

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ТЕПЛОвого ПРОБОЯ ФОЛЬГ

© 2021 г. А. Н. Мунтян^а, С. И. Петров^а, Н. М. Романова^{а,*}, С. С. Таран^а

^а 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 28.09.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

Описаны методики, позволяющие измерять скорость распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях, время теплового прогрева фольг, а также температуру излучения и временные параметры импульсов рентгеновского излучения в экспериментах на установке “Искра-5”. Методики основаны на проводимой с использованием рентгеновских фотохронографов пространственно-временной (пространственное разрешение 150 мкм, временное 50 пс) регистрации рентгеновского излучения в четырех узких спектральных интервалах 0.2–1 кэВ, а также на многокадровой регистрации (длительность кадра 100 пс, число кадров – 10, пространственное разрешение – 30 мкм). В проведенных опытах пиковая планковская температура излучения в облучаемой мишени составила 110–150 эВ, в дополнительном боксе и за фольгами – 50–90 эВ, скорость распространения излучения по замкнутым полостям находится в диапазоне 0.5–13 мм/нс, время теплового прогрева фольг – в диапазоне 50–550 пс.

DOI: 10.31857/S0032816221020087

Одним из основных направлений исследований, проводимых на установке “Искра-5”, является изучение процессов переноса рентгеновского излучения в замкнутых полостях и в режиме теплового прогрева, протекающих при взаимодействии мощного лазерного излучения второй гармоники йодного лазера установки “Искра-5” с рентгеновскими боксами-конверторами. В качестве источника рентгеновского излучения на установке “Искра-5” используется цилиндрический бокс-конвертор “Иллюминатор” [1], внешний вид которого изображен на рис. 1.

В проведенной серии экспериментов мишень “Иллюминатор” представляла собой цилиндр из Au-фольги толщиной 10 мкм либо полипарааксилена толщиной ~12 мкм, покрытого изнутри слоем Au толщиной ~3 мкм. Диаметр цилиндра 670 мкм, длина 900 мкм. Один из торцов цилиндра закрыт Al-фольгой, покрытой Au, а второй – является окном для выхода рентгеновского излучения из конвертора. На боковой поверхности цилиндра имеются четыре отверстия диаметром 0.3 мм для ввода лазерного излучения с энергией 600–1000 Дж от 4–6 каналов установки при длительности лазерного импульса 0.3–0.5 нс.

Лазерное излучение, взаимодействуя с Au-покрытием стенки мишени, формирует лазерную корону с температурой ~1 кэВ. Рентгеновское излучение короны преимущественно поглощается стенками мишени, прогревает их, и они начинают излучать рентгеновское излучение со спектром, близким к планковскому, с температурой 100–150 эВ.

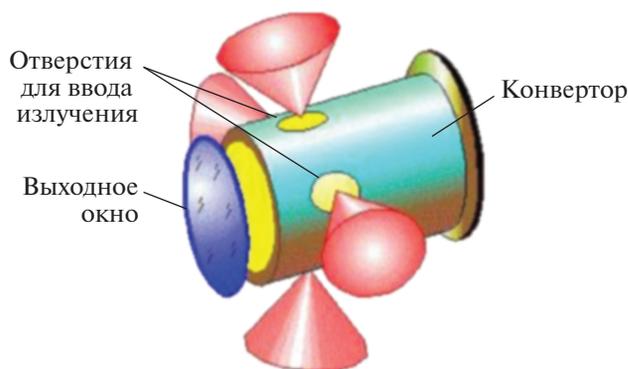


Рис. 1. Источник рентгеновского излучения “Иллюминатор”.

