

УДК 621.386.8

# Методика пространственно- временных измерений генерации линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы на установке "Искра-5"

*Описываются методики пространственно-временных измерений генерации линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы Al и Fe внутри полый сферической мишени диаметром 2 мм, покрытой изнутри слоем исследуемого материала и облучаемой излучением второй гармоники установки "Искра-5". Приводится описание методик и результаты регистрации.*

**В. П. Лазарчук, А. Н. Мунтян,  
В. М. Муругов, С. И. Петров,  
А. В. Сенник**

## *Введение*

С 1997 года на установке "Искра-5" проводятся эксперименты с тонкооболочечными сферическими мишенями [1]. Эти эксперименты направлены на решение проблем моделирования неравновесных радиационных процессов в плазме с исследованием процессов формирования неравновесного резонансного излучения в оптически толстой плазме.

Облучаемые второй гармоникой лазерного излучения установки, мишени состоят из двух склеенных полуболочек из полипараксилилена диаметром 2 мм и толщиной 5 мкм. На внутреннюю поверхность напыляется или слой Fe толщиной  $0,26 \pm 0,03$  мкм, или слой Al толщиной  $0,75 \pm 0,03$  мкм. Для ввода лазерного излучения внутрь мишени оболочка имеет 6 отверстий диаметром 400 мкм, в каждое из которых заводится по два лазерных пучка. Общая энергия, вводимая в мишень, составляет  $2400 \pm 100$  Дж при длительности лазерного импульса  $0,45 \pm 0,05$  нс. Под воздействием лазерного импульса на поверхности напыленного материала возникает слой плазмы, эмитирующий рентгеновское излучение. Далее, плазма схлопывается в центре мишени, при этом наблюдается второй пик рентгеновского излучения.

Значительная часть рентгеновского излучения, испускаемого мишенью за время импульса, содержится в линейчатом излучении. Необходимо измерить энергию в каждой линии и определить, как линейчатое излучение генерировалось во времени и пространстве. Для этого необходи-

мы пространственные, временные и спектральные измерения. Обеспечить это на одном приборе невозможно, поэтому для измерений были задействованы несколько методик:

– методика регистрации с временным разрешением за фильтрами Росса. Регистрация ведется на рентгеновском фотохронографе интегрально по пространству, но сразу в большом числе каналов;

– методика пространственно-временной регистрации на рентгеновском фотохронографе. Регистрируемый сигнал интегрировался щелевой обскурой в пространстве по одному из направлений и разрешался по другому, регистрация ведется за фильтром, вырезающим из всего спектра преимущественно линейчатое излучение группы линий;

– методика многокадровой пространственно-пространственной регистрации на многокадровой лупе времени. Обскура обеспечивает пространственное разрешение в обоих направлениях, кадровая лупа – временное, регистрация также ведется за фильтром, вырезающим из всего спектра преимущественно линейчатое излучение;

– методика спектрально-временной регистрации отдельных линий на рентгеновском фотохронографе. Спектрограф на кристалле обеспечивает спектральное разрешение, фотохронограф – временное, но измерения идут интегрально по пространству;

– методика абсолютных измерений энергий в отдельных линиях интегрально по времени и пространству при помощи набора спектрографов на кристаллах.

Данная работа посвящена только первым трем методикам, последние две методики описаны в [2].

### *Регистрация с временным разрешением за фильтрами Росса*

При проведении временных измерений, на входной щели фотохронографа РФР-4 [3] устанавливаются фильтры Росса. Временное разрешение фотохронографа составляло ~ 50 пс. Фильтры подбираются так, чтобы сигнал за некоторыми из них определялся преимущественно линейчатым излучением, а за другими – континуумом. При регистрации линейчатого излучения Fe такие фильтры подбираются из Fe, Mn и V. Спектральная чувствительность каналов для двух наборов таких фильтров (два набора использованы для расширения динамического диапазона), полученная фотохронограмма и форма импульса за фильтром из Fe представлены на рис. 1.

Как видно из рисунка, каналы за фильтрами из Fe пропускает континуум и линии  $He_{\alpha}$  ( $h\nu = 6,7$  кэВ) и  $K_{\alpha}$  холодного Fe ( $h\nu = 6,4$  кэВ), фильтры из Mn пропускают только линию  $K_{\alpha}$  холодного Fe и континуум, а фильтр из V отсекает все линии Fe. Измеряя сигналы за этими фильтрами и вычитая из сигнала за фильтром Fe из сигнал за фильтром из Mn, можно получить сигнал, который практически полностью определяется линией  $He_{\alpha}$  железа (согласно расчетам при энергии линии  $He_{\alpha}$  равной 20 Дж, даже без вычета, ее вклад в сигнал за фильтром из Fe равен 90 %). Вычитая из сигнала за Mn фильтром сигнал за фильтром из V, можно получить информацию о линии  $K_{\alpha}$  холодного Fe и оценить количество быстрых электронов, которые возбуждают эту линию. При энергии в линии  $K_{\alpha} = 1$  Дж, сигнал в канале за фильтром из Mn на 70 % определяется энергией этой линии, а при отсутствии линии  $K_{\alpha}$ , сигнал за этим фильтром должен быть примерно вдвое выше, чем за фильтром из V.

