

# МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНИ «ГАЗОВЫЙ МЕШОК»

*Д. М. Доброцветов, А. Н. Мунтян, С. И. Петров, Н. М. Романова, С. С. Таран*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе описана методика, позволяющая измерять скорость распространения тепловой волны в мишенях подкритической плотности, время их прогрева, а также коэффициенты конверсии лазерного излучения в рентгеновское линейчатого и непрерывного спектра в экспериментах на установке «ЛУЧ». Методика основана на пространственно-временной (пространственное разрешение 150 мкм, временное 50 пс) регистрации рентгеновского излучения в 3 узких спектральных интервалах от 1 кэВ до 3 кэВ, проводимых на рентгеновском фотохронографе РФР-4. В проведенных опытах скорость прогрева мишени составила  $(1-3) \cdot 10^7$  см/с для тепловой волны в области полимерного окна и  $(5-13) \cdot 10^7$  см/с для тепловой волны в газовой области, выход рентгеновского излучения в линиях L-серии криптона в различных опытах лежал в диапазоне 3–8 % от энергии лазерного импульса.

Одним из перспективных типов мишеней предназначенных для просвечивания объектов рентгеновским излучением являются мишени подкритической плотности. В таких мишенях лазерное излучение поглощается не в области критической плотности, а внутри объема мишени и значительная часть [1] лазерного излучения ( $>10\%$ ) конвертируется в линейчатое рентгеновское излучение. В зависимости от задачи могут выбираться различные мишени-конверторы. На установке «ЛУЧ» [2] проводятся исследования таких мишеней с целью изучения динамики генерации линейчатого излучения.

В проведенной серии экспериментов мишень представляла собой цилиндр из полипараксилилена, рис. 1, с толщиной стенки 15 мкм, наполненный внутри Kг под давлением 0,5–1 атм. Торцы цилиндра были закрыты тонкой полимерной пленкой (~0,4 мкм), на которую падал лазерный пучок. Облучение проводилось второй гармоникой  $\lambda_{2\omega} = 0,53$  мкм одного канала установки «ЛУЧ». Размеры пятна фокусировки составляли  $400 \times 700$  мкм. Фокусное расстояние объектива составляло 1 м при апертуре пучка  $185 \times 185$  мм. Таким образом, можно считать, что лазерное излучение внутри мишени распространялось в газовой среде и не падало на стенку мишени. Энергия импульса варьировалась в каждом эксперименте и лежала в интервале 170–270 Дж. Длительность импульса составляла 1,5–2 нс.

Изучалась картина пространственно-временной генерации рентгеновского излучения вдоль цилиндра. Пространственное разрешение вдоль цилиндра и спектральную селекцию обеспечивал спектрограф

РИВС-2 [3], который при помощи трех щелей обскур строил на фотокатоде фотохронографа 3 изображения мишени с  $M = 1,6$ . Каждое изображение строилось в своем диапазоне спектра, вырезаемом при помощи набора K-фильтров, расположенных на щелях спектрографа. Вырезались участки непрерывного рентгеновского спектра, а также участок с линиями L-серии криптона.

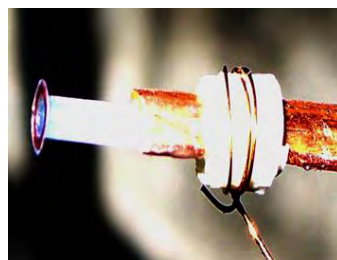


Рис. 1. Вид цилиндрической мишени «газовый мешок».

Временное разрешение обеспечивал рентгеновский фотохронограф РФР-4 [4]. Фотографии РФР-4 и спектрографа РИВС-2 приведены на рис. 2. Схема измерительного тракта методики [5] пространственно-временной регистрации излучения в спектральном диапазоне приведена на рис. 3. В проведенной серии экспериментов временное разрешение составляло 40 пс, пространственное – 150 мкм.



