчетов п.з.с.·см<sup>2</sup>/электрон, неоднородности чувствительности РФР-4 по экрану и его дисторсионных искажений, толщины подложки фотокаатода (полипропилен толщиной 2.32 мкм) и толщины фотокаатода (Au толщиной 24 нм).

Оптическая схема регистрации спектрографа РИВС-5 приведена на рис. 2.

Предварительно на основе данных по результатам калибровки м.р.з. были рассчитаны спектральные кривые отражения зеркал при рабочем угле падения излучения 11° на зеркала. Рассчитанные кривые отражения приведены на рис. 3.

По программе XRAY [7] рассчитаны величины сигналов на фотохронографе в зависимости от температуры излучения. Подобраны параметры дополнительных фильтров, позволяющие получить сигналы за зеркалами в пределах динамического диапазона регистрации РФР-4 при темпе-

ратуре излучения от 50 до 150 эВ. Для канала 4 требуется дополнительный фильтр из Си толщиной ~1 мкм, для канала 3 – фильтр из Fe толщиной ~1 мкм, для канала 1 – фильтр из лавсана толщиной ~3.5 мкм. Для каналов 2 и 5 дополнительные фильтры не требуются.

Спектральный состав излучения, регистрируемый в каждом канале при температуре излучения 100 эВ, представлен на рис. 4а. Как видно из рис. 4а, влияние спектральной чувствительности фотокаатода РФР-4 и дополнительных фильтров приводит к тому, что в канале 1 средняя регистрируемая энергия кванта изменится и составит 250 эВ вместо 180 эВ. На рис. 4б представлен спектральный состав излучения, зарегистрированный без и при наличии дополнительного фильтра. В канале 2 примерно 20% от величины сигнала будет определяться излучением, лежащим в К-окне углерода. В трех других каналах наличие дополнительных фильтров существенно не влияет на регистрируемый спектральный состав излучения.

Спектрограф был использован в опытах на основной камере установки “Искра-5”. На рис. 5 представлены характерная фотохронограмма формы импульсов, зарегистрированных в разных каналах, и потоки рентгеновского излучения из мишени в момент максимальной амплитуды импульсов и за 300 пс до максимума. Сигнал в канале 5 оказался ниже порога регистрации.

В данном опыте облучалась мишень, представляющая собой цилиндр из полипараксилилена диаметром 0.65 мм и длиной 1.65 мм, покрытый изнутри слоем золота толщиной ~2 мкм. Мишень облучалась четырьмя каналами установки “Искра-5”, излучение вводилось через 4 отверстия в цилиндре, каждое диаметром 0.3 мм. В боковой поверхности цилиндра прорезана щель, на которую были наклеены фольги различных типов. Как показали измерения по стандартной методике [2], обладающей пространственным разрешением, вклад излучения из щели составил менее 10%, и в первом приближении можно считать, что все излучение вышло из отверстия ввода.

В табл. 1 представлены результаты измерения длительности импульса на полувысоте интенсивности и температуры излучения для каждого канала в момент максимальной амплитуды импульса. Согласно табл. 1, пиковая температура излучения в

**Таблица 1.** Длительности импульсов на полувысоте интенсивности  $\tau_{0.5}$  и пиковые температуры излучения  $T_e$  для каждого канала в момент максимальной амплитуды импульса

| Параметр          | Канал 1, 0.25 кэВ | Канал 2, 0.4 кэВ | Канал 3, 0.6 кэВ | Канал 4, 0.8 кэВ |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\tau_{0.5}$ , нс | $0.82 \pm 0.1$    | $0.85 \pm 0.05$  | $0.80 \pm 0.05$  | $0.65 \pm 0.05$  |
| $T_e$ , эВ        | $83 \pm 20$       | $77 \pm 6$       | $82 \pm 5$       | $87 \pm 4$       |

