

Рентгеновский четырехканальный микроскоп для исследования плазмы на лазерной установке «Сокол-П»

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

Описаны расчет, сборка и юстировка рентгеновского микроскопа, работающего по схеме Киркпатрика–Баеза. Изложен метод экспериментального определения разрешающей способности микроскопа. Изготовленный микроскоп позволяет одновременно получать изображения плазмы лазерных мишеней в четырех узких областях энергий из рентгеновского диапазона 0.3–1.5 кэВ с разрешением ~ 2 мкм.

Ключевые слова: рентгеновская микроскопия лазерной плазмы, схема Киркпатрика–Баеза.

1. Введение

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

На лазерной установке «Сокол-П» двумерные изображения плазмы лазерных мишеней в рентгеновском диапазоне регистрируются с помощью камеры-обскуры. Это простейшее оптическое приспособление, позволяющее получать изображения предметов [1, 2]. Разрешение камеры-обскуры определяется по формуле [3]

$$\delta^2 \approx \left[\frac{D(\Gamma + 1)}{\Gamma} \right]^2 + \left(\frac{2.44 \lambda a}{D} \right)^2,$$

где λ – длина волны; D – диаметр отверстия; a – расстояние от источника до отверстия; Γ – коэффициент увеличения. Камера-обскура дает изображение, свободное от дисторсии, и позволяет фотографировать объекты в рентгеновских лучах. Однако она имеет существенные недостатки [4]:

- пространственная разрешающая способность камеры-обскуры ограничивается 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 использования камеры-обскуры на установке «Сокол-П» – высокий фон жесткого рентгеновского излучения, возникающего в мишени, на стенках вакуумной камеры и на конструктивных элементах диагностической

аппаратуры, в том числе и на самой камере-обскуре, при бомбардировке их быстрыми электронами. Поскольку отверстия, формирующие изображение в камере-обскуре, сделаны в тонкой фольге, технически довольно сложно уменьшить фоновую подсветку фотопленки жестким рентгеновским излучением.

Прибором, позволяющим достичь лучшего пространственного разрешения (~ 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-обскур.

Системы из сферических зеркал со скрещенными плоскостями падения излучения были впервые рассмотрены Киркпатриком и Баезом применительно к задаче построения стигматического рентгеновского микроскопа [6]. Микроскоп состоит из двух цилиндрических (или сферических) зеркал, отражающие поверхности которых пересекаются под прямым углом. При этом лучи, последовательно 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.

Целью данной работы являлось создание рентгеновского микроскопа, работающего в диапазоне энергий квантов 0.3–1.5 кэВ. Разрешающая способность микроскопа должна быть лучше 2 мкм, что связано с уменьшением диаметра лазерного фокального пятна до 6–7 мкм в результате модернизации установки «Сокол-П» [9].

2. Расчет рентгеновского микроскопа

Исходя из требуемого спектрального состава регистрируемого излучения ($E = 0.3–1.5$ кэВ), был выбран центральный угол падения излучения на зеркала $\theta = 2^\circ$. При $\theta > 3^\circ$ существенно уменьшается коэффициент отражения квантов с энергией $E > 1$ кэВ. В то же время при $\theta < 1^\circ$ регистрация квантов с энергией 0.3–0.8 кэВ будет затруднена из-за увеличения вклада в изображение квантов с энергией $E > 1.5$ кэВ, чувствительность фотопленки к которым, в десятки раз больше.

Д.А.Вихляев, Д.С.Гаврилов, А.Г.Какшин, А.В.Потапов, К.В.Сафронов. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забабихина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13; e-mail: dep5@vniitf.ru

Поступила в редакцию 10 февраля 2010 г., после доработки – 13 января 2011 г.