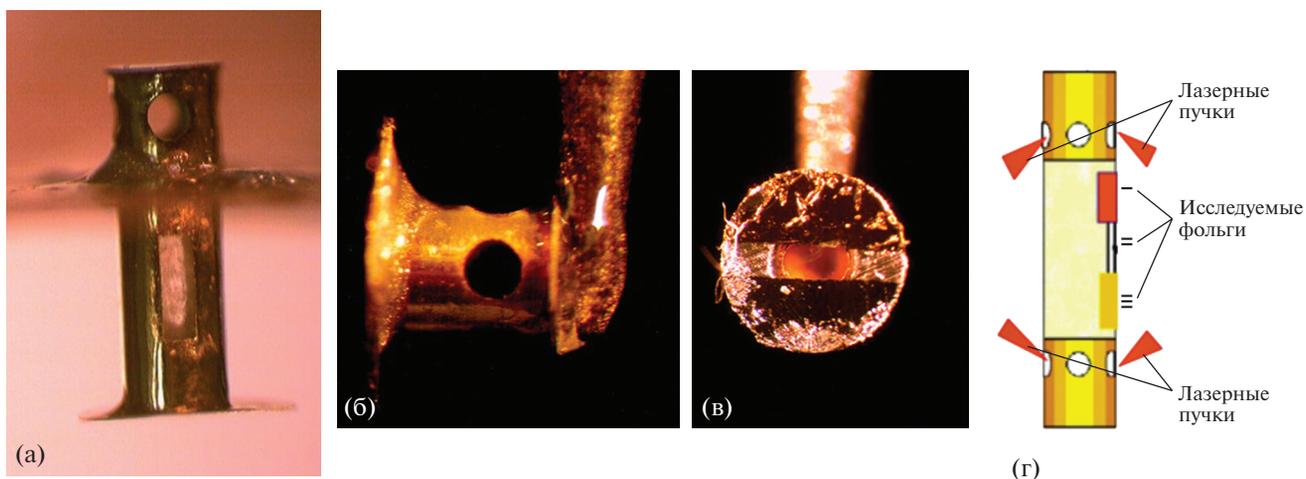


Рис. 2. Фотографии мишеней, предназначенных для определения скорости распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях (а) и в режиме теплового пробоя при размещении фольг на торце мишени (б, в), схема мишени при размещении фольг на диагностической щели дополнительного бокса (г).

Сквозь выходное окно “Иллюминатора” однородно по пространству окна [2] (до момента схлопывания плазмы в центре “Иллюминатора” через 0.6–0.7 нс после начала облучения) излучается рентгеновское излучение со спектром, близким к планковскому, с температурой 110–140 эВ, а также жесткое рентгеновское излучение короны. В спектральном диапазоне <1 кэВ вклад излучения короны незначителен. Это излучение и облучает образцы исследуемых материалов или дополнительные мишени, которые устанавливаются на выходе “Иллюминатора”.

При исследовании распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях к торцу “Иллюминатора” крепился дополнительный бокс диаметром 670 мкм и длиной 1.4 мм из полипарацетилена, покрытого изнутри слоем исследуемого материала, по которому распространялось рентгеновское излучение. На боковой поверхности бокс имел щель размером 200 × 700 мкм, через которую проводилось измерение скорости распространения рентгеновского излучения вдоль бокса.

В части экспериментов дополнительный бокс заполнялся малоплотной пеной с $\rho \approx (1-2) \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$. Полученная мишень вставлялась в экран из Си размером 30 × 30 мм, препятствующий попаданию рассеянного лазерного излучения в нижнюю часть камеры взаимодействия (экран необходим при регистрации видимого излучения из мишени). Мишень в камере размещалась вертикально, “Иллюминатор” – над экраном, дополнительный бокс – под ним. Фотография одной из мишеней представлена на рис. 2а.

Для исследования распространения рентгеновского излучения в режиме теплового пробоя использовались две схемы проведения эксперимен-

тов. В первой схеме исследуемые фольги размещались непосредственно на фланце из Al-фольги с отверстием в центре, закрепленном на выходном окне “Иллюминатора”. Диаметр отверстия фланца из Al-фольги был равен диаметру выходного окна “Иллюминатора”. На отверстие наклеивались три фольги с толщинами от 0.2 до 2 мкм и шириной ~200 мкм каждая.