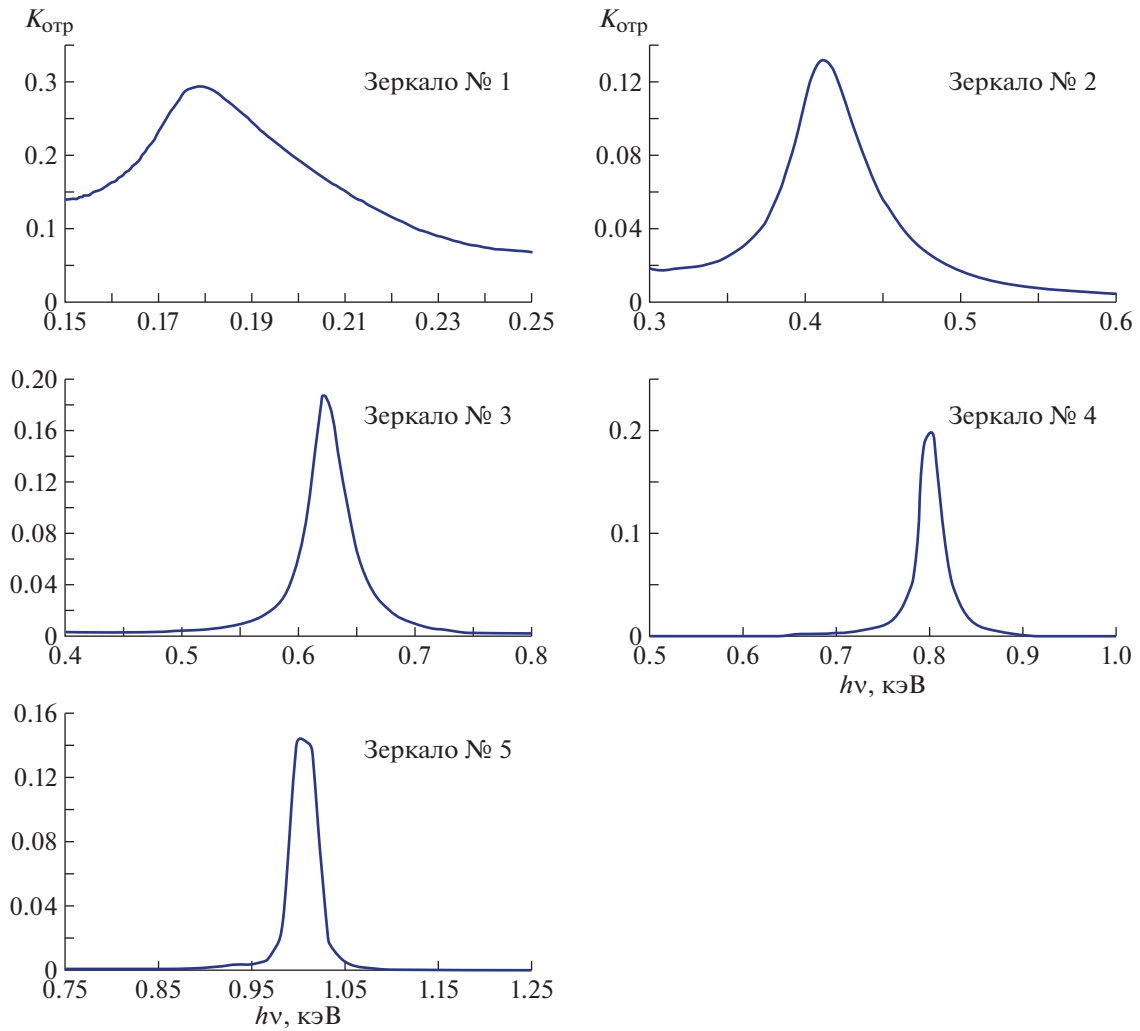


Рис. 3. Кривые отражения м.р.з. при угле падения излучения 11°.