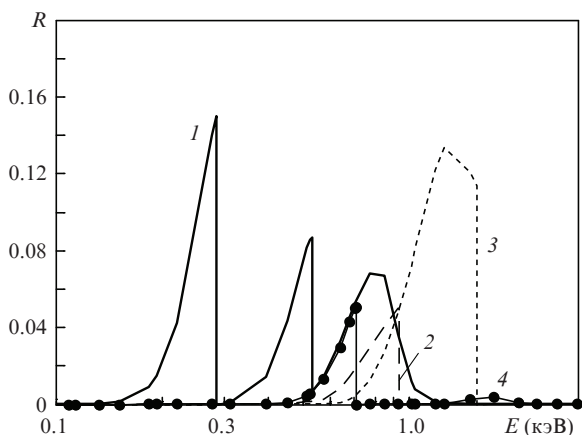


Рис.1. Спектральные функции пропускания каналов микроскопа, состоящих из двух SiO_2 -зеркал и $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ -фильтра толщиной 2 мкм (1), SiO_2 - и Mo-зеркал и Cu-фильтра толщиной 1 мкм (2), двух Mo-зеркал и Al-фильтра толщиной 5.4 мкм (3) и двух Ni-зеркал и Fe-фильтра толщиной 1.5 мкм (4).

Селекция рентгеновского излучения проводится с помощью зеркал микроскопа и рентгеновских фильтров. В интересующей нас области мягкого рентгеновского излучения наиболее подходящими материалами для зеркал являются SiO_2 , Ni, Mo и Au, т. к. у них нет скачков поглощения и они обладают хорошими отражательными характеристиками в данном диапазоне.

Обрезание спектра со стороны малых энергий квантов осуществляется рентгеновскими фильтрами. На рис. 1 показаны расчетные спектральные функции пропускания каналов микроскопа [10], представляющие собой произведение коэффициентов пропускания фильтров и отражения зеркал.

В рентгеновском микроскопе плотность почернения фотопленки при регистрации изображений зависит от нескольких факторов, в том числе и от углового размера входной апертуры канала. Минимальный угловой размер входной апертуры системы Киркпатрика-Баеза A_{\min} составляет $\sim 4.5 \times 10^{-6}$ ср. Такое значение соответствует дифракционной (наилучшей возможной) разрешающей способности $\delta_d = 2 - 0.4$ мкм ($E = 0.3 - 1.5$ кэВ). Для сравнения: угловой размер апертуры камеры-обскуры A_{obs} , применяемой в экспериментах на лазерной установке «Сокол-П», равен $\sim 10^{-7}$ ср. С такой апертурой камера-обскура позволяет получать изображения плазмы в рентгеновском диапазоне с хорошей плотностью почернения фотопленки. Поскольку в рентгеновском микроскопе, в отличие от камеры-обскуры, имеются зеркала, ослабляющие в три-пять раз поток квантов с энергиями $E > 0.8$ кэВ, входная апертура канала микроскопа должна быть больше A_{obs} в пять раз. В нашем случае A_{\min} превышает A_{obs} в 50 раз, что позволяет уверенно регистрировать изображения светящейся области мишени. Начальные параметры для расчета рентгеновского микроскопа приведены ниже.

Расстояние от мишени до первого зеркала a (мм)	50
Расстояние между зеркалами Δ (мм)	6
Угол падения θ (град)	2
Коэффициент увеличения Γ	6-9
Разрешающая способность (в плоскости объекта) δ (мкм).	2
Длина волны регистрируемого излучения λ (Å)	8-45

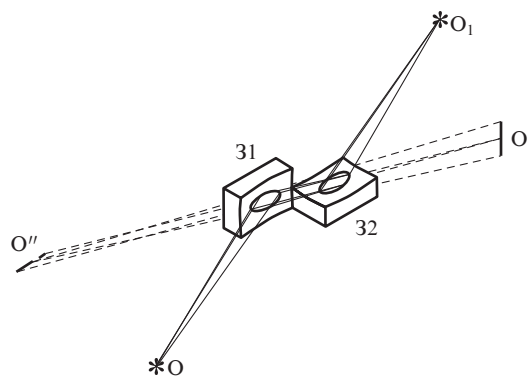


Рис.2. Схема рентгеновского микроскопа Киркпатрика и Баеза.

Расстояние a от мишени до первого зеркала было выбрано исходя из размеров лазерного пучка и возможности установки другой диагностической аппаратуры, а расстояние между зеркалами Δ (равное ширине зеркала или больше нее) предварительно оценивалось по A_{\min} .

