

## ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ МИКРОСКОПЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИАПАЗОНЕ 0,3-10,0 КЭВ

Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов, А. Г. Какшин, А. В. Потапов, К. В. Сафронов, П. А. Толстоухов

РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск, Россия

### Введение

Важную информацию о процессах, происходящих при нагреве мишеней лазерным излучением, дает исследование рентгеновского излучения плазмы с пространственным разрешением.

На субпикосекундной лазерной установке РФЯЦ-ВНИИТФ двумерные изображения плазмы лазерных мишеней в рентгеновском диапазоне регистрируются с помощью камеры-обскуры. Это простейшее оптическое приспособление, позволяющее получать изображение предметов [1, 2]. Оптимально резкое изображение получается, когда радиус отверстия  $r$  составляет 0,95 радиуса первой зоны Френеля [3]:

$$r = 0,95 \cdot \sqrt{\lambda d},$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – расстояние от отверстия до фотопленки. Камера-обскура дает изображение, свободное от дисторсии, и позволяет фотографировать объекты в рентгеновских лучах. Однако камера-обскура обладает существенными недостатками [4]:

- пространственная разрешающая способность камеры-обскуры лимитируется дифракцией на апертуре отверстия;
- при улучшении разрешающей способности [5] до единиц микрометров светосила камеры-обскуры становится чрезвычайно низкой;
- ширина спектрального окна не может быть меньше нескольких ангстрем.

Кроме того, имеется еще одна принципиальная трудность в использовании камеры-обскуры – высокий фон жесткого рентгеновского излучения, образующегося в мишени, на стенках вакуумной камеры и на конструктивных элементах диагностических методик, в том числе и на самой камере-обскуре, при бомбардировке их быстрыми электронами. Поскольку отверстия, формирующие изображение в камере-обскуре, сделаны в тонкой свинцовой фольге, технически довольно сложно уменьшить фоновую подсветку фотопленки жестким рентгеновским излучением.

Прибором, позволяющим достичь лучшего пространственного разрешения (около 1 мкм), но гораздо более сложным в изготовлении и настройке, чем камера-обскура, является рентгеновский микроскоп [6–8]. Светосила и пространственная разрешающая способность рентгеновского микроскопа значительно выше, чем у камер-обскуры.

Целью данной работы являлось создание рентгеновских микроскопов Киркпатрика-Баеза (КБ) [6], работающих в диапазоне энергий квантов 0,3–10,0 кэВ. Разрешающая способность микроскопов должна быть лучше 2 мкм, что связано с уменьшением диаметра фокального пятна до 6–7 мкм в результате модернизации лазерной установки [9].

### 1.2 Рентгеновский микроскоп КБ для диапазона энергий 0,3-1,5 кэВ

Схема рентгеновского микроскопа КБ представлена на рис. 1.

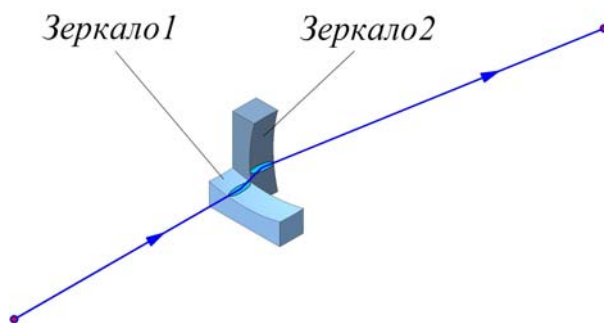


Рис. 1. Схема рентгеновского микроскопа КБ

Микроскоп состоит из двух пересекающихся под прямым углом цилиндрических (или сферических) зеркал, так что лучи, отраженные двумя зеркалами при скользких углах падения, формируют по законам геометрической оптики двумерное изображение излучающего объекта. При этом наличие двух взаимно ортогональных зеркал необходимо для компенсации астигматизма, возникающего при однократном отражении.

