

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ И В РЕЖИМЕ ТЕПЛООВОГО ПРОБОЯ

А. Н. Мунтян, С. И. Петров, Н. М. Романова, С. С. Таран

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

Одним из основных направлений исследований на установке «Искра-5» является изучение процессов переноса рентгеновского излучения в замкнутых полостях и в режиме теплового пробоя, 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 под названием «Иллюминатор» [1].

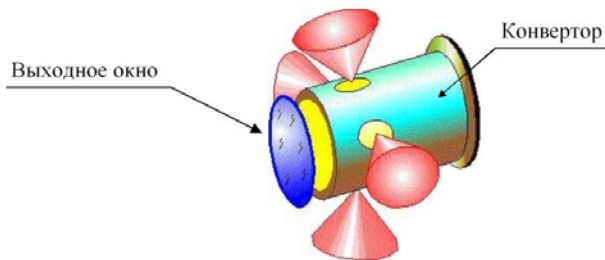


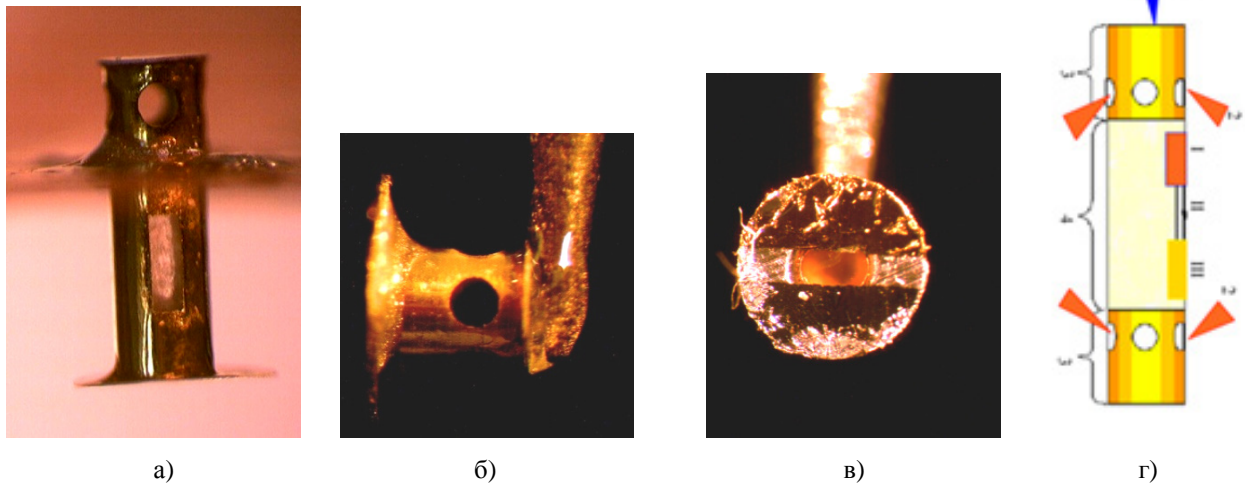
Рис. 1. Источник рентгеновского излучения «Иллюминатор»

В проведенной серии экспериментов мишень «Иллюминатор», рис. 1, представляла собой цилиндр из Au фольги толщиной 10 мкм или полипараксилилена толщиной ~12 мкм покрытого изнутри слоем Au толщиной ~3 мкм. Диаметр цилиндра составляет 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 для ввода лазерного излучения диаметром 0,3 мм, в которые подается 600–1000 Дж лазерной энергии 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. 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 исследуемые образцы исследуемых материалов или дополнительные мишени, которые устанавливаются на выходе «Иллюминатора».