а



б

Рис. 2. Внешний вид: а – спектрометр РИВС-2, б – фотохронограф РФР-4

Предварительно на калибровочном стенде «РЭКС» [6] была проведена калибровка всех необходимых параметров фотохронографа РФР-4, включая

спектральную чувствительность фотокатода, спектральное пропускание фильтров, получена картина дисторсионных искажений и неоднородности чувствительности прибора. Погрешность калибровки пропускания каждого фильтра составляет <2 %, погрешность размеров щелевой обскуры <10 %, погрешность калибровки абсолютной чувствительности РФР-4 ~12 %. Суммарная погрешность измерения абсолютных потоков рентгеновского излучения в отдельных спектральных интервалах составляет до 20 %.

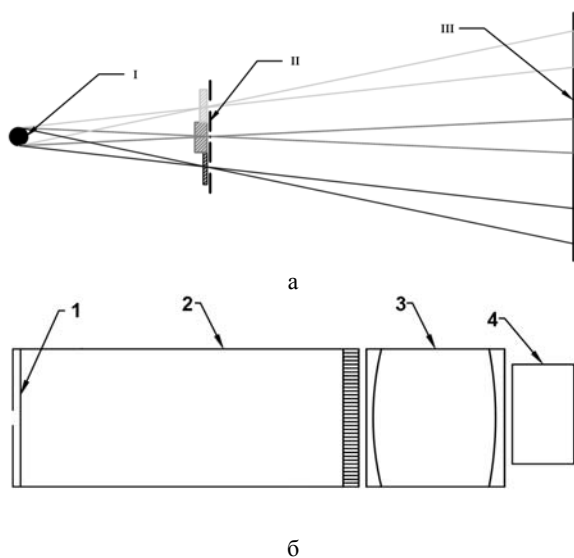


Рис. 3. Схема измерительного тракта: а – РИВС-2, б – РФР-4: I – источник регистрируемого излучения, II – блок щелевых обскур с набором фильтров, III – фотокатод (лавсан 3,6 мкм + Au 210 Å); 1 – фотокатод (лавсан 3,6 мкм + Au 210 Å), 2 – РЭОП СРП-7 (рентгеночувствительный электронно-оптический преобразователь), 3 – усилитель яркости, 4 – ПЗС камера

Обработка полученных фотохронограмм с учетом результатов калибровок, однородности чувствительности по экрану, компенсации дисторсионных искажений, скорости и нелинейности развертки РФР-4 проводилась при помощи программы CCD\_CAM [7]. Параметры задействованных каналов: средняя энергия

кванта  $h\nu_{cp}$  в канале и ширина окна пропускания  $\Delta h\nu$ , рассчитаны в программе XRAY [8], материалы и толщины фильтров, полученные по результатам калибровки приведены в таблице.

Параметры каналов, использованных в проведенных опытах

№ канала	Состав фильтра	$h\nu_{cp}$ , кэВ	$\Delta h\nu$ , кэВ
1	19 мкм Ве + 8 мкм Al	1,8	–
2	19 мкм Ве + 20 мкм Cl	2,4	0,64
3	19 мкм Ве + 10 мкм Cl	2,3	0,87

В данной схеме регистрации фильтры первого канала подавляют L-серию криптона поэтому сигнал, в основном, определяется непрерывной частью спектра. Фильтры второго и третьего канала имеют окно пропускания для L-серии криптона. Спектральные характеристики второго и третьего каналов отличаются слабо (см. рис. 4), таким образом, третий канал служит для расширения динамического диапазона регистрации линейчатой части спектра.

За счет контраста между первым и вторым каналами можно судить о соотношении линейчатого и непрерывного спектра в измеряемом излучении. Для предварительной оценки необходимых толщин фильтров требовалось выбрать предполагаемые форму спектра и яркость свечения мишени. Яркость рассчитывалась из предположения 2 % конверсионной эффективности мишени. В качестве модели непрерывного спектра излучения был выбран тормозной спектр свободно-свободных электрон-ионных столкновений [9].

$$I(h\nu) = \frac{E_{tot}}{T_e} \cdot \exp(-h\nu/T_e) \quad (1)$$

Очевидно, что при использовании этой модели, одного канала, измеряющего непрерывный спектр недостаточно для одновременной оценки энергии выхода и электронной температуры, поэтому электронная температура была принята равной 500 эВ.