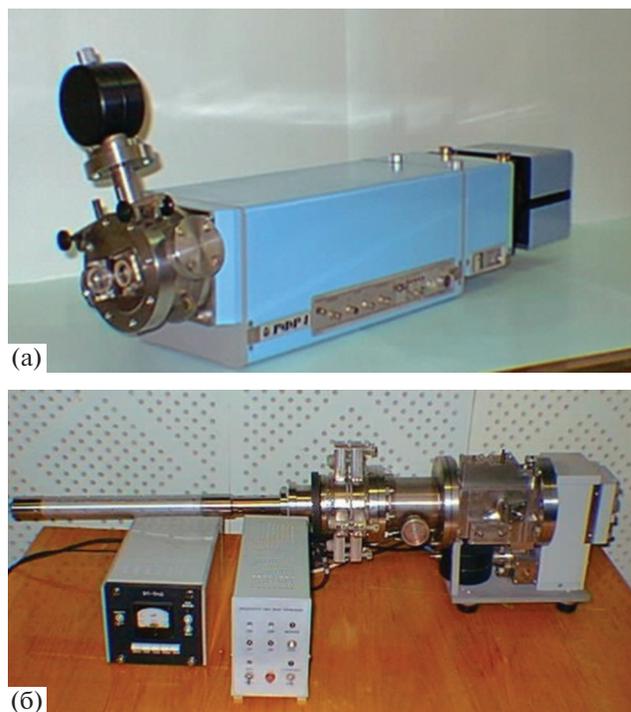


Рис. 3. Фотографии РФР-4 (а) и многокадрового регистратора СХР7 со спектрографом РИВС-4 (б).

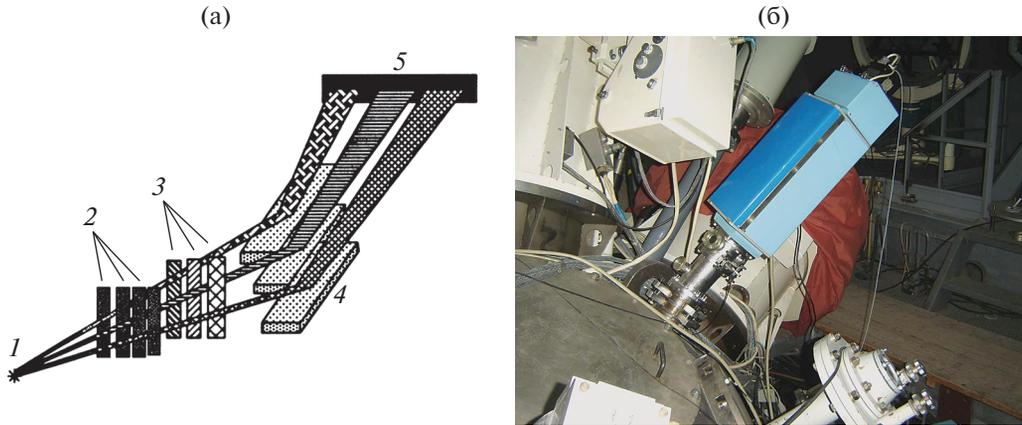


Рис. 4. Схема пространственно-временной регистрации (а) и фотография РИВС-4 с РФР-4, установленных на основной камере установки “Искра-5” (б). 1 – мишень, 2 – щель-обскура, 3 – фильтры из разных материалов, 4 – зеркала скользящего падения, 5 – фотокатод фотохронографа.

Центральная фольга была прозрачной для рентгеновского излучения (углеродная пленка) и служила для определения момента начала облучения, а две другие фольги, выполненные из одного из материалов: Au, Al, Mg, Ti или Fe, предназначены для исследования. Разница во времени между появлением излучения за углеродной и исследуемыми фольгами и является временем их теплового пробоя. Эти мишени размещались в камере горизонтально.

Недостатком данной схемы является то, что в большинстве экспериментов при регистрации излучения в спектральном диапазоне >0.7 кэВ жесткое излучение короны, прошедшее сквозь исследуемые фольги, имеет интенсивность, сравнимую с полезным сигналом, что не позволяет надежно определить время пробоя в таких спектральных каналах. Фотографии одной из таких мишеней приведены на рис. 2б, 2в.

Этого недостатка лишена вторая схема, в которой две мишени “Иллюминатор”, в каждую из которых заводится по 4 лазерных пучка, облучают расположенный между ними цилиндрический бокс. Бокс диаметром 670 мкм и длиной ~ 1 мм покрыт изнутри Au, на его боковой поверхности имеется щель размером 200×700 мкм, на которую наклеены 3 исследуемые фольги. Мишень в камере размещена вертикально. Недостатком такой схемы является появление дополнительной погрешности в определении времени пробоя, связанной с погрешностью определения скорости распространения излучения по цилиндрическому боксу. Схема одной из таких мишеней приведена на рис. 2г.

Для регистрации во времени свечения рентгеновского излучения за различными фольгами, а также свечения от отверстий ввода и различных участков щели использовались схемы пространственно-временной регистрации одновременно в

нескольких спектральных интервалах и схема многокадровой регистрации. Временное разрешение обеспечивали 2 рентгеновских фотохронографа РФР-4 [3] и многокадровая лупа времени СХР7 [4], а пространственное разрешение и выделение узких спектральных интервалов – спектрограф РИВС-4 [5].