При проведении исследований распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях к торцу «Иллюминатора» крепится дополнительный бокс из полипараксилилена, покрытого изнутри слоем исследуемого материала, диаметром 670 мкм и длиной 1,4 мм, по которому и распространяется рентгеновское излучение. Бокс имеет щель размером 200×700 мкм на боковой поверхности, сквозь которую и проводится измерение скорости распространения рентгеновского излучения вдоль бокса. В части экспериментов, дополнительный бокс заполнялся малоплотной пеной с $\rho \approx (1-2) \cdot 10^{-2}$ г/см³. Полученная мишень вставлялась в экран из Cu размером 30×30 мм, препятствующий попаданию рассеянного лазерного излучения в нижнюю часть камеры взаимодействия (экран необходим для методик регистрирующих видимое излучение из мишени). Мишень в камере размещалась вертикально, «Иллюминатор» расположен над экраном, дополнительный бокс под ним. Фотография одной из мишеней представлена на рис.2а.

Постановка экспериментов по исследованию распространения рентгеновского излучения в режиме теплового пробоя имела две редакции. В первой исследуемые фольги размещались прямо

Постановка экспериментов по исследованию распространения рентгеновского излучения в режиме теплового пробоя имела две редакции. В первой исследуемые фольги размещались прямо



а)

б)

в)

г)

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

на выходном окне «Иллюминатора» на фланце из Al фольги с отверстием в центре, равном диаметру «Иллюминатора». На отверстие наклеивается три фольги толщиной 0,2–2 мкм и шириной ~200 мкм каждая. Центральная фольга прозрачна для РИ (углеродная пленка) и служит для определения момента начала облучения, а две другие фольги из Au, Al, Mg, Ti или Fe предназначены для исследования. Разница во времени между появлением излучения за углеродной и исследуемой фольгой и является временем ее теплового пробоя. Эти мишени размещались в камере горизонтально. Недостатком данной схемы является то, что при проведении регистрации в спектральном диапазоне > 0,7 кэВ в значительной части экспериментов жесткое излучение короны, прошедшее сквозь исследуемые фольги, имело интенсивность сравнимую с полезным сигналом, что не позволяло надежно определить время пробоя в таких спектральных каналах. Фотография одной из таких мишеней приведена на рис. 2б-в.

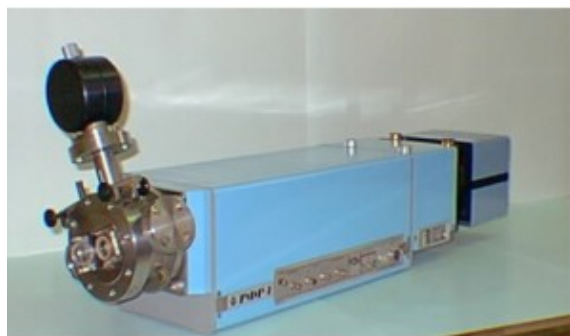
Этого недостатка лишена вторая схема, в которой две мишени «Иллюминатор», в каждый из которых заводится по 4 лазерных пучка, облучают цилиндрический бокс, покрытый изнутри Au, диаметром 670 мкм и длиной ~1 мм, расположенный между «Иллюминаторами». На боковой поверхности бокс имеет щель размером 200×700 мкм, на которую и наклеены 3 исследуемые фольги. Мишень в камере размещается вертикально. Недостатком этой схемы является появление дополнительной погрешности определения

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, 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], многокадровая лупа времени СХР7 [4], а пространственное разрешение и выделение узких спектральных интервалов спектрографы типа РИВС-4 [5].

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

Схема измерения и фотография одного из приборов методики пространственно-временной регистрации излучения в спектральном диапазоне < 1 кэВ приведена на рис. 4. Спектрограф РИВС-4 при помощи щелевых обскур строит 3 изображения мишени с масштабом 1,5 на фотокатод фотохронографа, который и разворачивает полученные изображения во времени. Каждое изображение строится в своем спектральном диапазоне, вырезаемом зеркалом ПВО и краевым фильтром. В проведенной серии экспериментов временное разрешение составляло 40 пс, пространственное – 100–150 мкм.

