

Особенности диагностики качества вогнутых сферических поверхностей скольльзящим рентгеновским пучком

© И.В. Якимчук¹, А.В. Бузмаков¹, А.В. Андреев², В.Е. Асадчиков¹

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН,
119333 Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
e-mail: yaivan@list.ru

(Поступило в Редакцию 10 апреля 2013 г.)

В работе рассмотрены особенности подхода к диагностике качества вогнутых сферических поверхностей скольльзящим рентгеновским пучком. Проведена оценка погрешности рассматриваемого диагностического подхода как в определении положения дефектов, так и их размеров. Существенно модифицирован алгебраический метод реконструкции экспериментальных данных для получения поверхностного распределения дефектов, ослабляющих скольльзящий пучок. Проведено сопоставление использованных алгоритмов реконструкции.

Введение

Контроль качества больших вогнутых поверхностей до сих пор является весьма серьезной проблемой. При превышении некоторых значений радиуса кривизны и/или характерного размера поверхности данная задача становится трудно разрешимой и дорогостоящей при использовании известных методов [1,2]. Крупные вогнутые зеркала диаметром более 5 м все чаще используются в современной астрономии. За последние годы в мире введено в эксплуатацию более десятка крупных телескопов, среди которых многие имеют диаметры главных зеркал 8–10 м. Современные астрономические исследования требуют создания еще больших наземных телескопов нового поколения с главными зеркалами диаметром от 10 до 100 м [1].

В работах [3,4] нами впервые был предложен подход для исследования качества таких зеркал, основанный на использовании эффекта шепчущей галереи в жестком диапазоне рентгеновского излучения. Эффект шепчущей галереи состоит в том, что акустическая или электромагнитная волна, падающая по касательной на вогнутую поверхность, „скользит“ вдоль нее за счет последовательных отражений. Теоретические и экспериментальные исследования шепчущей галереи в рентгеновском диапазоне длин волн рассмотрены, например, в [5–11]. В этих работах для упрощения рассматривались лишь цилиндрические поверхности. В [12] детально исследован эффект на вогнутой сферической поверхности. Показано, что с экспериментальной точки зрения работать с вогнутой сферической поверхностью даже проще.

Отметим также возможность наблюдения и применения этого эффекта при использовании потоков нейтронов [13,14].

Одно из преимуществ метода, основанного на эффекте шепчущей галереи, по сравнению с уже существующими сканирующими методами заключается в том, что сколь-

льзящий вдоль поверхности рентгеновский пучок позволяет исследовать ее целиком, а эффективность поворота пучка при этом не зависит от размера поверхности.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей этого подхода. Коротко напомним его суть. При определенном взаимном расположении поверхности зеркала и источника излучения рентгеновский пучок, распространяющийся в режиме шепчущей галереи, существует лишь в тонком приповерхностном слое, а его проекция на сферическую поверхность представляет собой полосу, проходящую через центр зеркала. В том случае, когда на пути падающего пучка имеется дефект поверхности, распределение интенсивности отраженного пучка будет иметь соответствующий локальный минимум. Таким образом, окончательно отразившись от зеркала, пучок будет „содержать“ в себе информацию о качестве той части сферической поверхности, вдоль которой он распространялся. Зарегистрировав подобно методу томографии последовательность пространственных распределений интенсивности многократно отраженного от вогнутой поверхности пучка, получаемых для различных углов вращения зеркала относительно оси его симметрии, и проведя последующую процедуру реконструкции этих данных, удается восстановить распределение локальных коэффициентов ослабления K скользкого рентгеновского пучка на исследуемой поверхности. Из этого распределения несложно определить пространственное положение и размеры дефектных областей на поверхности зеркала. Отметим, что в роли исследуемых „дефектов“ могут быть и нанесенные на поверхность объекты (например, маска для фотолитографии). В настоящей работе представлены результаты исследований, уточняющих возможности данного метода. Была экспериментально определена высота зондирующего скользкого пучка над облучаемой поверхностью, проведена оценка точностей метода. Кроме того, в работе рассмотрен вопрос реконструкции экспериментальных данных.