Фотографии РФР-4 и СХР7 со спектрографом РИВС-4 приведены на рис. 3.

Схема измерения и фотография одного из приборов, реализующих методику пространственно-временной регистрации излучения в спектральном диапазоне <1 кэВ, приведены на рис. 4. Спектрограф РИВС-4 при помощи щелевых обскур строит 3 изображения мишени на фотокатод фотохронографа, который и разворачивает полученные изображения во времени. Каждое изображение строится в своем спектральном диапазоне, вырезается зеркалом полного внешнего отражения и краевым фильтром. В проведенной серии экспе-

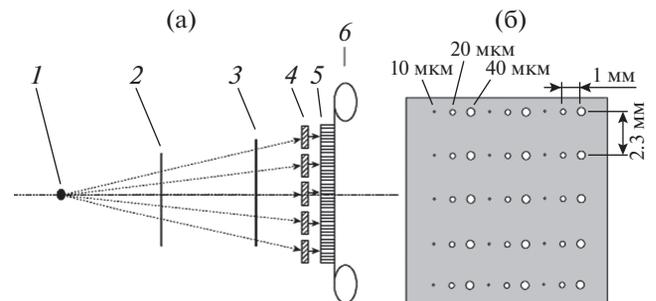


Рис. 5. а – схема многокадровой регистрации (1 – мишень, 2 – блок камер-обскур, 3 – фильтр, 4 – полосковые линии на микроканальных пластинах регистратора СХР7, 5 – выходной экран на волоконно-оптической пластине, б – фотопленка); б – блок камер-обскур.

Таблица 1. Параметры каналов, использованных в проведенных опытах

№ канала	РФР-4	$h\nu_{cp}$, кэВ	Материал фильтра (толщина, мкм)	Материал зеркал (углы падения излучения на них)
1	№ 13	0.5	Cu (1.7)+ППК (1.0)	Au (3°)
2	№ 13	0.25	ППК (2.5) + Ti (0.3) + лавсан (3.47)	SiO ₂ (5°)
3	№ 13	1.1	Al (8.0)	Au (3°)
4	№ 12	0.25	ППК (2.4) + Ti (0.3) + лавсан (3.47)	SiO ₂ (5°)
5a	№ 12	0.25/1.0	ППК (2.4) + Ti (0.3) + лавсан (3.47)	Au (3°)
5б	№ 12	0.25/1.0	ППК (2.4) + Ti (0.3) + лавсан (3.47)	Au (3°)

риментов временное разрешение составило 40 пс, пространственное – 100–150 мкм.

Предварительно на калибровочном стенде РЭКС [6] проведена калибровка всех необходимых параметров фотохронографов РФР-4, включая спектральную чувствительность, спектральное пропускание фильтров и коэффициенты отражения зеркал. Погрешность калибровки пропускания фильтров составила <2%, погрешность калибровки зеркал – 3–5%, погрешность калибровки абсолютной чувствительности РФР-4 ~12%. Суммарная погрешность измерения абсолютных потоков рентгеновского излучения в отдельных спектральных интервалах с учетом погрешности юстировки и обработки полученных результатов не превысила 20%, что позволило измерить температуру излучения (в планковском предположении формы спектра) с погрешностью до 5%.

Обработка полученных фотохронограмм с учетом результатов калибровок однородности чувствительности по экрану, 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, рассчитанная по программе XRAY [8], материалы и толщины фильтров, полученные по результатам калибровки, а также материалы зеркал полного внешнего отражения и углы падения излучения на них – приведены в табл. 1. Величина шероховатости зеркал, измеренная на дифрактометре ДРОН-7, определена по зависимости коэффициента отражения зеркала от угла падения [9] на линии $K_{\alpha}Ti$ 4.512 кэВ и составила $13 \pm 1 \text{ \AA}$ для кварцевых и $17 \pm 1 \text{ \AA}$ для золотых зеркал.

Каналы № 1–№ 4 выделяют узкие спектральные полосы шириной $h\nu/dh\nu \sim 3\text{--}7$ и предназначены, в том числе, для измерения температуры излучения, каналы № 5a и № 5б имеют максимальную чувствительность, но два окна пропускания: одно в районе 0.25 кэВ, второе в районе 1 кэВ – и предназначены для определения моментов появления слабоинтенсивного излучения из диагностической щели. По каналам № 5 можно оценивать температуру в разных участках щели, но не в “Ил-

люминаторе”, так как сигнал в этих каналах от отверстий ввода определяется излучением короны.