На рис. 1,б приведена фотохронограмма, полученная за такими фильтрами. Фильтр Fe-30 мкм не был установлен, так как при ожидаемых 20 Дж в линии  $He_{\alpha}$  сигнал за ним заведомо был бы в зашкале. Вместо него установлен фильтр Fe-90 мкм.

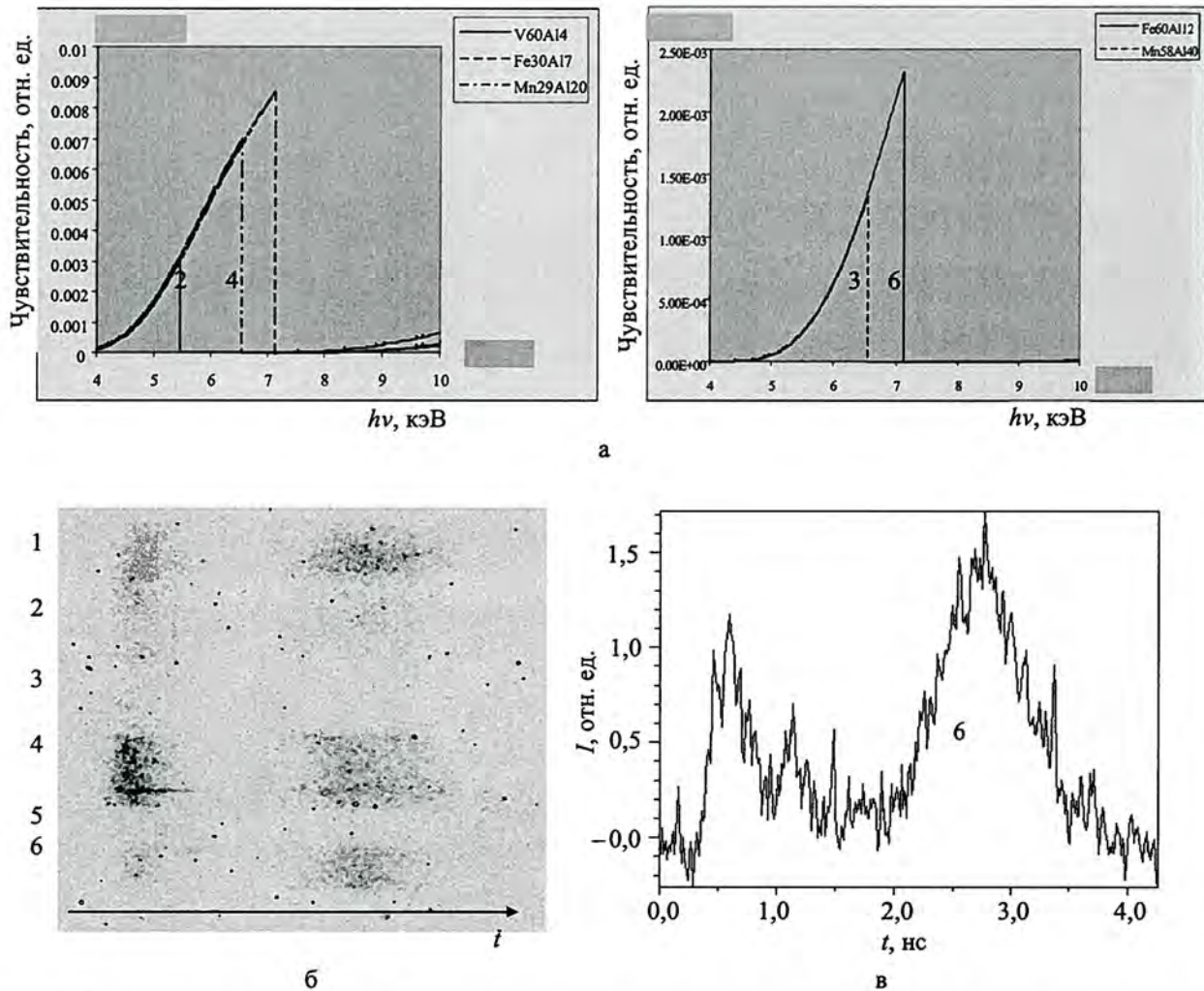


Рис. 1. Регистрация рентгеновского излучения с временным разрешением. Спектральная чувствительность каналов за фильтрами Росса (а), полученная фотохронограмма (б) и форма импульса за фильтром Fe-60 мкм (в): 1 – V (40 мкм); 2 – V (60 мкм)+Al (4 мкм); 3 – Mn (58 мкм)+Al (40 мкм); 4 – Mn(29 мкм)+Al(20 мкм); 5 – Fe (91 мкм); 6 – Fe (60 мкм)+Al (12 мкм).