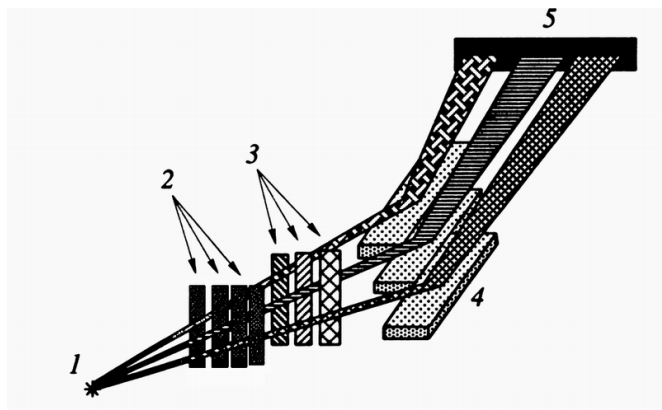


а)

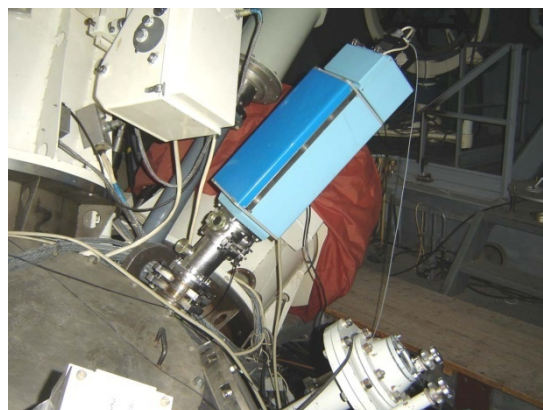


б)

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



а)



б)

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

Таблица 1

Параметры каналов, использованных в проведенных опытах

№ канала	РФР-4	$h\nu_{cp}$ [кэВ]	Фильтр [мкм]	Зеркало
1	№ 13	0.85	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°
5а	№ 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°

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 составляет < 2%, погрешность калибровки зеркал 3–5 %, погрешность калибровки абсолютной чувствительности РФР-4 ~12 %. Суммарная погрешность измерения абсолютных потоков рентгеновского излучения в отдельных

спектральных интервалах составляет с учетом погрешности юстировки и обработки полученных результатов до 20 %, что позволяет 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 измерена на дифрактометре ДРОН-7 и составила 13 ± 1 Ангстрем для кварцевых и 17 ± 1 Ангстрем для золотых.

Первые четыре канала выделяют узкие спектральные каналы шириной $h\nu/dh\nu \sim 3-7$ и предназначены в том числе для измерения температуры излучения, каналы же 5 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 «Иллюминаторе», так как сигнал в этих каналах от отверстий ввода определяется излучением короны.

Схема многокадровой регистрации приведена на рис. 5. РИВС-4С при помощи обскур диаметром 40, 20 и 10 мкм строит на полосковых линиях СХР7 набор изображений мишени с $M = 2$. Полная длительность развертки СХР7 составляет 1 нс, поэтому просматривалась только первая нс свечения мишени после ее облучения лазером. Время экспозиции в отдельной точке полосковой линии составляет 100 пс. Регистрация велась за углеродным фильтром 4 мкм, следовательно, регистрировалось излучение в районе 0,25 кэВ и все излучение $> 0,7$ кэВ. Временное разрешение составляло 100 пс, расстояние между кадрами и ко-

личество регистрируемых кадров за обкурами одного диаметра составляло 100 пс и 10–11 кадров соответственно, пространственное разрешение – 20–60 мкм (в зависимости от диаметра обсктуры).