Система из сферических зеркал со скрещенными плоскостями падения излучения, предложенная Киркпатриком и Баезом, представлена на рис.2. Зеркало 31 создает астигматическое изображение источника – меридиональное в точке O' и сагиттальное в точке O'' . Радиус кривизны и положение зеркала 32 должны быть такими, чтобы изображение в точке O' было сагиттальным, а в точке O'' – меридиональным для точки O_1 , в которой по закону обратимости достигается стигматическое изображение источника O [8].

Исходя из этого можно записать систему уравнений

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

где $f_{s1,s2} = R_{1,2}/(2 \sin \theta)$ и $f_{m1,m2} = (R_{1,2} \sin \theta)/2$ – сагиттальные и меридиональные фокусные расстояния соответственно; $R_{1,2}$ – радиусы кривизны зеркал; Γ_1 и Γ_2 – коэффициенты увеличения системы в сагиттальной и меридиональной плоскостях соответственно; b_{m1} и b_{s1} – расстояния от центра первого зеркала до точек O' и O'' соответственно.

Решая систему уравнений (1) и полагая в первом приближении $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma = 7$, получаем $R_1 \approx 2515$ мм, $R_2 \approx 2770$ мм. Инструментальная оснастка оптического участка позволяет изготовить из стекла К8 с поверхностной шероховатостью в единицы ангстрем ряд зеркал с радиусами, близкими к расчетным. С помощью габаритно-абберационного расчета в программном пакете OPAL-PC было определено, что зеркала с радиусами $R_1 = 2582$ мм, $R_2 = 2858$ мм из этого ряда обеспечивают наилучшую разрешающую способность микроскопа. Результаты расчета представлены ниже.

Ширина зеркала (мм)	4
Расстояние от мишени до центра первого зеркала a_1 (мм)	50
Расстояние от центра второго зеркала до регистратора b_2 (мм)	450
Входная апертура (ср)	7×10^{-6}
Коэффициент увеличения в сагиттальной плоскости Γ_1	9
Коэффициент увеличения в меридиональной плоскости Γ_2	8.18
Разрешающая способность в центре поля объекта δ (мкм)	~ 1.5
Длина волны регистрируемого излучения λ (Å)	8–45

Входная апертура системы удовлетворяет поставленным выше ограничениям: она представляет собой прямоугольник размером 140×125 мкм (в центре первого зеркала). Коэффициент анаморфозы A , учитывающий различие в коэффициентах увеличения, составляет 1.1.

Одинаковая разрешающая способность δ для всего диапазона энергий квантов обусловлена аберрациями (кома и сферическая аберрация). 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 ~ 30 мкм рассчитанная разрешающая способность не хуже ~ 2 мкм.

3. Сборка рентгеновского микроскопа

Объектив рентгеновского микроскопа состоит из четырех оптически эквивалентных каналов [7], образованных двумя парами сферических зеркал (рис.3). Каждый канал объектива имеет свое отражающее покрытие (см. рис.1). Размещение соответствующих рентгеновских фильтров после зеркал позволяет одновременно за один лазерный импульс регистрировать изображения в четырех спектральных каналах. При угле падения $\theta = 2^\circ$ расстояние между поверхностями первой от объекта пары зеркал $2d_x = 3.5$ мм, а между поверхностями второй пары зеркал $2d_y = 3.9$ мм.

Сборка четырехканального объектива рентгеновского микроскопа выполнялась на оптическом стенде с помощью He-Ne-лазера 1 (рис.4). Световой пучок, пройдя

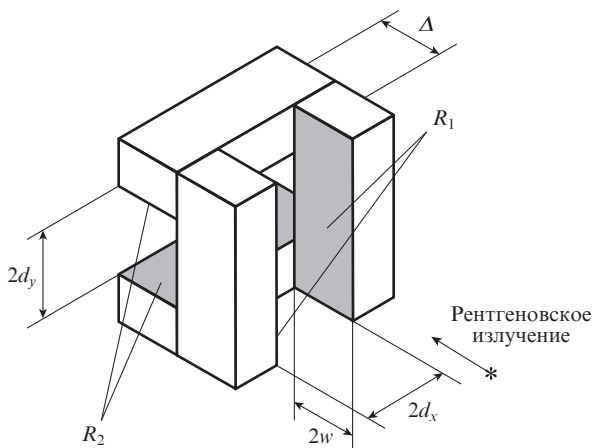


Рис.3. Четырехканальный объектив рентгеновского микроскопа.