Как видно из фотохронограммы, сигнал за фильтром из Fe-60 мкм (6) превосходит сигнал за фильтром из Mn-58 мкм (3) примерно в три раза в первом импульсе и на порядок – во втором. Следовательно, сигнал за Fe фильтром практически полностью определяется линией  $He_{\alpha}$ , за исключением первого импульса, амплитуда которого несколько завышена из-за вклада континуума. Форма импульса за этим фильтром приведена на рис. 1,в. Грубая оценка по фотохронограмме дает энергию в линии  $He_{\alpha}$  около 4 Дж за импульс.

Сигнал за фильтром Mn-29 мкм (4) после учета неоднородности чувствительности экрана фотохронограф оказался всего в два раза выше сигнала за фильтром V-60 мкм (2), что говорит о том, что интенсивность линии  $K_{\alpha}$  незначительна, и видимо, энергия в ней  $< 0,1$  Дж. Это говорит о том, что быстрых электронов в этом опыте было мало и они не играли существенной роли в протекающих процессах.

Аналогичные фильтры при регистрации линий Al, подбираются из материалов Al, Cl и Ti. Сигнал за фильтром из Al, отрезающим линейчатое излучение, оказался в 10–20 раз ниже сигналов за фильтрами из Ti и Cl, что говорит о том, что сигнал за ними определяется линейчатым излучением.

### Пространственно-временная регистрация

Схема пространственно-временной регистрации рентгеновского излучения в различных спектральных интервалах [4], вид мишени со стороны фотохронографа и пример получаемой фотохронограммы при облучении мишени из Al представлены на рис. 2.

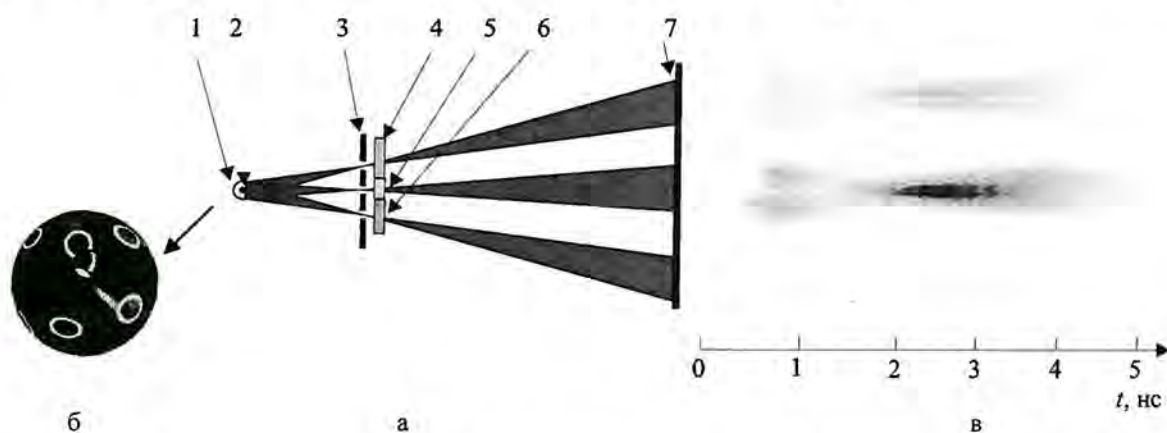


Рис. 2. Схема пространственно-временной регистрации рентгеновского излучения (а), вид мишени со стороны фотохронографа (б) и типичная фотохронограмма (в): 1 – мишень; 2 – сжатое ядро; 3 – три щели-обскуры; 4 – фильтр из Cl пленки 57 мкм; 5 – фильтр лавсан 40 мкм; 6 – фильтр Ti 10 мкм; 7 – фотокатод РФР-4

В данной методике три щели-обскуры строят на входной щели фотокатода фотохронографа РФР-4 [2] три изображения мишени с  $M = 2$  (пространственное разрешение  $\sim 150$  мкм), которые и разворачиваются во времени с помощью фотохронографа. Временное разрешение фотохронографа составляло  $\sim 50$  пс. Каждое изображение может строиться в своем спектральном интервале, вырезаемом соответствующим фильтром. Фильтры выбираются такие, чтобы сигнал за ними определялся преимущественно линейчатым излучением. В первых экспериментах устанавливались фильтры Росса, но так как сигнал за фильтрами, не пропускающими линейчатое излучение, был всегда минимум на порядок слабее остальных, вместо такого фильтра стали устанавливать широкополосный фильтр из лавсана.