Схема многокадровой регистрации приведена на рис. 5. Спектрограф РИВС-4 при помощи обскур диаметром 40, 20 и 10 мкм строит на полосковых линиях многокадровой лупы СХР7 набор изображений мишени. Полная длительность развертки СХР7 составила 1 нс, поэтому просматривалась только первая наносекунда свечения мишени после ее облучения лазером. Время экспозиции в отдельной точке полосковой линии равно 100 пс. Регистрация велась за углеродным фильтром толщиной 4 мкм, следовательно, регистрировалось излучение в районе 0.25 кэВ и все излучение в области >0.7 кэВ. Временное разрешение составило 100 пс, расстояние между кадрами – 100 пс, количество регистрируемых кадров за обкурами одного диаметра – 10–11 кадров, пространственное разрешение – 20–60 мкм (в зависимости от диаметра обскуры).

Фотохронограф РФР-4 № 12 предназначен для измерения параметров распространения рентгеновского излучения. РФР-4 № 12 расположен в горизонтальной плоскости камеры взаимодействия, левее на 10° относительно плоскости, проходящей через ось мишени, а СХР7 – по оси мишени, но на 10° над горизонтом. Приборы “видят” мишени почти так, как показано на рис. 2a, 2в, 2г (под углом 10° к изображениям). В мишени на рис. 2a СХР7 “видит” только отверстие ввода, так как диагностическая щель перекрыта медным экраном. Пространственное разрешение идет в вертикальном направлении. Согласно рис. 2a, 2г, РФР-4 № 12 “видит” как отверстия ввода, что позволяет определить момент начала облучения мишени, так и излучение из диагностической щели. Для мишени, показанной на рис. 2в, начало облучения определяется по свечению за центральной фольгой.

Фотохронограф РФР-4 № 13 предназначен преимущественно для определения параметров рентгеновского излучения, облучающего исследуемые мишени. Он расположен по оси мишени, но под углом 45° к горизонту. Через отверстие ввода РФР-4 № 13 “смотрит” на внутреннюю стенку