Фотохронограф РФР-4 № 12 и СХР7 предназначены для измерения параметров распространения рентгеновского излучения. РФР-4 расположен в горизонтальной плоскости камеры взаимодействия на 10° влево от плоскости проходящей через ось мишени, а СХР7 по оси мишени, но на 10° над горизонтом. Они видят мишени почти так, как показано на рис 2а, в, г (под углом 10° к изображениям). В мишени, показанной на рис.2а, СХР7 видит только отверстие ввода (диагностическая щель перекрыта Си экраном). Пространственное разрешение идет в вертикальном направлении. Как видно из рисунков 2а, г, приборы видят и отверстия ввода, что позволяет определить момент начала облучения мишени, 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 РИ, облучающего исследуемые мишени. Он расположен по оси мишени, но под углом 45° над горизонтом. Сквозь отверстие ввода он смотрит на внутреннюю стенку «Иллюминатора» (в мишени, показанной на рис 2б,в, он видит верхнее отверстие ввода). Учитывая, что он видит также диагностическую щель и фольги (кроме мишени рис. 2а), он также является дублирующим прибором для регистрации времени распространения.

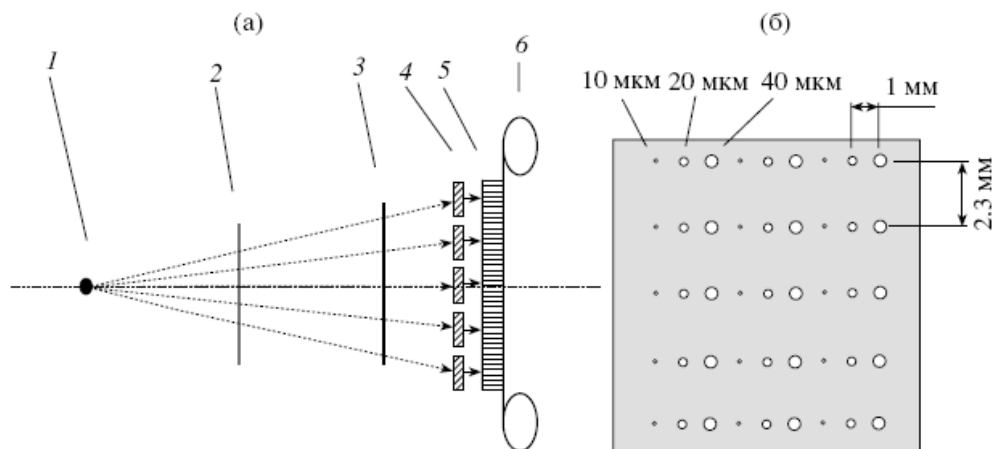


Рис. 5. Схема многокадровой регистрации (а) и блок камер-обскур (б): 1 – мишень; 2 – блок камер-обскур; 3 – фильтр; 4 – полосковые линии на МКП регистратора СХР7; 5 – выходной экран на волоконно-оптической пластине; 6 – фотопленка