На рис. 3 приведены интегральная по пространству форма импульса за фильтром из Cl (определяется линиями Al), а также распределение свечения мишеней по радиусу в момент максимума лазерного импульса и в момент минимума размера сжатого ядра (0,8 нс и 1,8 нс по фотохронограмме на рис. 2).

Как видно из фотохронограммы на рис. 2 и рис. 3,а, наблюдаются два импульса рентгеновского излучения. Первый импульс длительностью 0,45–0,7 нс на полувысоте интенсивности вызван свечением мишени при ее облучении лазерным импульсом, а второй импульс длительностью 2–2,5 нс для мишеней из Al и  $\approx 1$  нс для мишеней из Fe вызван схлопыванием плазмы в центре мишени. Длительность первого импульса примерно соответствует длительности лазерного импульса.

Во время облучения мишени лазерным импульсом ее свечение (рис. 2 и рис. 3,б) неоднородно и состоит из нескольких пятен, положение которых примерно соответствует расчетному положению пятен облучения на ее поверхности. Перепад интенсивностей достигает 2–3 раз.

Через 1,2–1,4 нс после начала воздействия лазерного импульса начинает формироваться сжатое ядро в центре мишени, минимальный размер которого составляет около 400–600 мкм в разных опытах (рис. 2 и рис. 3,в). Общая длительность свечения мишеней из Al  $\geq 5$  нс, мишеней из Fe 3–3,5 нс.