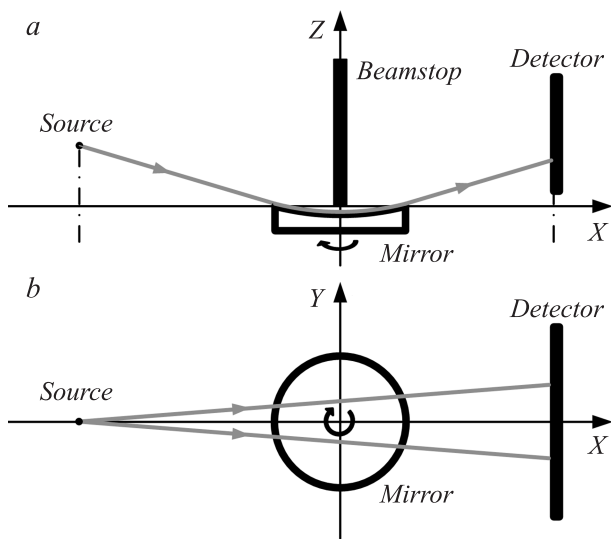


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *a* — вид сбоку, *b* — вид сверху.

Исследование чувствительности подхода

Схема установки, используемой для проведения рассматриваемых исследований, представлена на рис. 1. В качестве источника использовалась рентгеновская трубка с молибденовым анодом и точечным фокусом ($0.4 \times 0.4 \text{ mm}$), характеристическая линия не возбуждалась. Детальное описание экспериментальной установки приведено в [3].

Сферическое зеркало было изготовлено из плавленного кварца методом глубокой шлифовки и полировки. Его радиус кривизны — 25 см, диаметр — 6 см.

Нами были проведены исследования чувствительности подхода к локальным изменениям оптической плотности и наличию малых дефектов на поверхности, а также изучен вопрос влияния алгоритма реконструкции на качество получаемых данных.

На рис. 2 показана реконструкция отпечатка пальца, сделанного в центре зеркала. На реконструкции отчетливо видны папиллярные линии (рис. 2, *b*). Расстояния между папиллярными линиями, измеренные по результатам реконструкции, находятся в диапазоне от 0.2 до 0.5 mm, что совпадает с прямыми измерениями. Отметим, что дополнительные контрастирующие вещества при создании отпечатка не использовались, а изображение, по всей видимости, формировалось тонким слоем жира. Линейный коэффициент поглощения жира имеет значения от 0.0002 до $0.003 \mu\text{m}^{-1}$ в использованном диапазоне длин волн от 0.12 до 0.3 nm [15]. Для сравнения, линейный коэффициент поглощения кварцевой подложки в $\sim 10^5$ раз выше и составляет от 20 до $200 \mu\text{m}^{-1}$.

Отметим также, что при наличии пленки жира толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ на поверхности зеркала относительное изменение коэффициента отражения в области полного внешнего отражения составляет не более 2%.

По этим причинам увидеть такой слабо поглощающий объект за счет абсорбционного контраста в классической радиографии и рефлектометрии практически невозможно.