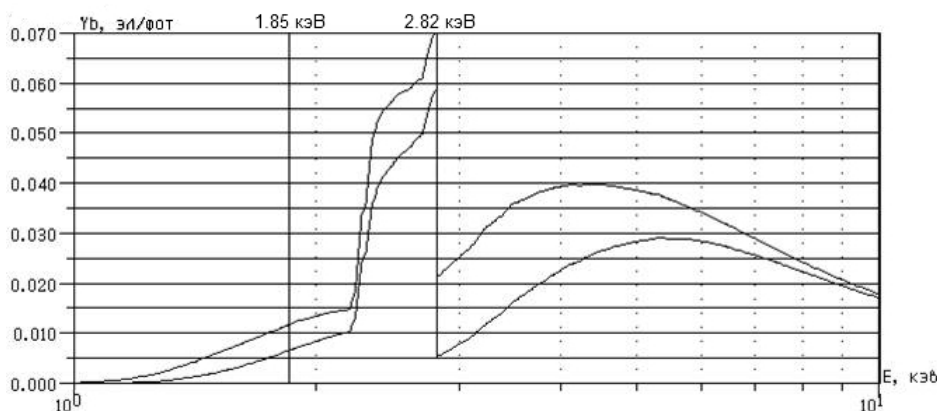


Рис. 4. Спектральная характеристика 2 и 3 каналов, выраженная в количестве электронов вылетающих из фотокатода на 1 фотон, падающий в измерительный тракт

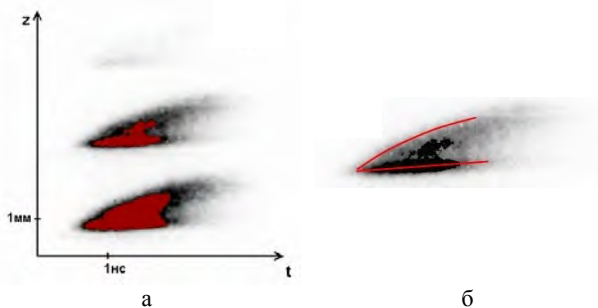


Рис. 5. Фотохронограммы эксперимента: а – в трех спектральных каналах, б – второй спектральный канал с проведенными огибающими

На рис. 5 приведены фотохронограммы одного из экспериментов в серии. Сплошным серым цветом на рис. 5а обозначена область насыщения регистрации. Ось  $z$  и указанный на ней масштаб соответствуют координате вдоль оси мишени. Сигнал во втором и третьем канале достиг насыщения, т. к. предварительные оценки яркости мишени оказались ниже наблюдавшейся в эксперименте. Поэтому данные результаты позволяют грубо оценить снизу конверсионную эффективность мишени.

Распределение яркости свечения мишени в разные моменты времени согласно результатам измерения второго канала представлены на рис. 6.

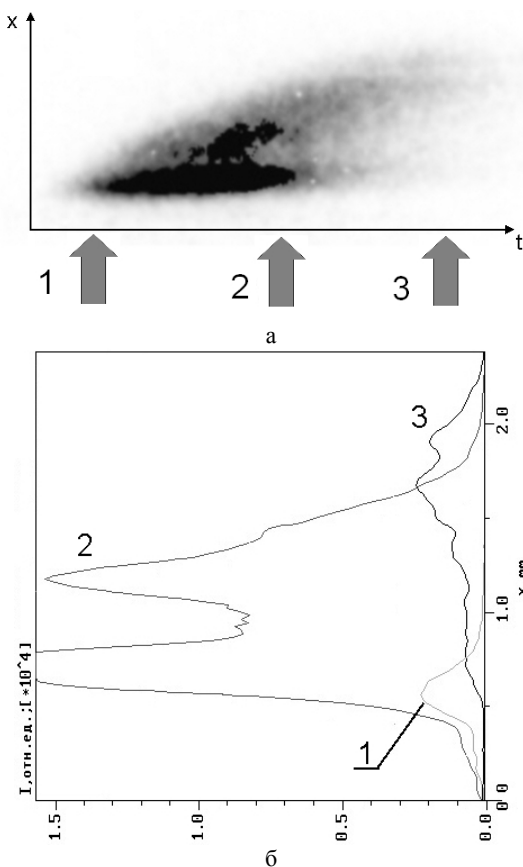


Рис. 6. Распределение яркости свечения мишени по результатам измерения второго канала: а – измерения второго канала, б – распределение яркости свечения мишени в разные моменты времени