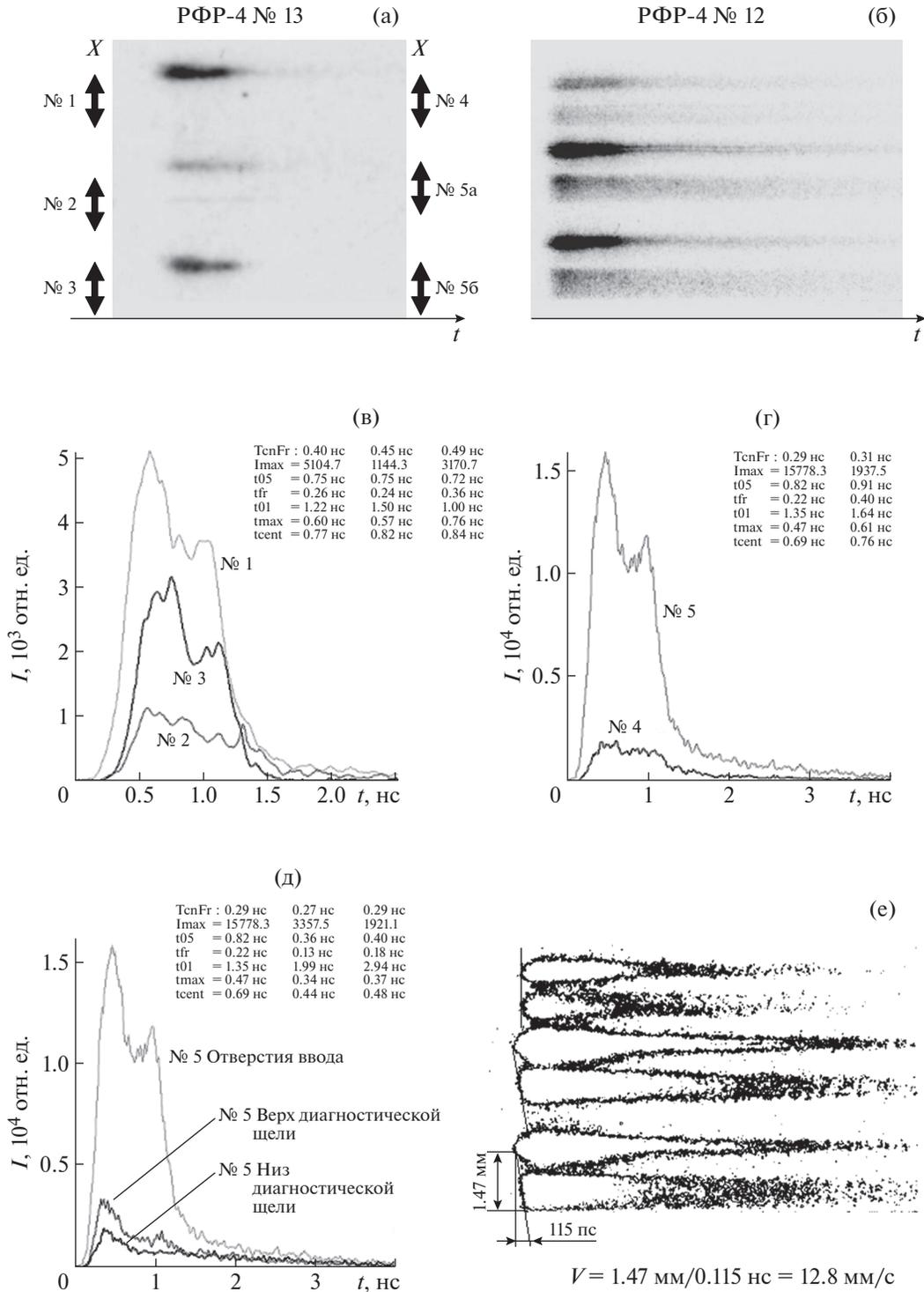


Рис. 6. Фотохронограммы, снятые приборами РФР-4 № 13 (а) и № 12 (б); форма импульсов из отверстий ввода (в, г) и из отверстия ввода и участков диагностической щели (д) (цифрами обозначены номера каналов); уровни одинаковой интенсивности фотохронограммы РФР № 12 (е).

“Иллюминатора” (в мишенях на рис. 2б, 2в, он “видит” верхнее отверстие ввода).

На рис. 6 приведены результаты регистрации излучения, полученные в одном из экспериментов по распространению рентгеновского излуче-

ния в замкнутых полостях (см. рис. 2а). Приведены фотохронограммы, форма импульсов из отверстий ввода и участков диагностической щели, а также уровни одинаковой интенсивности для фотохронограммы, полученной с помощью РФР

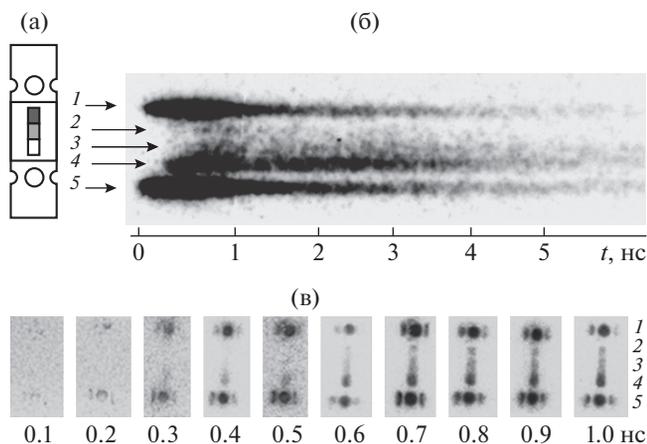


Рис. 7. Вид мишени, как ее видят РФР-4 и СХР7 (а); фотохронограмма (б) и изображения, полученные с помощью СХР7 (в). 1 – отверстие ввода первой мишени “Иллюминатор”, 2 – фольга из Au толщиной 0.4 мкм, 3 – фольга из Au толщиной 0.2 мкм, 4 – фольга из углеродной пленки толщиной 0.1 мкм, 5 – отверстие ввода второй мишени “Иллюминатор”.

№ 12. Напомним, что РФР № 13 и СХР7 не “видели” диагностической щели, закрытой экраном.

Второй импульс, наблюдаемый на фотохронограммах, вызван свечением плазмы, схлопнувшейся на оси мишени “Иллюминатор”. Длительность импульса на полувысоте интенсивности по разным каналам в мишени “Иллюминатор” составила 0.75–0.9 нс, а из диагностической щели ~0.4 нс. Полная длительность свечения по всем каналам совпадает, а разница в длительностях импульса на полувысоте интенсивности вызвана преимущественно различным вкладом второго импульса в полный сигнал.