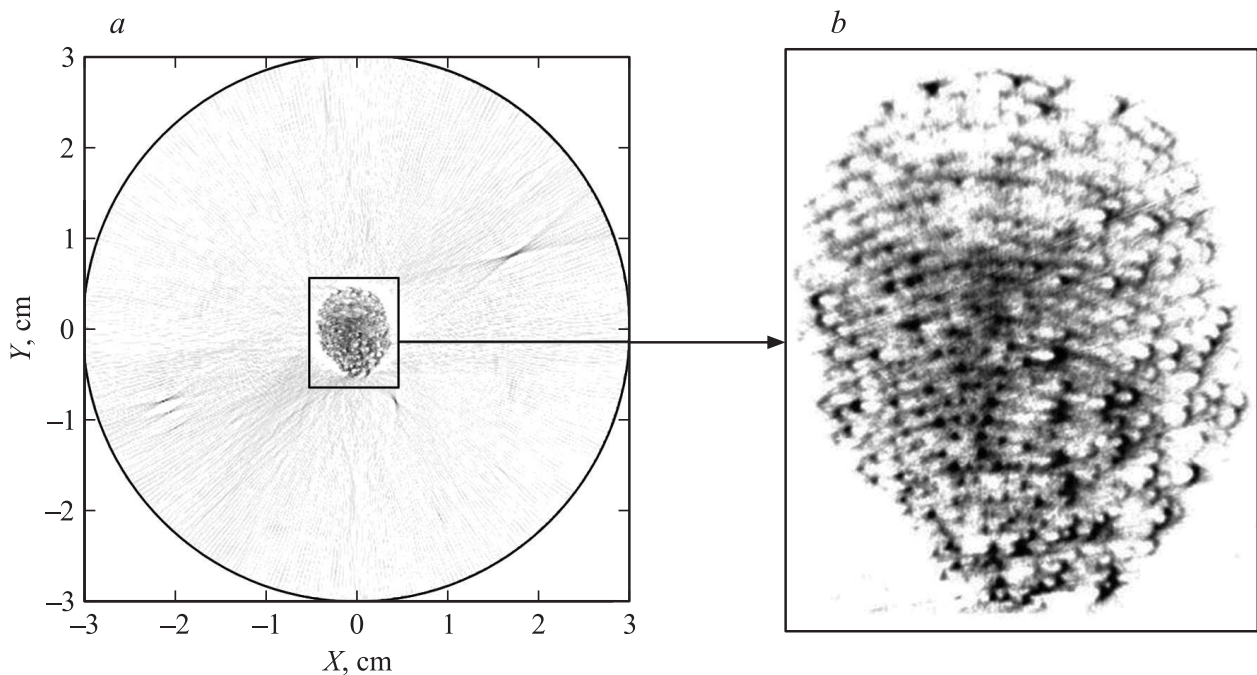


Рис. 2. *a* — реконструкция зеркала с отпечатком пальца, *b* — увеличенное изображение отпечатка пальца. Степень почернения пропорциональна ослаблению пучка.

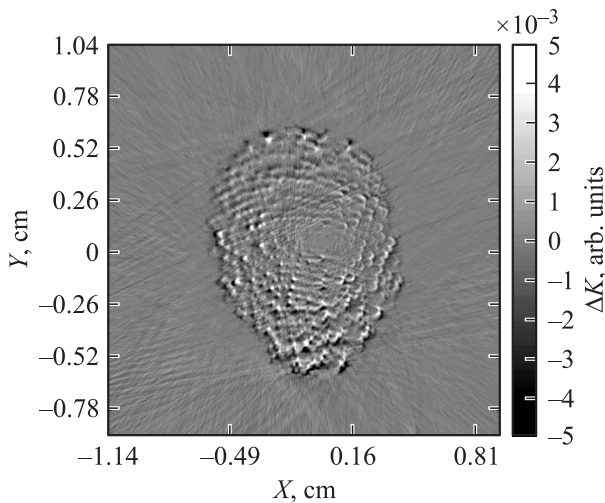


Рис. 3. Разность реконструкций отпечатка пальца, полученных в приближении параллельного пучка и с учетом реальных траекторий.

Особенности реконструкции экспериментальных данных

В [16] отмечен ряд особенностей, отличающих данный метод от традиционной томографии. В частности, зондирующий пучок не является ни параллельным, ни коническим. Тем не менее, геометрия эксперимента такова, что приближение параллельного пучка может оказаться приемлемым. При восстановлении отпечатка пальца мы использовали алгебраический метод реконструкции [17] томографических данных в приближении параллельного пучка. В то же время не составляет труда аналитически определить траектории зондирующих лучей на поверхности зеркала в приближении точечного источника, и провести процедуру реконструкции с их учетом. С целью сравнения особенностей этих методов восстановления на рис. 3 показана разность результатов реконструкций.

Видим, что приближение параллельного пучка привело к пространственным искажениям в поверхностном распределении значений коэффициентов ослабления. Возникшие отклонения в положениях дефектов малы в центре поверхности. Так, в области детектированного отпечатка пальца (рис 3) они не превосходят $300 \mu\text{m}$. По мере удаления дефектов от центра зеркала наблюдаются увеличивающиеся искажения в определении их места расположения, обусловленные использованием схемы реконструкции с параллельным пучком. Эти искажения могут достигать значений, близких к 2mm , если дефекты расположены на краю рассматриваемого образца. Отметим, что отличия в самих значениях коэффициентов ослабления на дефектах не превышали 10%.

Существенно, что время, затрачиваемое на процедуру реконструкции с учетом реальных траекторий, возросло в ~ 240 раз. Таким образом, с помощью приближения

параллельного пучка можно достаточно быстро осуществить процедуру реконструкции, дав качественную оценку состоянию зеркала. Для более точных результатов полезно учитывать реальную геометрию пучка.

Измерение высоты зондирующего пучка

Важную роль при формировании пучка, окончательно отразившегося от вогнутой поверхности, играет высота h_{eff} приповерхностного поля зондирующего пучка. Согласно теоретическим оценкам [10], в рассматриваемом случае эта величина составляет $\sim 1.7 \mu\text{m}$.