Несмотря на достижение насыщения регистрации, на фотохронограммах, рис. 5а, и прописях профиля яркости свечения мишени, рис. 6б, в различные моменты времени, рис. 6,а, отчетливо видно наличие двух максимумов яркости вдоль оси мишени. Для получения скоростей распространения тепловых волн был выбран второй канал. Максимумы яркости приходятся на области насыщения, поэтому огибающая тепловой волны в газовом объеме условно проведена по уровню 20 % от максимального сигнала, т. е.  $\sim 3000$  отсчетов матрицы телекамеры. Форма области насыщения регистрации тепловой волны в области полимерного окна достаточно симметрична, вместо огибающей была проведена прямая вдоль ее оси симметрии. Благодаря проведенной ранее компенсации дисторсионных искажений, угол касательной в каждой точке огибающей соответствует скорости движения тепловой волны, которая составила от  $V_{2\min} = (5 \pm 0,4) \cdot 10^7$  см/с до  $V_{2\max} = (13 \pm 1) \cdot 10^7$  см/с для тепловой волны в газовом объеме. Для тепловой волны в области полимерного окна аналогично получена средняя скорость движения  $V_1 = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^7$  см/с. Минимально достижимая погрешность определяется размером пиксела, а в общем случае зависит от скорости развертки, выбора способа проведения огибающей и контрастности фотохронограммы и составляет не менее 8 %.

Дальняя и ближняя тепловые волны не имеют строго определенной границы и их сигнал частично сливается, однако по минимуму профиля яркости можно провести условную границу между фронтами и сделать грубую оценку соотношения их энергетического выхода. Для этой оценки снова используем 2 канал (рис. 7). В результате суммарные сигналы отличаются на 18 %, отсюда, вклад ближней тепловой волны в общий энергетический выход мишени в пределах погрешности равен вкладу дальней тепловой волны.



Рис. 7. Условное разделение сигнала ближней и дальней тепловой волны

Таким образом, разработанная на базе щелевого фотохронографа методика позволяет измерять скорость распространения тепловых волн в нагреваемой лазерным импульсом мишени подкритической плотности, которые составляли от  $1,5 \cdot 10^7$  см/с до  $13 \cdot 10^7$  см/с в зависимости от условий эксперимента, конверсионную эффективность мишеней, составлявшую от 3 % до 8 % (в L-серии криптона).

В заключение авторы благодарят сотрудников установки «ЛУЧ» за проведенные эксперименты.

## Литература

1. Back C. A. et al. Efficient Multi-ke V Underdense Laser-Produced Plasma Radiators // *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87, 27 5003.

2. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6. IV Харитоновские тематические научные чтения. // Сборник аннотаций. – Саров, 2002. С. 82.

3. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Фотохронографические методы регистрации пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения на установке «Искра-5» // *Физика плазмы*, 1994, Т. 20, № 1, С.101.

4. Лазарчук В. П., Литвин Д. Н., Муругов В. М. и др. Рентгеновский фотохронограф РФР-4 / ПТЭ, 2004, № 2, С. 128–132.

5. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Методика пространственно-временных измерений генерации линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы на установке «ИСКРА-5» / *Физика плазмы*, 2006. 32, № 2, С. 1–7.

6. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Методики калибровок рентгеновских фотохронографов и элементов рентгеновских измерительных схем / ПТЭ, 2004. № 2, С. 133–138.

7. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Пакет программ CCD-CAM для обработки фотохронограмм и спектрограмм. XII Всероссийская конференция «Диагностика Высокотемпературной Плазмы». г. Звенигород, Московской области, 3–8 июня 2007 / Тезисы докладов. С. 172.

8. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сеник А. В. Пакет программ XRAY для расчета и оптимизации схем регистрации рентгеновского излучения в спектральном диапазоне  $h\nu = 0,03\text{--}30$  кэВ. XII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». г. Звенигород, 3–9 июня 2007 / Тезисы докладов. С. 170–171.

9. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М. и др. Регистрация временного хода электронной температуры и абсолютного выхода непрерывного и линейчатого (М-серия) рентгеновского излучения из плоских Au мишеней, облучаемых на установке «Искра-5». ПТЭ, 2008, № 2, С. 75–80.