Исходя из требуемого спектрального состава регистрируемого излучения ( $E = 0,3 \div 1,5$  кэВ), был выбран угол падения излучения на зеркала  $\theta = 2^\circ$ . При  $\theta > 3^\circ$  существенно уменьшается отражение квантов с энергией  $E > 1$  кэВ. В то же время при  $\theta < 1^\circ$  регистрация квантов с энергией  $E = 0,3 \div 0,8$  кэВ будет затруднена из-за увеличения вклада в изображение квантов с энергией  $E > 1,5$  кэВ, чувствительность фотопленки к которым, в десятки раз больше.

Селекция рентгеновского излучения производится с помощью зеркал микроскопа и рентгеновских фильтров. Обрезание спектра со стороны низкоэнергетических квантов производится рентгеновскими фильтрами. На рис. 2 показаны расчетные спектральные функции каналов микроскопа [10], представляющие собой произведение коэффициентов пропускания фильтров и отражения зеркал.

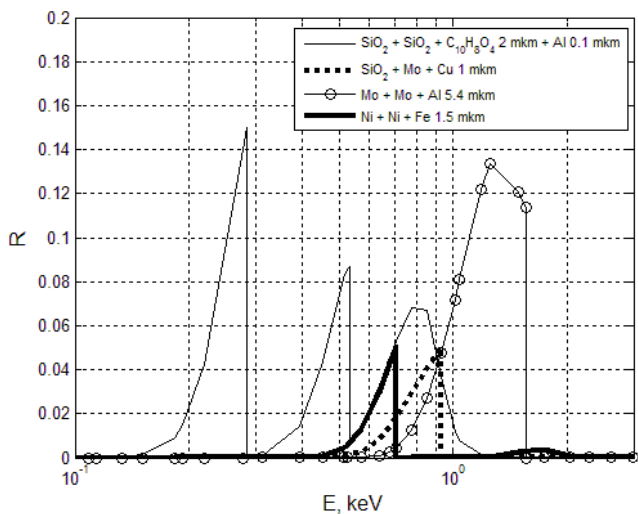


Рис. 2. Расчетные спектральные функции каналов микроскопа

В рентгеновском микроскопе плотность почернения фотопленки при регистрации изображений зависит от нескольких факторов, в том числе и от входной апертуры канала. Минимальная входная апертура системы КБ составляет  $A_{min} \approx 4,5 \cdot 10^{-6}$  ср. Такое значение апертуры соответствует дифракционной (наилучшей возможной) разрешающей способности  $\delta_d = 2,0 - 0,4$  мкм ( $\epsilon = 0,3 - 1,5$  кэВ). Для сравнения, апертура камеры-обскуры, применяемой в экспериментах на лазерной установке,  $A_{к.о.} \approx 10^{-7}$  ср. С такой апертурой камера-обскура позволяет получать изображения ЛП с хорошей плотностью почернения фотопленки. Поскольку в рентгеновском микроскопе, по

сравнению с камерой-обскурой, присутствуют зеркала, ослабляющие в 3–5 раз поток квантов с энергиями  $\epsilon > 0,8$  кэВ, входная апертура канала микроскопа должна быть больше  $A_{к.о.}$  в ~5 раз. В данном микроскопе  $A_{min}$  превосходит  $A_{к.о.}$  в ~50 раз, что позволяет уверенно регистрировать изображения светящейся области мишени.

В табл. 1 приведены начальные условия для расчета рентгеновского микроскопа.

Таблица 1

Условия для расчета рентгеновского микроскопа

Расстояние от мишени до первого зеркала $a$ , мм	50
Расстояние между зеркалами $\Delta$ , мм	6
Угол падения $\theta$ , °	2
Коэффициент увеличения $\Gamma$	6÷9
Разрешающая способность (в плоскости объекта) $\delta$ , мкм	2
Энергия регистрируемых квантов $\epsilon$ , кэВ	0,3–1,5

Начальные условия были выбраны из следующих соображений:

– расстояние  $a$  от мишени до первого зеркала было выбрано, исходя из габаритов лазерного пучка и возможности постановки других диагностических методик;

– расстояние между зеркалами  $\Delta$  (равное или большее ширины зеркала) предварительно оценивалось по  $A_{min}$ .