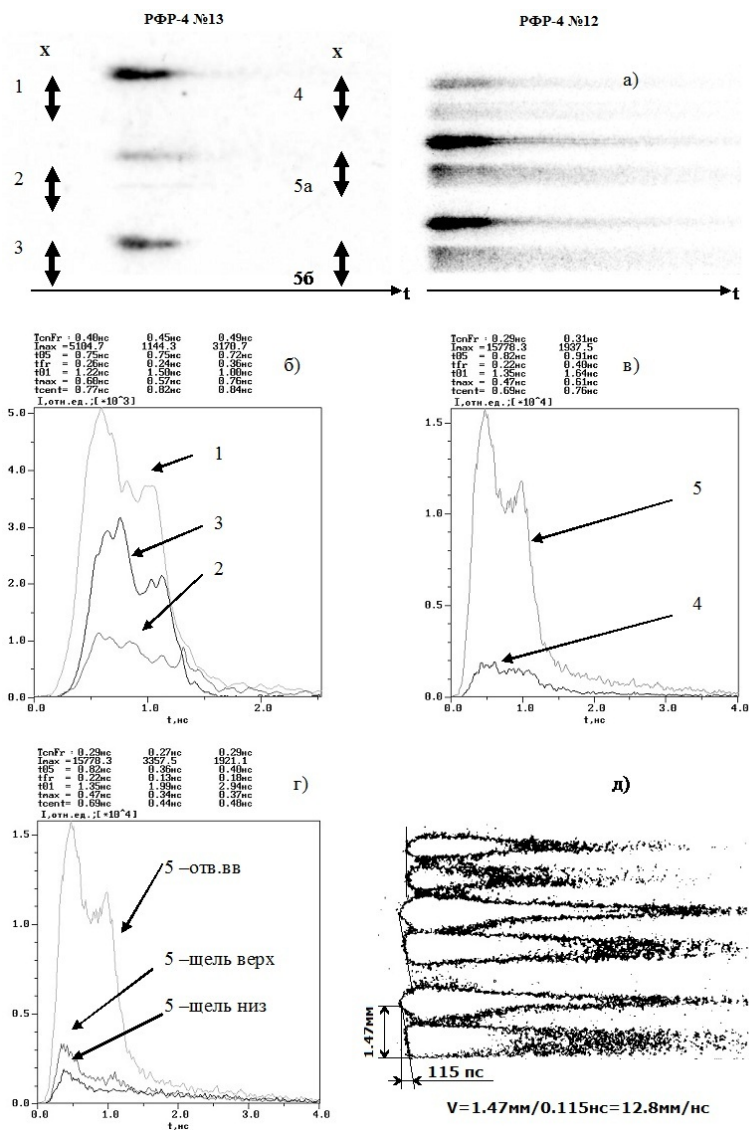


Рис.6. Фотохронограммы (а), форма импульсов из отверстий ввода (б-в), форма импульсов из отверстия ввода и участков диагностической щели (г), уровни одинаковой интенсивности фотохронограммы РФР № 12 (д). Цифрами обозначены номера каналов

На рис.6 приведены результаты регистрации, полученные в одном из опытов по распространению рентгеновского излучения в замкнутых полостях (см. рис 2а).

Приведены полученные фотохронограммы, форма импульсов из отверстий ввода и участков диагностической щели, а также уровни одинаковой интенсивности для фотохронограммы РФР №12. Напомним, что РФР № 13 и СХР7 не видели диагностической щели, закрытой экраном. Второй импульс, наблюдаемый на фотохронограммах, вызван свечением плазмы, схлопнувшейся на оси «Иллюминатора». Длительность импульса на полувысоте интенсивности составила по разным каналам в мишени «Иллюминатор» 0,75-0,9 нс, а из

диагностической щели $\sim 0,4$ 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 «Иллюминаторе» составила 130 ± 15 эВ в диагностической щели, 90 ± 7 эВ в начале щели и спадает до 70 ± 6 эВ к ее концу. Скорость распространения рентгеновского излучения составила в этом опыте $13 \pm 0,5$ мм/нс. В опытах, в которых канал распространения был заполнен малоплотной пеной, скорость распространения на порядок меньше и составляла 1–2 мм/нс.

На рис.7 приведены результаты, полученные в опыте по тепловому пробою (см. рис. 2г). Приведен участок фотохронограммы для канала 4 и результаты регистрации на СХР7 за обкурами 20 мкм. Как видно из рис. 7в, в течение первых 200 пс наблюдается свечение только из отверстий ввода «Иллюминаторов». С кадра $t = 0,3$ нс появляется свечение за фольгой СН, с кадра $t = 0,5$ нс – за фольгой Au-0.2 мкм и с кадра $t = 0,6$ нс – за

фольгой Au-0.4 мкм. Следовательно, с погрешностью ± 50 пс время прогрева фольг составило соответственно 0,25, 0,45 и 0,55 нс.