В настоящей работе оценка эффективной высоты h_{eff} осуществлена экспериментально. С этой целью была проведена серия экспериментов с металлическими шариками разного диаметра (от 1.6 до 23 mm), расположенных в центре зеркала. В идеальном случае все они

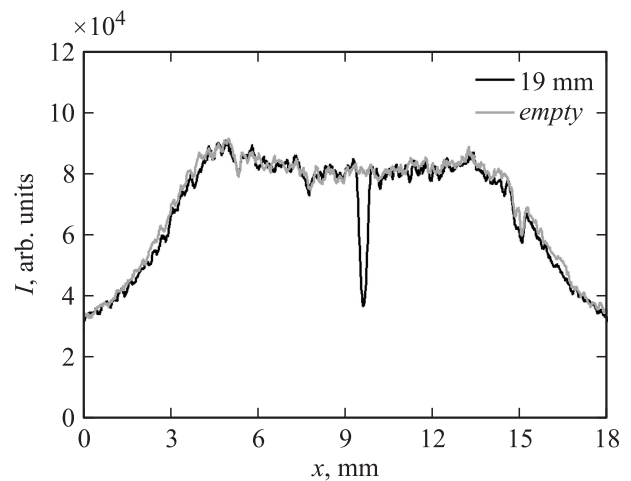


Рис. 4. Распределение интенсивности отраженного пучка при помещении шарика диаметром 19 mm в центр зеркала и без него.

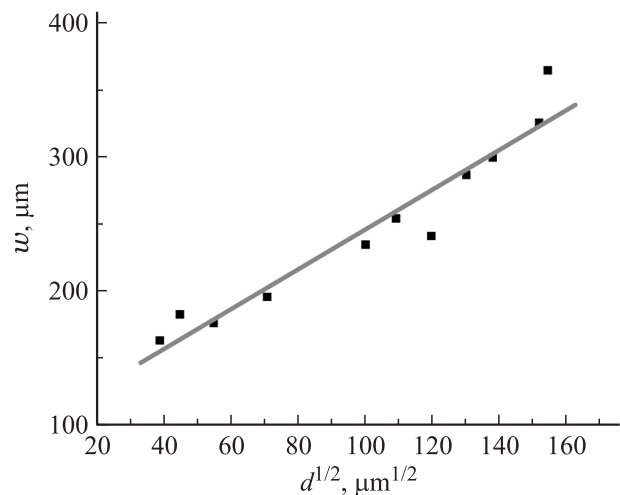


Рис. 5. Зависимость $w(d^{1/2})$ и ее линейная аппроксимация.

касаются вогнутой поверхности лишь в одной точке. Однако, поскольку скользящий пучок имеет конечную высоту h_{eff} , на детекторе будут наблюдаться минимумы в распределении интенсивности (см. рис. 4) с конечной шириной, зависящей от диаметра шариков

$$w \approx 2(h_{\text{eff}}d)^{1/2}.$$

Видим (рис. 5), что измеренная величина $w(d^{1/2})$ с достаточной степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью (коэффициент детерминации $R^2 = 0.925$), из которой можно оценить искомую величину h_{eff} . Отметим, что зависимость тем больше отличается от линейной, чем тяжелее шарик. Это может быть объяснено деформацией поверхности.

Полученное значение высоты поля над поверхностью составило $\sim 2 \mu\text{m}$, что хорошо согласуется со сделанными ранее теоретическими оценками.

Анализ пространственных искажений

Далее нами были изучены вопросы точности восстановления линейных размеров. Для этого вместо шариков на поверхность зеркала помещались винты полукруглой головкой вниз с прямым либо крестообразным шлицем. В этом случае рассматриваемым методом должны быть обнаружены 2 или 4 точки касания. Расстояния между ними могут быть измерены как на реконструкции, так и прямым способом (например, с помощью штангенциркуля). Увеличенная центральная часть реконструкций, соответствующая области касания винтами поверхности, представлена на рис. 6.

Заметим, что касание крестообразного винта произошло лишь в трех точках, вероятно, вследствие несовершенной формы головки винта. Измеренные расстояния указаны в подписи к рис. 6. Видим, что отклонения в линейных размерах объекта, расположенного в центре зеркала, не превосходят $50 \mu\text{m}$.