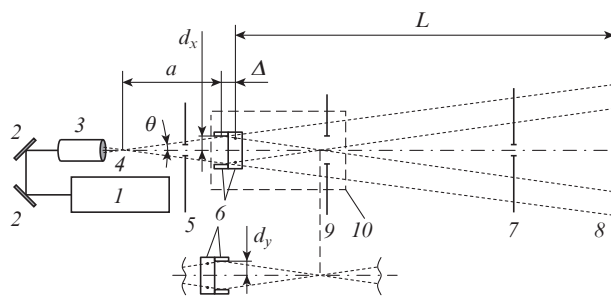


Рис.4. Схема оптического стенда для сборки четырехканального объектива рентгеновского микроскопа (обозначения см. в тексте).

через микрообъектив 3, фокусируется и далее расходится. Угол раствора расходящегося пучка должен быть больше $2\sqrt{2}\theta$. Диаметр перетяжки 4 составляет единицы микрометров, поэтому ее можно считать точечным объектом. Положение перетяжки 4 в плоскости объекта, а также направление расходящегося пучка регулируются поворотными зеркалами 2. Взаимное расположение зеркал 6 микроскопа в процессе сборки контролируется с помощью экрана 8, который устанавливается на большом расстоянии L от микроскопа (в нашем случае $L = 1$ м). Предварительно на экран 8 наносились реперные линии, обозначающие положение лучей, прошедших без отражения и отраженных от зеркал.

Одно из основных условий корректной работы рентгеновского микроскопа заключается в прохождении его оси через центр фокального пятна на мишени. Положение оси микроскопа относительно центра фокального пятна определяется жесткой диафрагмой 9. Направление оси микроскопа может быть задано вспомогательным зеркалом, установленным перпендикулярно ей. Вспомогательное полупрозрачное зеркало временно устанавливается на юсти-

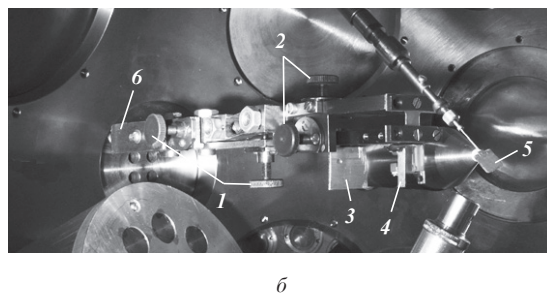
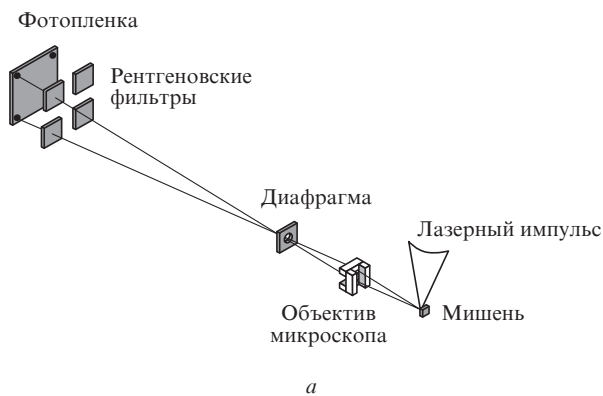


Рис.5. Схема (а) и фотография (б) рентгеновского микроскопа: 1, 2 – юстировочные винты; 3 – диафрагма; 4 – четырехканальный объектив рентгеновского микроскопа; 5 – мишень; 6 – кронштейн.

ровочном столике 10 между зеркалами 6 микроскопа и жесткой диафрагмой 9. Для этого удаляется микрообъектив 3 и с помощью зеркал 2 лазерный пучок направляется по оси микроскопа через центры диафрагм 5, 7 и 9.