Определенная с помощью фотохронографов пиковая температура излучения в «Иллюминаторах» составила 130 ± 15 эВ, а за фольгами СН, Au-0.2 и Au-0.4 – 75 ± 7 эВ, 60 ± 5 эВ и 54 ± 4 эВ соответственно. Свечение из обоих «Иллюминаторов» начинается одновременно, задержка свечения за

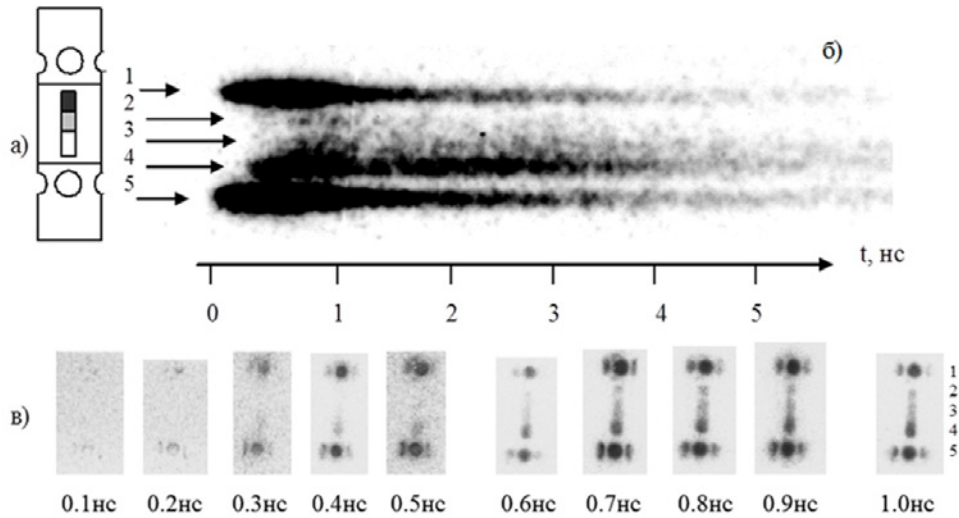


Рис. 7. Вид мишени, как ее видят РФР-4 и СХР7 (а), фотохронограмма (б) и изображения с СХР7 (в). 1 – отверстие ввода первого «Иллюминатора», 2 – фольга Au-0.4 мкм, 3 – фольга Au-0.2 мкм, 4 – фольга СН-0.1 мкм, 5 – отверстие ввода второго «Иллюминатора»

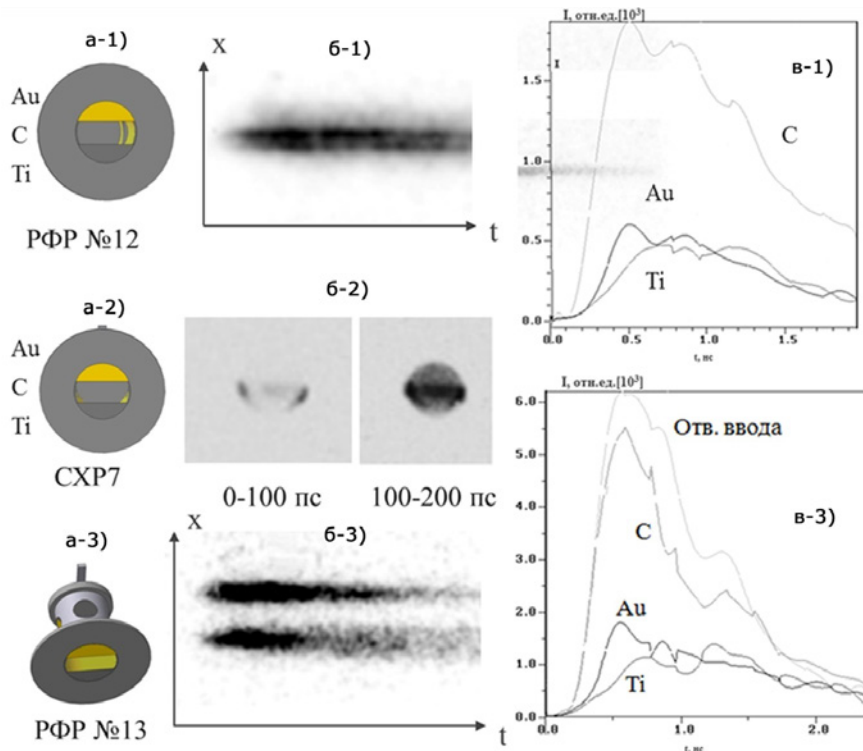


Рис. 8. Вид мишени, как ее видят РФР-4 и СХР7 (а), фотохронограммы и изображения с СХР7 (б), форма импульсов из отверстия ввода и за фольгами (в)