Отдельный интерес представляет исследование возможностей рассматриваемого подхода по обнаружению

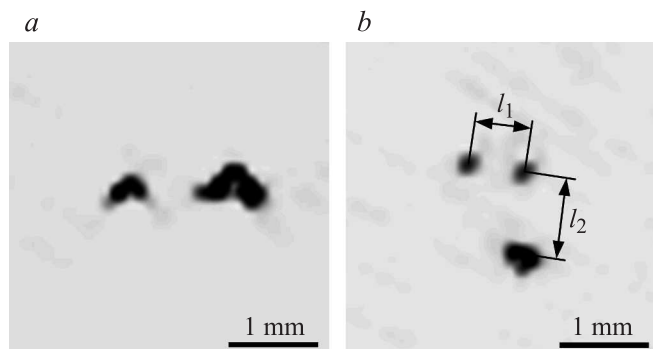


Рис. 6. Области контакта поверхности и винта с прямым (а) и крестообразным (б) шлицем. Измеренные штангенциркулем размеры шлицов: а — 1.20 mm, б — $l_1 = 0.80$, $l_2 = 1.00$ mm; по результатам реконструкции: а — 1.22 mm, б — $l_1 = 0.85$, $l_2 = 0.97$ mm.

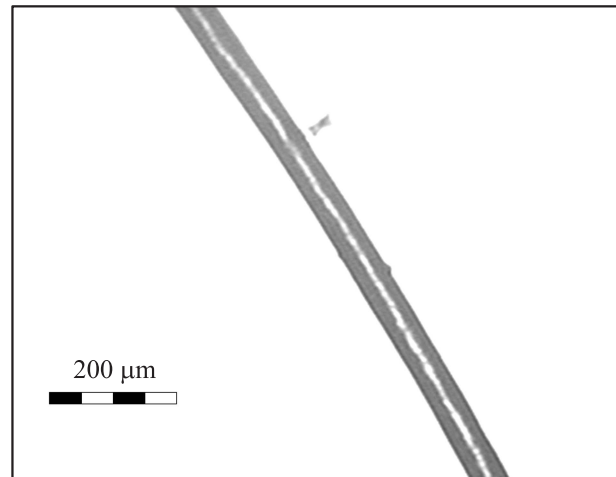


Рис. 7. Фотография волоса в оптическом микроскопе.

дефектов с линейными размерами, близкими к разрешению детектора ($13 \mu\text{m}$). Для решения этой задачи мы использовали человеческий волос, расположенный на поверхности зеркала. Его толщина, измеренная в оптическом микроскопе (рис. 7), составила $\sim 60 \mu\text{m}$. Напомним, что высота h_{eff} распространяющегося над поверхностью пучка в режиме шепчущей галереи составляет всего лишь $\sim 2 \mu\text{m}$ для зеркала из плавленого кварца в используемом диапазоне длин волн (0.12–0.3 nm). По этой причине скользящий пучок должен быть ослаблен волосом лишь в тех областях, в которых волос отстоит от сферической поверхности не более чем на это расстояние. Очевидно, что такими областями будут являться окрестности точек касания поверхности. Перед проведением эксперимента мы убедились, что волос касается сферической поверхности зеркала в районе ее центра. На реконструкции (рис. 8, б) область касания волосом отчетливо выделяется на фоне остальных дефектов и артефактов реконструкции.

Таким образом, можно сказать, что пространственное разрешение метода в центре зеркала составляет $50 \mu\text{m}$ по порядку величины.

Заключение

Сформулируем основные выводы по имеющимся на сегодняшний день результатам:

- нами впервые показана возможность исследования качества вогнутых сферических поверхностей скользящим пучком жесткого рентгеновского излучения с определением местоположения и размеров дефектов или нанесенных объектов на анализируемую поверхность,
- показано, что предложенный нами подход обладает высокой чувствительностью к малым изменениям оптической плотности на поверхности,
- при исследовании поверхности вогнутого сферического зеркала из плавленого кварца (диаметром 6 см,