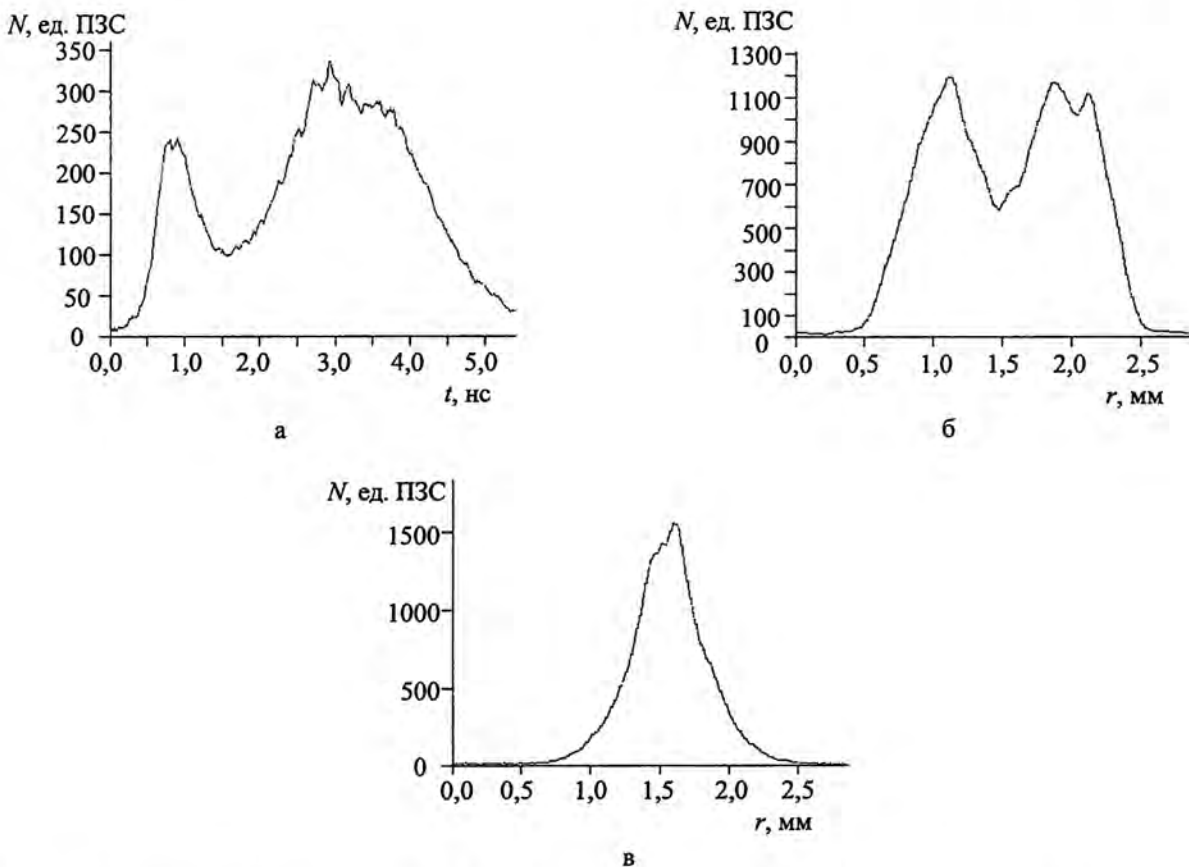


Рис. 3. Интегральная по пространству форма импульса свечения линий Al (а), распределение свечения мишеней по радиусу в моменты максимума лазерного импульса (б) и минимального размера сжатого ядра (в)

### **Многокадровая пространственно-пространственная регистрация**

Многокадровая пространственно-пространственная регистрация свечения мишени велась с помощью многокадрового регистратора СХР7 [5], имеющего следующие параметры.

Спектральный диапазон регистрации .....	0,15–10 кэВ
Количество кадров .....	10
Длительность кадров (расчетная) .....	100 пс
Общая длительность развертки .....	1 нс

Пространственное разрешение .....	13 пар. лин./мм
Динамический коэффициент преобразования .....	70
Регистрация изображения .....	на фотопленку 35 мм

Внешний вид СХР7 вместе с блоком обскур приведен на рис. 4.

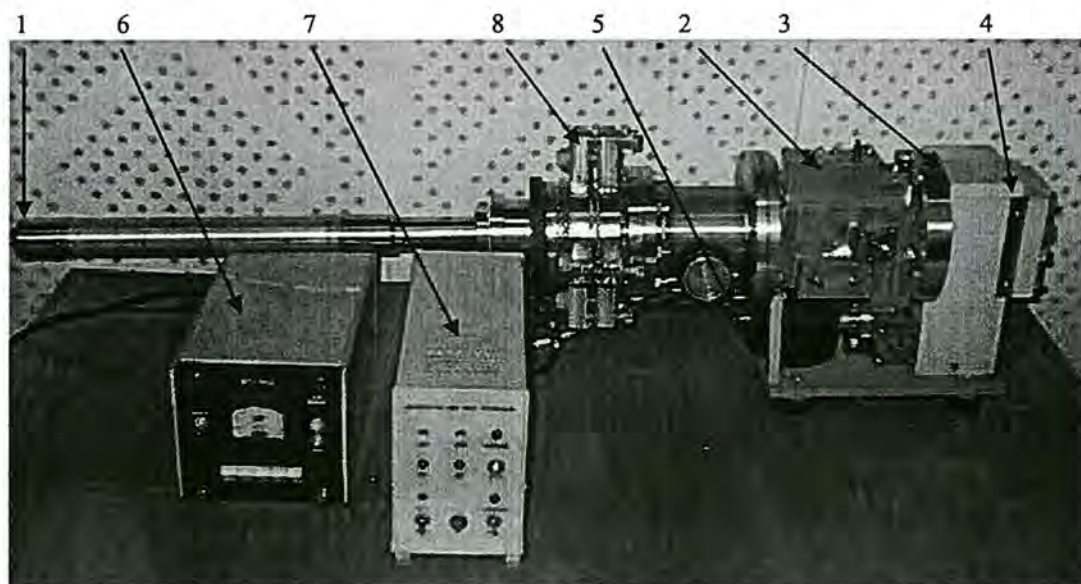


Рис. 4. Многокадровый регистратор СХР7 с блоком обскур: 1 – блок обскур; 2 – блок откачной; 3 – камера электронно-оптическая; 4 – фотокамера; 5 – высоковакуумный насос; 6 – блок питания насоса; 7 – блок управления; 8 – юстировочный блок

Схема регистрации приведена на рис. 5. Блок обскур содержит пять рядов отверстий диаметром от 10 до 40 мкм, по девять отверстий в каждом ряду. Обскуры изготовлены в вольфрамовой фольге толщиной 30 мкм. Каждый ряд строит изображения на своей полосковой линии (на длине катода помещается 6–7 изображений). Коэффициент увеличения изображения мишени составлял 1,5, пространственное разрешение за обскурами разного диаметра составляет 15, 30 и 60 мкм. Каждый последующий кадр строится с задержкой ~ 30 пс после предыдущего при длительности кадра 100 пс. Таким образом, три соседних кадра снимаются практически одновременно, но использование обскур разного диаметра расширяет динамический диапазон регистрации. Регистрация велась в спектральном интервале, вырезаемом хлорсодержащей пленкой толщиной 57 мкм, сигнал за которой определяется линейчатым излучением Al.