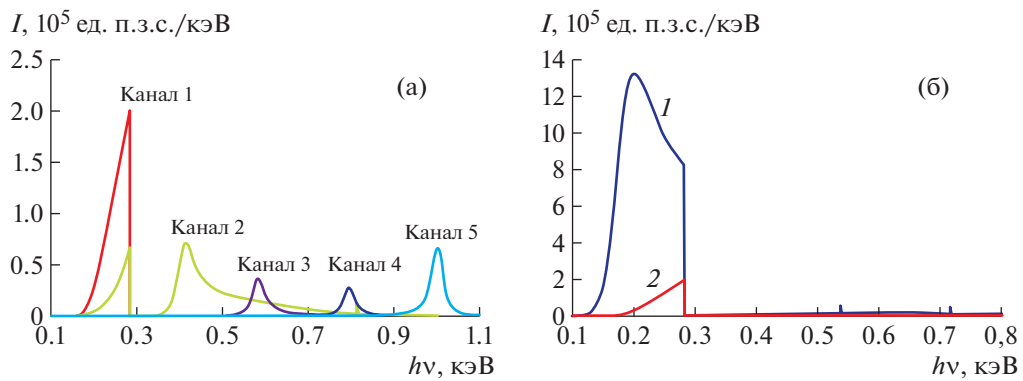
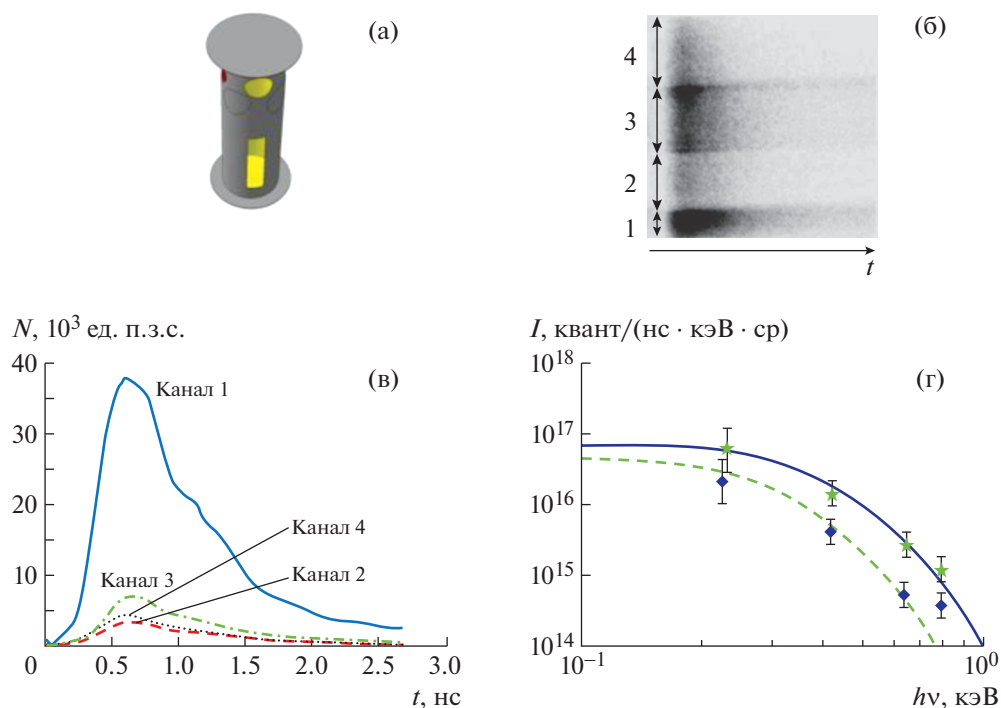


Рис. 4. Спектральный состав излучения, регистрируемый: **а** – в каналах 1–5 при температуре излучения 100 эВ; **б** – в канале 1 без (1) и при наличии (2) дополнительного фильтра.



**Рис. 5.** Регистрация свечения мишени с временным разрешением в различных спектральных интервалах: **а** — вид мишени, как ее видит фотохронограф; **б** — фотохронограмма; **в** — форма импульса в спектральных каналах; **г** — восстановленные потоки рентгеновского излучения из мишени на момент максимальной амплитуды импульсов (звездочки) и за 300 пс до максимума (ромбики), а также планковский спектр при температурах 83 эВ (сплошная линия) и 64 эВ (штриховая).

боксе-конверторе равна  $\approx 80$  эВ, а длительность импульса в спектральном диапазоне  $\leq 0.6$  кэВ составила  $\sim 0.8$  нс (что совпадает с результатами регистрации по стандартной методике [2]) и уменьшилась до 0.65 нс в канале 0.8 кэВ.

Таким образом, реализована методика регистрации излучения лазерной плазмы в диапазоне энергий 0.15–1.0 кэВ со спектральным разрешением  $\lambda/\Delta\lambda \approx 20$  и временным разрешением 30 пс на основе м.р.з. и рентгеновского электронно-оптического фотохронографа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абзаев Ф.М., Бельков С.А., Бессараб А.В., Бондаренко С.В., Бушуев В.С., Гайдаш В.А., Гаранин С.Г., Долголева Г.В., Дороготовцев В.М., Жидков Н.В., Изгорodin В.М., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Литвин Д.Н., Мартыненко С.П. и др. // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. Вып. 6(12). С. 1993.
2. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 1. С. 101.
3. Лазарчук В.П., Литвин Д.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Прянишников И.Г., Сенник А.В. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 251.
4. Виноградов А.В. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 12. С. 1113.
5. Чхало Н.И. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур ИФМ РАН, 2009.
6. Лазарчук В.П., Мунтян А.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 255.
7. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // Тез. докладов XII Всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". (Звенигород, 2007) Троицк: ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2007. С. 170.