На рис. 3 представлена схема для расчета микроскопа. Зеркало  $Z_1$  создает астигматическое изображение источника – меридиональное в  $O'$  и сагиттальное в  $O''$ . Радиус кривизны и положение зеркала  $Z_2$  должны быть такими, чтобы изображение  $O'$  было сагиттальным, а  $O''$  – меридиональным для точки  $O_1$ , в которой, по закону обратимости, достигается стигматическое изображение источника  $O$  [8].

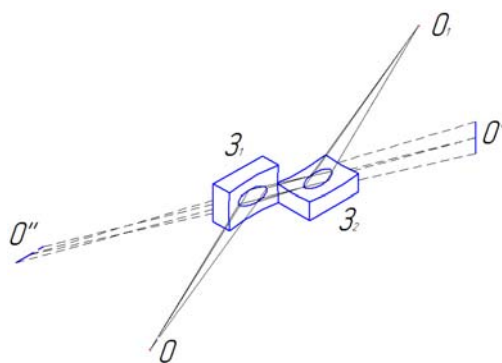


Рис. 3. Схема для расчета микроскопа КБ

Исходя из этого, можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{f_{m1}} = \frac{1}{b_{m1}} + \frac{1}{a} \\ \frac{1}{f_{s2}} = -\frac{1}{b_{m1} - \Delta} + \frac{1}{\Gamma_1 \cdot a} \\ \frac{1}{f_{s1}} = \frac{1}{b_{s1}} + \frac{1}{a} \\ \frac{1}{f_{m2}} = -\frac{1}{b_{s1} - \Delta} + \frac{1}{\Gamma_2 \cdot a} \end{cases},$$

где  $f_s = \frac{R}{2 \cdot \sin(\theta)}$ ,  $f_m = R \frac{\sin(\theta)}{2}$  – сагиттальное и

меридиональное фокусные расстояния, соответственно,  $R$  – радиус кривизны зеркала,  $a$  – расстояние от мишени до первого зеркала,  $\Delta$  – расстояние между зеркалами,  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – коэффициенты увеличения системы в сагиттальной и меридиональной плоскостях, соответственно,  $b_{m1}, b_{s1}$  – расстояния от центра первого зеркала до  $O'$  и  $O''$ , соответственно.

Решая систему уравнений (1.1) и принимая в первом приближении  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma = 7$ , получаем  $R_1 \approx 2515$  мм,  $R_2 \approx 2770$  мм. Инструментальная оснастка оптического участка НИО-5 РФЯЦ-ВНИИТФ позволяет изготовить ряд зеркал с радиусами, близкими к расчетным. С помощью габаритно-абберационного расчета в программном пакете OPAL-PC [11] было определено, что зеркала с радиусами  $R_1 = 2582$  мм,  $R_2 = 2858$  мм из этого ряда обеспечивают наилучшую разрешающую способность микроскопа. Результаты расчета параметров рентгеновского микроскопа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета параметров рентгеновского микроскопа

Ширина зеркала, мм	4
Расстояние от центра второго зеркала до регистратора $b$ , мм	450
Входная апертура, ср	$7 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент увеличения в сагиттальной плоскости $\Gamma_1$	9,0
Коэффициент увеличения в меридиональной плоскости $\Gamma_2$	8,2
Разрешающая способность в центре поля объекта $\delta$ , мкм	$\sim 1,5$

Как видно из таблицы 2, входная апертура системы удовлетворяет поставленным выше ограничениям: она представляет собой прямоугольник  $140 \times 125$  мкм<sup>2</sup> (в центре первого зеркала). Коэффициент анаморфозы, учитывающий разницу в коэффициентах увеличения, составляет  $A = 1,1$ .

Постоянство разрешающей способности  $\delta$  для всего диапазона энергий квантов обусловлено aberrациями (кома и сферическая aberrация). Для их устранения необходимо применять зеркала асферической формы, сложные в изготовлении. В нашем случае расчетная разрешающая способность не хуже заданной, что позволяет использовать простые зеркала сферической формы. Для точек на краю объекта радиусом около 30 мкм рассчитанная разрешающая способность не хуже  $\delta \approx 2$  мкм.