В диагностическую камеру вводится опорный лазерный пучок, проходящий через центры фокального пятна и крепежного фланца микроскопа. После этого микроскоп устанавливается в камеру (рис.5). Крепежная конструкция обеспечивает два поперечных перемещения винтами 1, два угловых перемещения винтами 2, а также линейное перемещение (регулировку расстояния a) вдоль оси микроскопа в пазах кронштейна 6. С помощью юстировочных винтов 1 и 2 ось микроскопа совмещается с осью опорного лазерного пучка. Вспомогательное зеркало удаляется. Таким образом, достигается предварительная юстировка рентгеновского микроскопа.

Окончательная юстировка микроскопа выполняется с контролем симметрии картины на юстировочном экране винтами 1. Для этого в микроскоп направляется лазерный пучок, расходящийся из центра фокального пятна. В качестве мишени используется зеркало, отражающее фокусирующийся на его поверхности юстировочный пучок в рентгеновский микроскоп.

4. Экспериментальное определение разрешающей способности микроскопа

Для корректной обработки изображений, полученных с помощью микроскопа, необходимо знать его разрешающую способность. Измерение данной характеристики на стационарной рентгеновской установке КРУС-УКРОП [11] (как в работе [7]) некорректно из-за существенной зависимости ее от точности юстировки. Измерения на той же установке позволят определить наилучшую разрешающую способность, которая может отличаться от реальной в несколько раз. Поэтому необходимо измерять разрешающую способность микроскопа на лазерной установке «Сокол-П» в его рабочем положении.

Разрешающая способность микроскопа была измерена следующим образом. В одной из серий экспериментов на лазерной установке «Сокол-П» использовались мишени, конструкция которых представлена на рис.6. Мишень была изготовлена из алюминиевой фольги 2, приклеенной к медной оправке 1. Видно, что рентгеновский микроскоп 4 не полностью «видит» излучающую область мишени 3, т. к. часть ее затеняется медной оправкой. По резкому краю изображения излучающей области можно определить разрешающую способность микроскопа. Изображе-

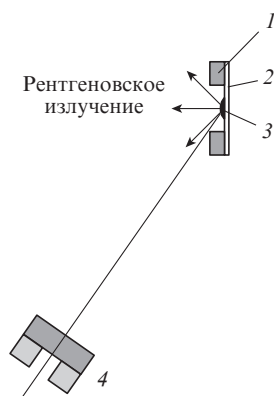


Рис.6. Схема эксперимента (обозначения см. в тексте).

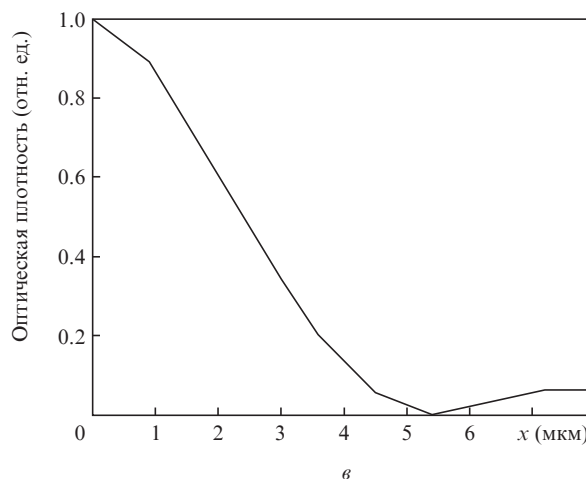
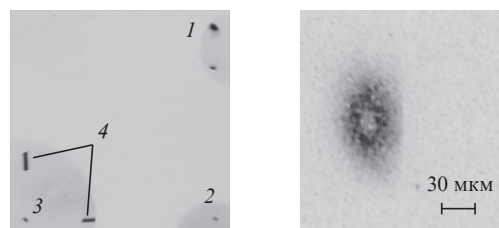


Рис.7. Изображения излучающей области мишени в каналах с энергией квантов 0.3 (1), 0.9 (2) и 1.5 кэВ (3) (а), увеличенное изображение в канале 3 (б) и денситограмма резкого края изображения на рис.7,б (в); 4 – линии, соответствующие однократному отражению от зеркал.