На рис. 6 приведены изображения мишени за обскурами 40 мкм, полученные в двух последовательно проведенных опытах. Так как общая длительность развертки регистратора равна 1 нс, то в первом опыте регистрировалось свечение мишени под действием лазерного импульса, а во втором задержка пуска была изменена на 1 нс, чтобы регистрировать момент появления сжатого ядра. На некоторых изображениях часть мишени не видна из-за погрешностей в юстировке. Вместо первого слабоинтенсивного изображения приведены вид мишени, как ее видит регистратор, и расчетное положение пятен облучения на ней.

На рис. 7 приведены распределения свечения мишени по сечениям, показанном стрелками на рис. 6, на моменты времени 0,6 нс (момент максимума свечения лазерного импульса) и 1,6 нс (момент минимального размера сжатого ядра).

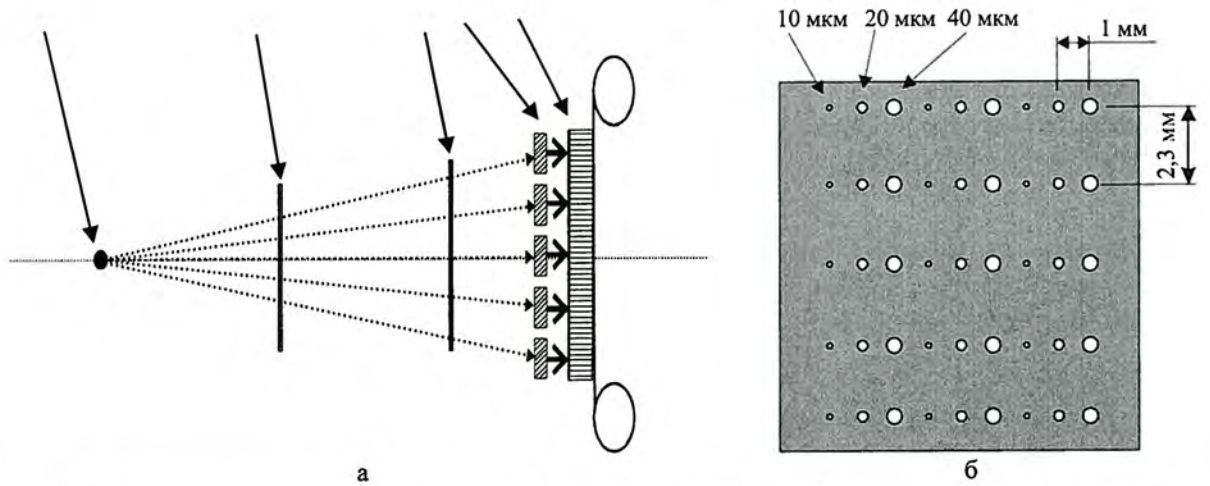


Рис. 5. Схема многокадровой регистрации (а) и блок обскур (б): 1 – мишень; 2 – блок обскур; 3 – фильтр; 4 – полосковые линии на МКП регистратора СХР-7; 5 – выходной экран; 5 – фотопленка