С помощью габаритно-абберационного расчета также был определен допуск неточности установки углов падения при сборке системы, который составил  $\pm 3'$  при разном знаке ошибки для каждого зеркала и  $7'$  при одинаковом. Если сборка микроскопа выполняется путем склеивания четырех зеркал с образованием четырех каналов, то рассчитанный угловой допуск означает, что допустимая неточность установки расстояния  $a$  составляет  $\pm 0,5$  мм, а неточность установки объекта на оси сборки – не более  $0,1$  мм. Глубина резкости (допуск на расстояние  $b$ ) составила  $\pm 30$  мм при разрешающей способности не хуже  $\delta_{зад} = 2$  мкм, при этом, соответственно, изменялось и увеличение системы на  $\pm 7\%$ .

Сборка рентгеновского микроскопа и определение его разрешающей способности описаны в [12].

В результате проведенной работы был создан четырехканальный рентгеновский микроскоп КБ [12] для регистрации двумерных изображений излучающей области лазерных мишеней. На рисунке 4 представлены его внешний вид и схема.

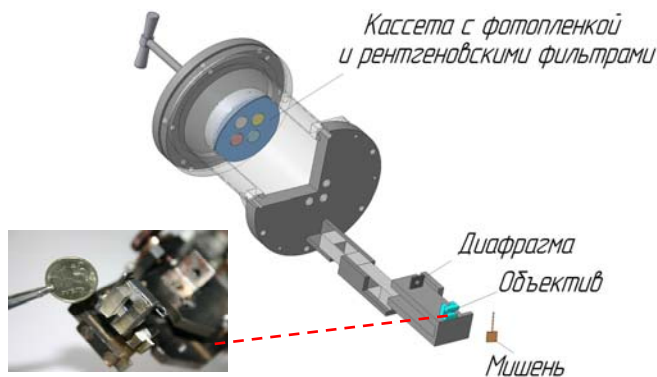


Рис. 4. Четырехканальный рентгеновский микроскоп КБ

Для сравнения, на рисунке 5 приведено изображение излучающей области мишени (рентгеновские кванты с энергией  $\sim 1,5$  кэВ), полученное с помощью: 5а – рентгеновского микроскопа, 5б – камеры-обскуры.

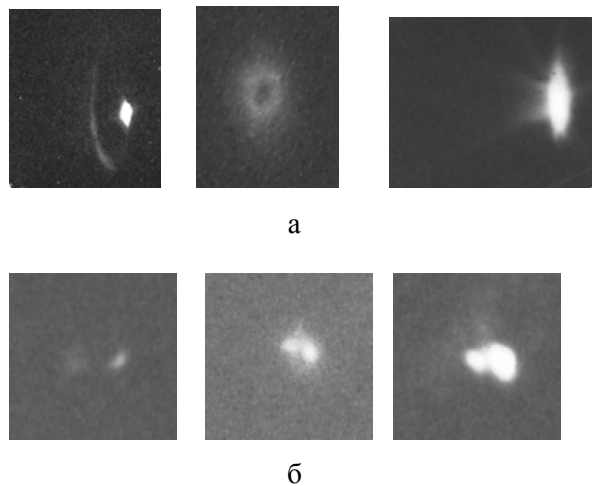


Рис. 5. Изображение излучающей области мишени

Первая пара изображений соответствует случаю, когда лазерное излучение взаимодействует не только с фольгой, но и с оправкой мишени. На второй паре зарегистрировано разрушение тонких мишеней, вызванное воздействием на них предымпульсов. На третьей паре видно прохождение лазерного послειмпульса через разлетающуюся плазму.

### 1.3 Рентгеновский микроскоп КБ для диапазона энергий 1,5–10,0 кэВ

Расчет, изготовление и юстировка рентгеновского микроскопа, работающего в диапазоне 1,5–10,0 кэВ такие же, как для микроскопа, предназначенного для мягкого РИ. Однако из-за того, что углы падения излучения на зеркала близки к нулевым, процесс его изготовления и юстировки гораздо более сложный. В табл. 3 приведены начальные данные и результаты расчета рентгеновского микроскопа для диапазона энергий 1,5–10,0 кэВ.