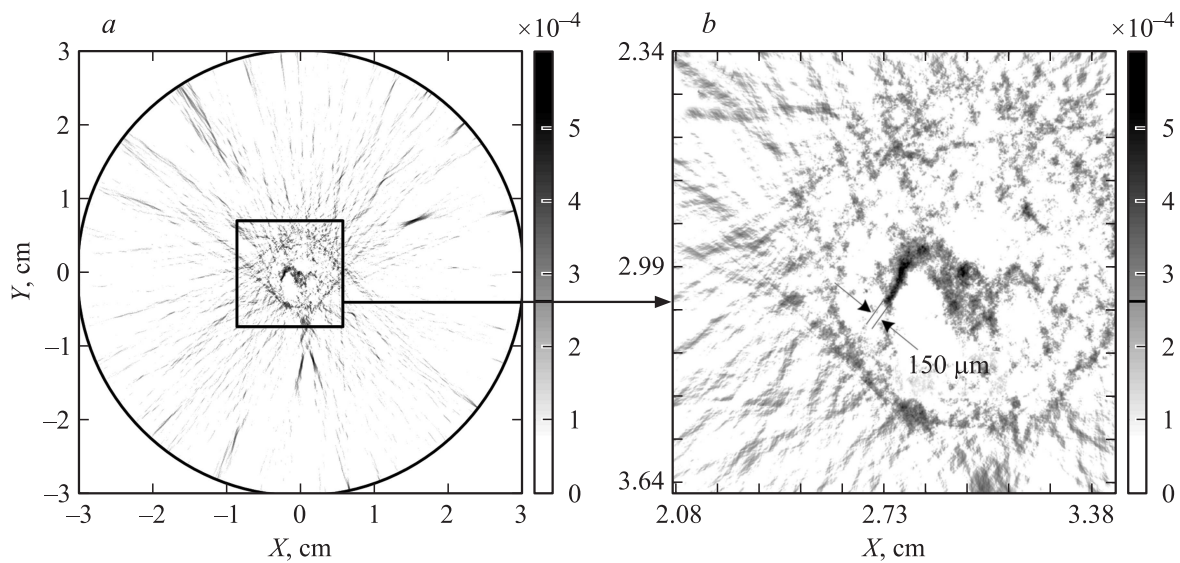


Рис. 8. *a* — реконструкция зеркала с волосом, *b* — увеличенная область касания волосом поверхности.

радиус кривизны 25 см) пространственное разрешение и точность данного подхода в центре поверхности составили не менее $50 \mu\text{m}$,

— использование приближения параллельного пучка существенно (в ~ 240 раз) сокращает время реконструкции, привнося незначительные пространственные искажения в распределение локальных коэффициентов ослабления.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИК РАН при поддержке Минобрнауки.

Список литературы

- [1] Автореф. канд. дис. Дружин В.В. Методы измерения и контроля формы выпуклых асферических зеркал оптических телескопов. М., 2008. 120 с.
- [2] Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Игнатов А.Н. и др. // <http://lzoz.ru/content/view/216/5/>
- [3] Якимчук И.В., Бузмаков А.В., Андреев А.В., Асадчиков В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. Вып. 9. С. 738–741.
- [4] Якимчук И.В., Бузмаков А.В., Андреев А.В., Асадчиков В.Е. // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 341–344.
- [5] Зеркальная рентгеновская оптика / Под ред. А.В. Виноградова. Л.: Машиностроение, 1989. 463 с.
- [6] Кожевников И.В. // Труды ФИАН. 1989. Т. 196. С. 143–167.
- [7] Оруджалиев М.Н., Бушуев В.А. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 2. С. 51–57.
- [8] Kaihola L. // Appl. Optics. 1981. Vol. 20. P. 1269–1270.
- [9] Chien L., Golovchenko J.A. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 79. N. 5. P. 788–791.
- [10] Bukreeva I.N., Kozhevnikov I.V. // Physica B. 1994. Vol. 198. P. 13–15.
- [11] Асадчиков В.Е., Букреева И.Н., Виноградов А.В. и др. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. С. 845–850.
- [12] Якимчук И.В., Роцин Б.С., Кожевников И.В. и др. // Кристаллография. 2008. Т. 53. № 6. С. 1111–1117.
- [13] Nesvizhevsky I.V., Voronin A.Yu., Cubitt R., Protasov K.V. // Nature Physics. 2010. Vol. 6. P. 114–117.
- [14] Несвижевский В.В. // УФН. 2010. Т. 180. № 7. С. 673–707.
- [15] CXRO X-ray Database—X-ray attenuation Length // http://henke.lbl.gov/optical_constants/atten2.html
- [16] Якимчук И.В., Бузмаков А.В., Андреев А.В., Асадчиков В.Е. // Современные методы анализа дифракционных данных. Тез. докл. Великий Новгород, 2011. С. 141–143.
- [17] Чукалина М.В., Бузмаков А.В., Николаев Д.П. и др. // Измерительная техника. 2008. № 2. С. 19–24.