Пиковая температура излучения в мишени “Иллюминатор” составила 130 ± 15 эВ, в начале диагностической щели – 90 ± 7 эВ и к ее концу – до 70 ± 6 эВ. Скорость распространения рентгеновского излучения составила в этом опыте 13 ± 0.5 мм/нс. В опытах, в которых канал распространения был заполнен малоплотной пеной, скорость распространения на порядок меньше и составила 1–2 мм/нс.

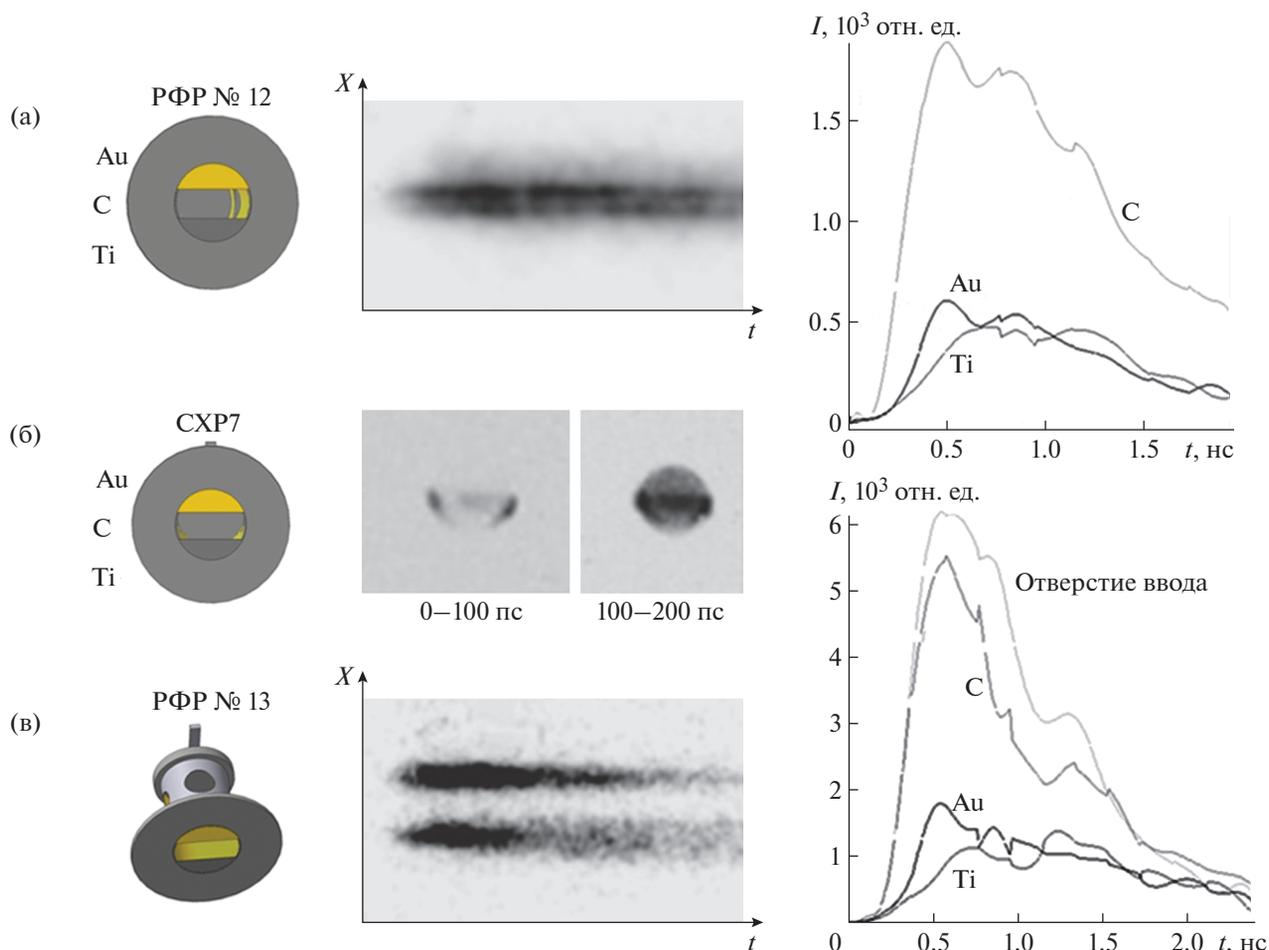


Рис. 8. Слева – вид мишени, как ее видят РФР-4 № 12 (а), СХР7 (б) и РФР-4 № 13 (в), в центре – фотохронограммы (а, в) и изображения с СХР7 (б), справа – форма импульсов из отверстия ввода и за фольгами (а, в).