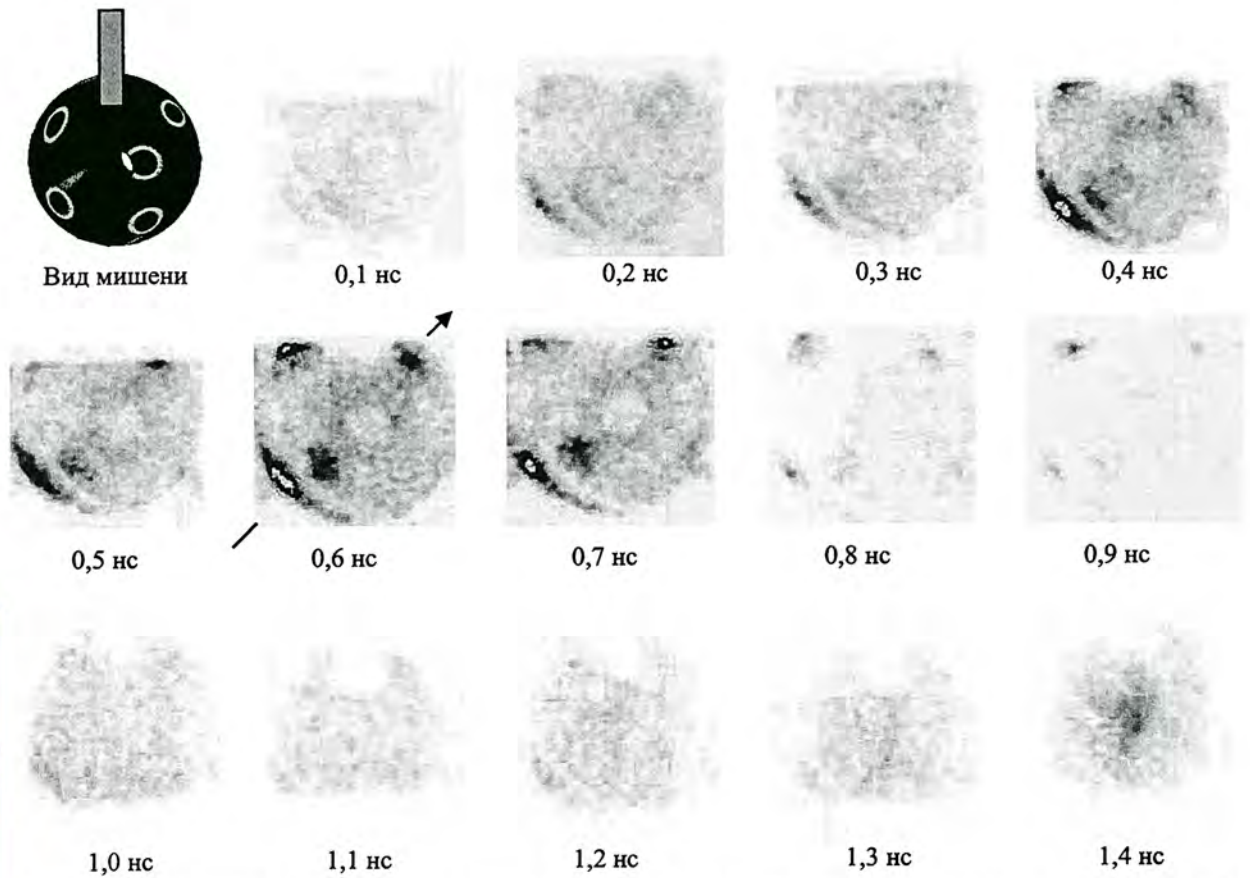


Рис. 6. Изображения Al мишени, полученные в двух последовательно проведенных опытах. (10 кадров за опыт, длительность каждого кадра 100 пс). Яркость первых двух слабых кадров при обработке увеличена в 4 раза относительно остальных (см. также с. 157)

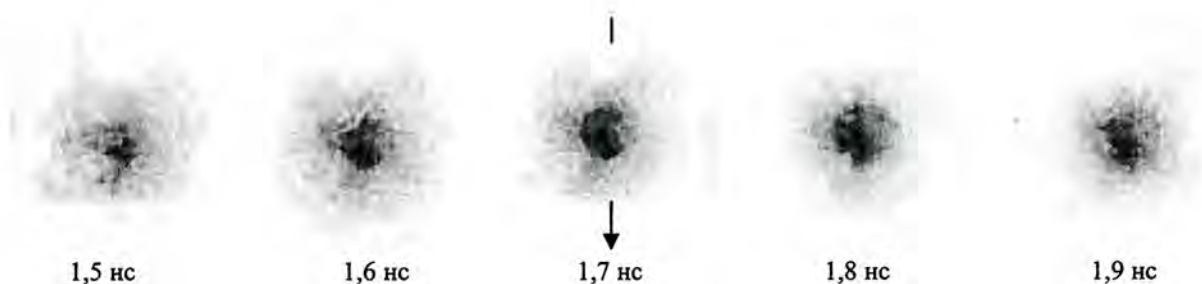


Рис. 6. Окончание

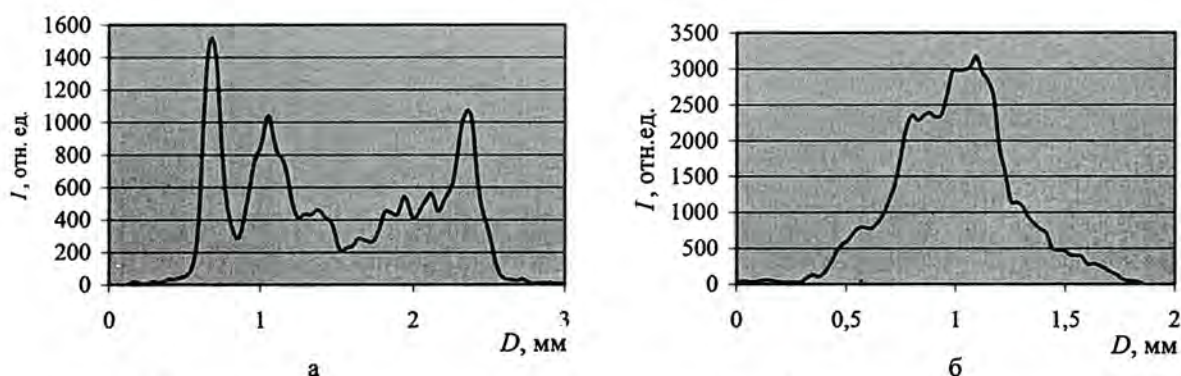


Рис. 7. Распределение свечения мишени в момент времени 0,6 нс в сечении, проходящем через пятна облучения (а), и в момент времени 1,7 нс в вертикальном сечении (б)