Таблица 3

Начальные данные и результаты расчета

Начальные данные	Расстояние от мишени до центра первого зеркала $a$ , мм	75
	Расстояние между зеркалами $\Delta$ , мм	17
	Угол падения $\theta$ , °	0,3

Начальные данные	Коэффициент увеличения	7
	Разрешающая способность в центре поля объекта $\delta$ , мкм	$\sim 1,5$
	Энергия квантов регистрируемого излучения $\varepsilon$ , кэВ	1,5–10,0
Результаты расчета	Радиус первого зеркала $R_1$ , мм	25120
	Радиус второго зеркала $R_2$ , мм	29650
	Ширина зеркала, мм	17
	Расстояние от центра второго зеркала до регистратора $b$ , мм	495
	Входная апертура, ср	$1 \cdot 10^{-6}$
	Коэффициент увеличения в сагиттальной плоскости $\Gamma_1$	7,1
	Коэффициент увеличения в меридиональной плоскости $\Gamma_2$	5,4
Коэффициент анаморфозы $A$	1,3	

На рис. 6 показаны спектральные функции каналов микроскопа, рассчитанные с использованием оптических констант материалов из [10].

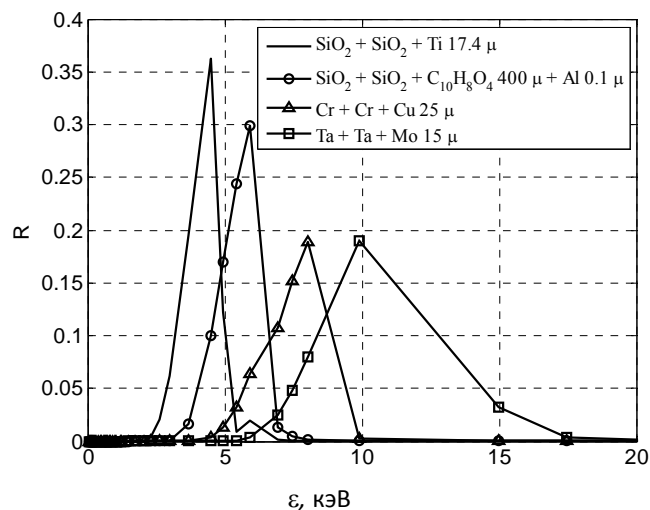


Рис. 6. Спектральные функции каналов микроскопа

На рис. 7 представлен внешний вид четырехканального рентгеновского микроскопа КБ, регистрирующего двумерные изображения излучающей области лазерных мишеней в диапазоне энергий 1,5–10,0 кэВ. Принципиально этот микроскоп ничем не отличается от описанного ранее микроскопа для диапазона энергий 0,3–1,5 кэВ.



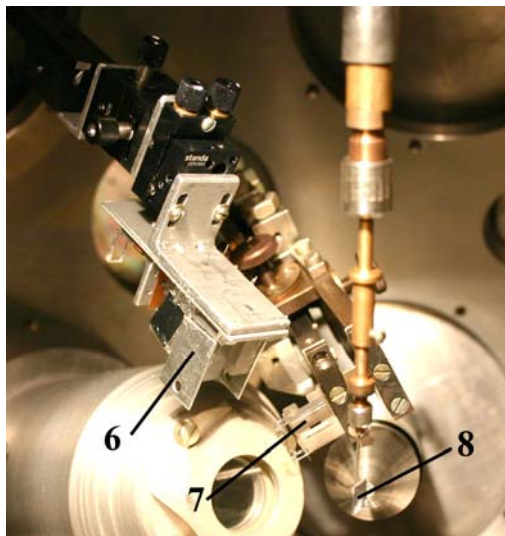
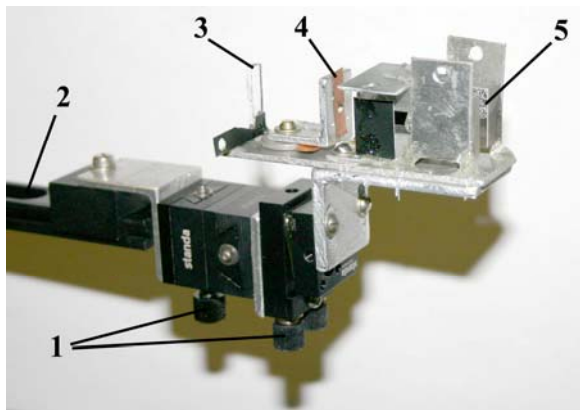