фольгами составила с погрешностью ± 20 пс соответственно 0,24, 0,45 и 0,53 нс и в пределах погрешности измерений совпадает с задержками, определенными по регистратору СХР7.

На рис. 8 приведены результаты, полученные в опыте по тепловому пробоя в редакции, приведенной на рис. 2б,в. Приведены вид мишеней, как их видят приборы, участки фотохронограмм для каналов 2 и 4 и форма импульсов из различных участков мишени, а также результаты регистрации на СХР7 двух первых изображений за обкурами 20 мкм. Как видно из рис. 8б-2, на первом кадре наблюдается свечение только от центральной щели, а на следующем уже за всеми тремя фольгами. Это согласуется с временем прогрева фольг, определенном при помощи фотохронографов, которое составило для фольги Au-0,25 мкм 55 ± 5 пс, а для Ti-0,8 мкм 110 ± 10 пс. Пиковая температура излучения в «Иллюминаторе» составила 115 ± 15 эВ, а за фольгами Au и Ti 85 ± 7 эВ и 70 ± 6 эВ соответственно.

Таким образом, разработанные на базе щелевых фотохронографов и многокадрового регистратора рентгеновского излучения методики позволяют измерять скорость распространения рентгеновского излучения в замкнутых полостях, которая составляла от 0,5 мм/нс до 13 мм/нс в зависимости от условий эксперимента, время теплового пробоя фольг, составлявшее от 50 пс до 550 пс (от момента начала облучения мишени), а также температуру излучателя и временные параметры импульсов рентгеновского излучения как в мишенях «Иллюминатор», так за нагреваемыми фольгами и вдоль диагностической щели.

В заключение авторы благодарят сотрудников установки «Искра-5» за проведенные эксперименты.

Список литературы

1. Анненков В. И., Бессараб А. В., Кунин А. В. и др. Параметры рентгеновского излучения плазмы в экспериментах с мишенями типа "Иллюми-

натор" на второй гармонике йодного лазера "Искра-5". XII Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", г. Звенигород Московской обл., 3–8 июня 2007. Тезисы докладов. С. 76.

2. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сенник А. В. Многокадровая регистрация рентгеновского излучения с длительностью кадра 100 пс на установке "Искра-5" // ПТЭ. 2008. № 2. С. 81–85.

3. Лазарчук В. П., Литвин Д. Н., Кравченко А. Г. и др. Рентгеновский фотохронограф РФР-4 // ПТЭ. 2004. № 2. С. 128; ПТЭ. 2008. № 2. С. 81–85.

4. Заровский А. И., Зюзин Л. Н., Лазарчук В. П. и др. Многокадровый регистратор рентгеновского излучения с длительностью кадра 100 пс. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. г. Саров. 2005. Вып. 9. С. 132–137.

5. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сенник А. В. Фотохронографические методы регистрации пространственно-временных и спектральных характеристик рентгеновского излучения на установке "Искра-5" // Физика плазмы. 1994. Т. 20, № 1. С. 01.

6. Лазарчук В. П., Литвин Д. Н., Кравченко А. Г. и др. 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., Сенник А. В. Пакет программ CCD-CAM для обработки фотохронограмм и спектрограмм. XII Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", г. Звенигород Московской обл., 3–8 июня 2007. Тезисы докладов. С. 172.

8. Лазарчук В. П., Муругов В. М., Петров С. И., Сенник 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 Московской обл., 3–8 июня 2007. Тезисы докладов. С. 170–171.