ние, полученное на фотопленке Agfa Structurix D7 FW в одном из экспериментов, приведено на рис.7,а. На рис.7,б и в представлены изображение излучающей области мишени и денситограмма его резкого края (пограничная кривая).

Расстояние в плоскости объекта, соответствующее спаду пограничной кривой (рис.7,в), составляет ~ 5 мкм. Габаритно-абберационный расчет для точки объекта, находящейся на расстоянии 30 мкм от его центра (рис.7,б), показывает, что данная характеристика пограничной кривой также составляет 5 мкм. Это отвечает расчетной разрешающей способности микроскопа $\delta \approx 2$ мкм. Следовательно, реальная разрешающая способность микроскопа также не хуже 2 мкм.

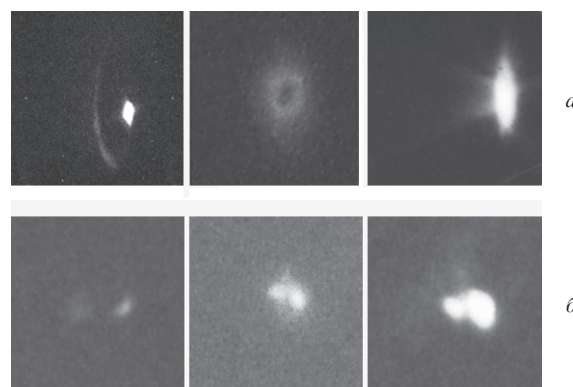


Рис.8. Изображения излучающей области различных мишеней, полученные с помощью рентгеновского микроскопа (а) и камеры-обскуры (б).

Для сравнения: на рис.8 приведены изображения излучающей области мишени (в диапазоне энергий ~ 1.5 кэВ), полученные с помощью рентгеновского микроскопа и камеры-обскуры (диаметр отверстия ~ 4 мкм). Видно, что рентгеновский микроскоп позволяет получать более четкие изображения, чем камера-обскура.

5. Заключение

Для регистрации двумерных изображений излучающей области лазерных мишеней на установке «Сокол-П» был изготовлен рентгеновский микроскоп по схеме Киркпатрика–Баеза. С помощью этого микроскопа можно регистрировать изображения с девятикратным увеличением. Наряду с зеркалами используются рентгеновские фильтры, что дает возможность одновременно получать изображения в четырех узких областях из рентгеновского диапазона 0.3–1.5 кэВ. Экспериментально определена разрешающая способность микроскопа $\delta \approx 2$ мкм на краю изображения, которое совпало с расчетным. Расчетная раз-

решающая способность микроскопа в центре изображения составляет ~ 1.5 мкм. Таким образом, рентгеновский микроскоп позволит проводить исследования плазмы с высоким пространственным разрешением.

1. Key M.H., Eidman K., Dorn C. *Phys. Lett. A*, **48**, 121 (1974).
2. Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Крохин О.Н. и др. *ЖЭТФ*, **70**, 574 (1976).
3. Koch J.A., Landen O.L., Barbee T.W., et al. *Appl. Opt.*, **37**, 1784 (1998).
4. Бойко В.А., Пикуз С.А., Фаенов А.Я. *ПТЭ*, №2, 5 (1980).
5. Ландсберг Г.С. *Оптика* (М.: Физматлит, 2003).
6. Kirkpatrick P., Baez A.V. *J. Opt. Soc. Am.*, **38** (9), 766 (1948).
7. Сьюард Ф., Дент Ж., Бойл М. и др. *Приборы для научных исследований*, №4, 63 (1976).
8. Виноградов А.В., Брытов И.А., Грудский А.Я. и др. *Зеркальная рентгеновская оптика* (Л.: Машиностроение, 1989).
9. Andriyash A.V., Vikhlyaev D.A., Gavrilov D.S., et al. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **53** (14), 153 (2008).
10. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* (Orlando: Academic Press, Inc., № 2, 1993).
11. Осташев В.И. *Эффект шепчущей галереи в экспериментах с пучками МРИ* (Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2008).