Рис. 7. Внешний вид четырехканального рентгеновского микроскопа КБ: 1 – юстировочные винты; 2 – кронштейн; 3 – зеркало; 4 – диафрагма; 5, 6 – четырехканальный объектив рентгеновского микроскопа для диапазона энергий 1,5–10 кэВ; 7 – четырехканальный объектив рентгеновского микроскопа для диапазона энергий 0,3–1,5 кэВ; 8 – мишень

### Заключение

Для исследования пространственных и спектральных характеристик лазерной плазмы были изготовлены два четырехканальных рентгеновских микроскопа, работающие по схеме Киркпатрика-Баеза. Один из них позволяет получать изображения в диапазоне 0,3–1,5 кэВ с девятикратным увеличением, другой – в диапазоне 1,5–10 кэВ с семикратным увеличением. Экспериментально определена их разрешающая способность  $\delta \approx 1,5$  мкм, которая совпала с расчетной.

С помощью рентгеновских микроскопов были получены изображения лазерной плазмы с высоким разрешением. Это позволило выявить такие отрицательные эффекты, как разрушение тонких мишеней, вызванное воздействием на них предимпульсов, и прохождение лазерного послепульса через разлетающуюся плазму. Устранение в будущем этих эффектов позволит проводить на лазерной установке эксперименты с мишенями толщиной менее 1 мкм и повысить точность диагностирования лазерной плазмы.

### Список литературы

1. Key M. H., Eidman K., Dorn C., Phys. Lett., 1974, 48A, 121.
2. Захаренков Ю. А., Зорев Н. Н., Крохин О. Н. и др. ЖЭТФ, 1976. 70, 574.
3. Физическая энциклопедия / Гл. ред. Прохоров А.М., рек. кол.: Алексеев Т.М., Болдин А.М., Бонч-Бруевич А. М. и др. М.: Большая Российская энциклопедия. Т. II. Добротность-Магнитооптика. 1998. С. 704.
4. Бойко В. А., Пикуз С. А., Фаенов А. Я. ПТЭ, 1980, № 2, 5.
5. Ландсберг Г. С. Оптика. М: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
6. Kirkpatrick P., Baez A.V., J. Opt. Soc. Amer. – 1948. Vol. 38. N. 9. P. 766–774.
7. Сьюард Ф., Дент Ж., Бойл М. и др., Приборы для научных исследований, 1976, № 4, 63.
8. Зеркальная рентгеновская оптика / Виноградов А. В., Брытов И. А., Грудский А. Я. и др. Л.: Машиностроение, 1989. С. 463.
9. Andriyash A. V., Vikhlyayev D. A., Gavrilov D. S. et al. The spectral-angular distribution measurements of fast protons from the rear side of a target in experiments on the SOKOL-P facility at laser intensity of  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>. In abstracts of 50<sup>th</sup> APS-DPP 2008. Bulletin of the American Physical Society, 53, № 14, P. 153.
10. Atomic Data and Nuclear Data Tables / Henke B. L. Gullikson E. M. and Davis J. C. Academic Press, Inc. № 2, July 1993.
11. Автоматизация проектирования оптических систем / Родионов С. А. Л.: Машиностроение, 1982.
12. Вихляев Д. А., Гаврилов Д. С., Какшин А. Г. и др., Квантовая электроника, 2011, Т. 41 (3), С. 234–238.