Как видно из рисунков, в первом опыте видны отверстия ввода, пятна облучения, место сочленения двух половин мишени, а также пятна от облучения мишени лазерными пучками, причем их положение примерно совпадает с расчетным. Размер этих пятен, как видно из рис. 7, составляет около 300 мкм на полувысоте интенсивности, что соответствует ожидаемому. В целом, свечение мишени крайне неоднородно и перепад интенсивностей по мишени достигает 7,5 раз.

Аналогично результатам предыдущей методики с момента 0,8 нс оболочка мишени практически перестает светиться, а с 1,4 нс начинает формироваться сжатое ядро. На 1,7 нс оно круглое имеет размер около 600 мкм на полувысоте, но неоднородное – с одной стороны имеется яркое пятно размером около 300 мкм.

В опытах с мишенями из Fe, сжатое ядро также начинает формироваться с 1,4 нс, но оно крайне неоднородно по интенсивности и не круглое; на 1,9 нс оно имеет размер около 450 мкм на полувысоте в горизонтальном направлении, но имеется похожее на трапецию яркое пятно.

## Выводы

1. Разработаны методики регистрации линейчатого рентгеновского излучения материалов тонкооболочечных сферических мишеней, облучаемых на установке "Искра-5" с временным (50 пс) разрешением за фильтрами Росса, пространственно-временным (150 мкм, 50 пс) в 3 спектральных каналах одновременно, а также методика многокадровой (10 кадров по 100 пс) про-



странственно-пространственной (15–60 мкм) регистрации и проведена регистрация излучения из Al и Fe мишеней.

2. Наблюдается 2 импульса линейчатого излучения: первый длительностью 0,45–0,7 нс на полувысоте интенсивности вызван свечением мишени при ее облучении лазерным импульсом, а второй длительностью 2–2,5 нс для мишеней из Al и  $\approx 1$  нс для мишеней из Fe, вызван схлопыванием плазмы в центре мишени.

3. Свечение мишени под действием лазерного импульса неоднородно: на среднем фоне выделяются пятна облучения мишени лазерными пучками размером около 300 мкм на полувысоте интенсивности. Перепад интенсивностей по мишени достигает 7,5 раз.

4. Через 1,2–1,4 нс после начала воздействия лазерного импульса начинает формироваться сжатое ядро в центре мишени, минимальный размер которого составляет 400–600 мкм. Ядро неоднородно по интенсивности и, как правило, не круглое.

### Список литературы

1. Бельков С. А., Бессараб А. В., Воинов Б. А. и др. Диагностика рентгеновского излучения частично прозрачной плазмы железа и алюминия мишеней типа МОК. Доклад на 5-х Международных Забабахинских научных чтениях. 21.09.98–25.09.98, Снежинск, 1998.
2. Лазарчук В. П., Мунтян А. Н., Муругов В. М., Петров С. И., Сенник А. В. Методика измерения абсолютных потоков линейчатого рентгеновского излучения лазерной плазмы на установке "Искра-5" // ПТЭ. 2006, № 2. С. 121–127.
3. Лазарчук В. П., Литвин Д. Н., Кравченко А. Г. и др. Рентгеновский фотохронограф РФР-4 // ПТЭ. 2004, № 2. С. 128–132.
4. 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. 101–106.
5. Лазарчук В. П., Литвин Д. Н., Кравченко А. Г. и др. Многокадровый регистратор рентгеновского излучения с длительностью кадра 100 пс // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 9. Саров. 2005. С. 132–137.

## **Time and Space Measurements Techniques of the Laser Plasma X-ray Lines Emission at the Facility "Iskra-5"**

V. P. Lazarchuk, A. N. Muntyan, V. M. Murugov, S. I. Petrov, A. V. Senik

*The methods are described that were devised for spatiotemporal measurements of line X radiation generated in Al and Fe plasmas inside a 2-mm-diameter hollow spherical target whose inner surface was coated with a thin layer of the material to be investigated and which was irradiated by the second harmonic of the laser radiation in the Iskra-5 laser facility. The results of measurements are presented.*