На рис. 7 приведены результаты, полученные в эксперименте по тепловому пробою (см. рис. 2г). Приведен участок фотохронограммы для канала № 4 и результаты регистрации многокадровой лупой СХР7 за обкурами на расстоянии 20 мкм. Согласно рис. 7в, в течение первых 200 пс наблюдается свечение только из отверстий ввода мишеней “Иллюминатор”. Начиная с кадра $t = 0.3$ нс, появляется свечение за центральной фольгой из углеродной пленки, с кадра $t = 0.5$ нс – за Au-фольгой толщиной 0.2 мкм и с кадра $t = 0.6$ нс – за Au-фольгой толщиной 0.4 мкм. Следовательно, с погрешностью ± 50 пс времена прогрева фольг составили соответственно 0.25, 0.45 и 0.55 нс.

Определенная с помощью фотохронографов пиковая температура излучения в мишенях “Иллюминатор” составила 130 ± 15 эВ, а за фольгами: из углеродной пленки – 75 ± 7 эВ, из Au (0.2 мкм) – 60 ± 5 эВ и из Au (0.4 мкм) – 54 ± 4 эВ. Свечение из обеих мишеней “Иллюминатор” начинается одновременно, а задержки свечения за фольгами составили с погрешностью ± 20 пс соответственно 0.24, 0.45 и 0.53 нс и в пределах погрешности измерений совпадают с задержками, определенными по регистратору СХР7.

На рис. 8 приведены результаты, полученные в опыте по тепловому пробою (см. рис. 2б, 2в): вид мишеней, как их видят приборы, участки фотохронограмм для каналов № 2 и № 4 и форма импульсов из различных участков мишени, а также результаты регистрации прибором СХР7 двух первых изображений за обкурами на расстоянии 20 мкм.

Согласно рис. 8б (в центре), на первом кадре наблюдается свечение только от центральной щели, а на следующем – уже за всеми тремя фольгами. Это согласуется с временем прогрева фольг, определенным при помощи фотохронографов, которое составило для фольги из Au (0.25 мкм) 55 ± 5 пс, а из Ti (0.8 мкм) – 110 ± 10 пс. Пиковая температура излучения в мишени “Иллюминатор” составила 115 ± 15 эВ, а за фольгами из Au – 85 ± 7 эВ и Ti – 70 ± 6 эВ.

Таким образом, разработанные на основе щелевых фотохронографов и многокадрового регистратора рентгеновского излучения методики позволяют измерять скорость распространения рент-

геновского излучения в замкнутых полостях, которая составила от 0.5 до 13 мм/нс в зависимости от условий эксперимента, а также время теплового прогрева фольг, составившее от 50 до 550 пс (от момента начала облучения мишени). Кроме того, были измерены температура излучателя и временные параметры импульсов рентгеновского излучения как в мишенях “Иллюминатор”, так за нагреваемыми фольгами и вдоль диагностической щели.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы благодарят сотрудников установки “Искра-5” за проведенные эксперименты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунин А.В., Анненков В.И., Бессараб А.В., Ватулин В.В. // Тез. докл. XII Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы” (Звенигород, Московской обл., 3–9 июня 2007) Троицк: ФГУП “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, 2007. С. 76.
2. Лазарчук В.П., Мунтян А.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 81.
3. Лазарчук В.П., Литвин Д.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Прянишников И.Г., Сенник А.В. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 128.
4. Лазарчук В.П., Литвин Д.Н., Мунтян А.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В., Заровский А.И., Зюзин Л.Н., Прянишников И.Г., Славнов Ю.Б., Усов Ю.Б. // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. Вып. 9. С. 132.
5. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 1. С. 101.
6. Лазарчук В.П., Мунтян А.Н., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 133.
7. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // Тез. докл. XII Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы” (Звенигород, Московской обл., 3–9 июня 2007) Троицк: ФГУП “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, 2007. С. 172.
8. Лазарчук В.П., Муругов В.М., Петров С.И., Сенник А.В. // Тез. докл. XII Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы” (Звенигород, Московской обл., 3–9 июня 2007) Троицк: ФГУП “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, 2007. С. 170.
9. Мишетт А. Оптика мягкого рентгеновского излучения. М.: Мир, 1989.