

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОГНУТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЗЯЩИМ ПУЧКОМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. И. В. Якимчук<sup>1,2</sup>, А. В. Бузмаков<sup>1</sup>, А. В. Андреев<sup>2</sup>, В. Е. Асадчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт кристаллографии РАН, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: yaivan@list.ru

Поступила в редакцию 05.09.2011 г.

Впервые предложен и экспериментально реализован новый подход к исследованию качества вогнутых сферических поверхностей. Данный подход основан на эффекте шепчущей галереи в рентгеновском диапазоне длин волн. Отличительная особенность предлагаемой методики состоит в применении алгоритмов компьютерной томографии для локализации дефектов поверхности и описания их формы. Важно отметить, что размеры поверхностей и их радиус кривизны не являются ограничительными факторами для данных исследований.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ качества больших вогнутых поверхностей по сей день остается очень трудной задачей. В данной работе предложен новый подход к исследованию таких поверхностей, который основан на эффекте шепчущей галереи в рентгеновском диапазоне длин волн. Этот эффект состоит в том, что акустическая или электромагнитная волна, падающая по касательной на вогнутую поверхность, скользит вдоль нее за счет последовательных отражений. В [1–4] можно найти результаты теоретических исследований эффекта шепчущей галереи в рентгеновском диапазоне длин волн. Результаты экспериментальных исследований эффекта представлены в [5–11].

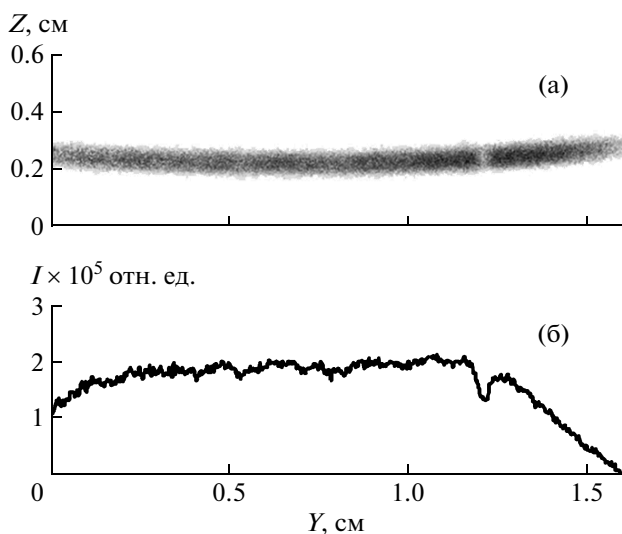
Идея использовать эффект шепчущей галереи для исследования шероховатости вогнутых поверхностей предложена в работах [12–14], в которых продемонстрировано влияние параметров поверхности на угловое распределение интенсивности в выходящем пучке. К таким параметрам относятся, в частности, среднеквадратичная высота шероховатости и вид корреляционной функции шероховатости. Но в [12–14] для упрощения рассматривались лишь вогнутые цилиндрические поверхности. В [15] показано, что с экспериментальной точки зрения наблюдать эффект шепчущей галереи на вогнутой сферической поверхности даже проще. При этом важным требованием является наличие широкого углового спектра источника. Кроме того, в этой работе детально проанализировано распространение рентгеновского пучка, скользящего вдоль вогнутой сферической поверхности, в зависимости от взаимного расположения источника и самой поверхности.

В настоящей работе показана возможность выявления дефектов на вогнутых сферических поверхностях с использованием эффекта шепчущей галереи в рентгеновском диапазоне длин волн. Важная особенность предлагаемого подхода – возможность определения положения и размера дефектов обработки на анализируемой поверхности. Далее качественно описаны рассматриваемый метод, а также результаты первых экспериментов, в которых исследовалось вогнутое сферическое зеркало.

### КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Суть предлагаемого подхода состоит в наблюдении эффекта шепчущей галереи на исследуемом сферическом зеркале при разных углах поворота зеркала вокруг собственной оси симметрии. Как было показано в [15], пучок, многократно отразившийся от вогнутой сферической поверхности, имеет поперечное сечение в виде сильно вытянутого в одном направлении пятна (рис. 1а). Характерная зависимость интенсивности в пятне вдоль этого направления (которую в дальнейшем назовем сечением) показана на рис. 1б. Видно, что на поверхности зеркала на пути распространения пучка имелись некоторые особенности (вероятно, обусловленные дефектами обработки поверхности), приводящие к локальному частичному ослаблению интенсивности в пучке. Очевидно, что при их смещении в другое место сферической поверхности локальный минимум в измеряемом распределении интенсивности также сместится

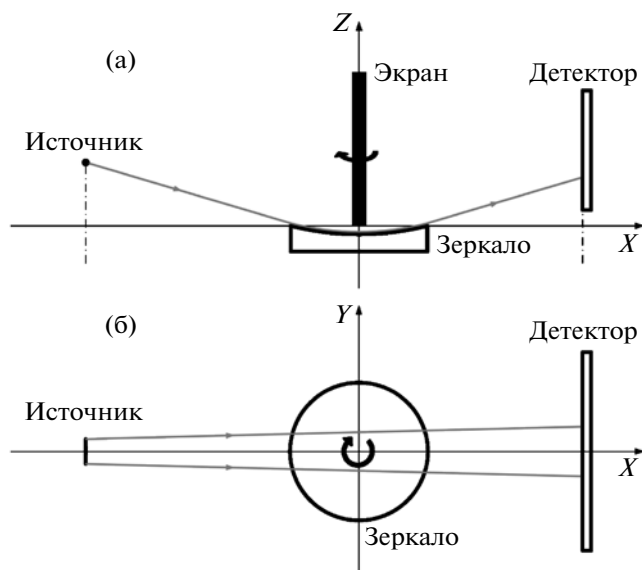
Эти предварительные результаты наводят на мысль о возможности определения расположе-



**Рис. 1.** Измеренная двумерным детектором интенсивность  $I$  выходящего пучка в относительных единицах: а – двумерное распределение (степень почернения пропорциональна интенсивности), б – сечение.

ния и размеров дефектов обработки вогнутой сферической поверхности при ее освещении скользящим рентгеновским пучком. Это можно реализовать, если скользящий пучок запускается на исследуемую поверхность с разных сторон, что достигается вращением сферического зеркала вокруг собственной оси симметрии при неподвижном источнике. Важно отметить, что при таком вращении зеркало непрерывно остается в условиях существования эффекта шепчущей галереи. Если бы зеркало обладало идеально ровной сферической поверхностью, то распределение интенсивности в выходящем пучке не изменялось бы при рассматриваемом вращении. Однако наличие на поверхности особенностей, ослабляющих интенсивность излучения, приводят к тому, что снимки, сделанные в разных угловых положениях, отличаются друг от друга по относительным положениям резких минимумов в распределении интенсивности. Получение набора таких сечений или теневых проекций (по аналогии с томографией) при различных угловых положениях зеркала позволяет решить обратную задачу и восстановить распределение дефектов на поверхности.

Таким образом, предложенный и реализованный подход к исследованию вогнутых сферических поверхностей во многом похож на томографию как с экспериментальной, так и с математической точек зрения. Он представляет собой серию измерений, соответствующих разным углам поворота зеркала вокруг его оптической оси, в каждом из которых регистрируется распределение интенсивности скользящего рентгеновского пучка на выходе из зеркала. По набору таких рас-

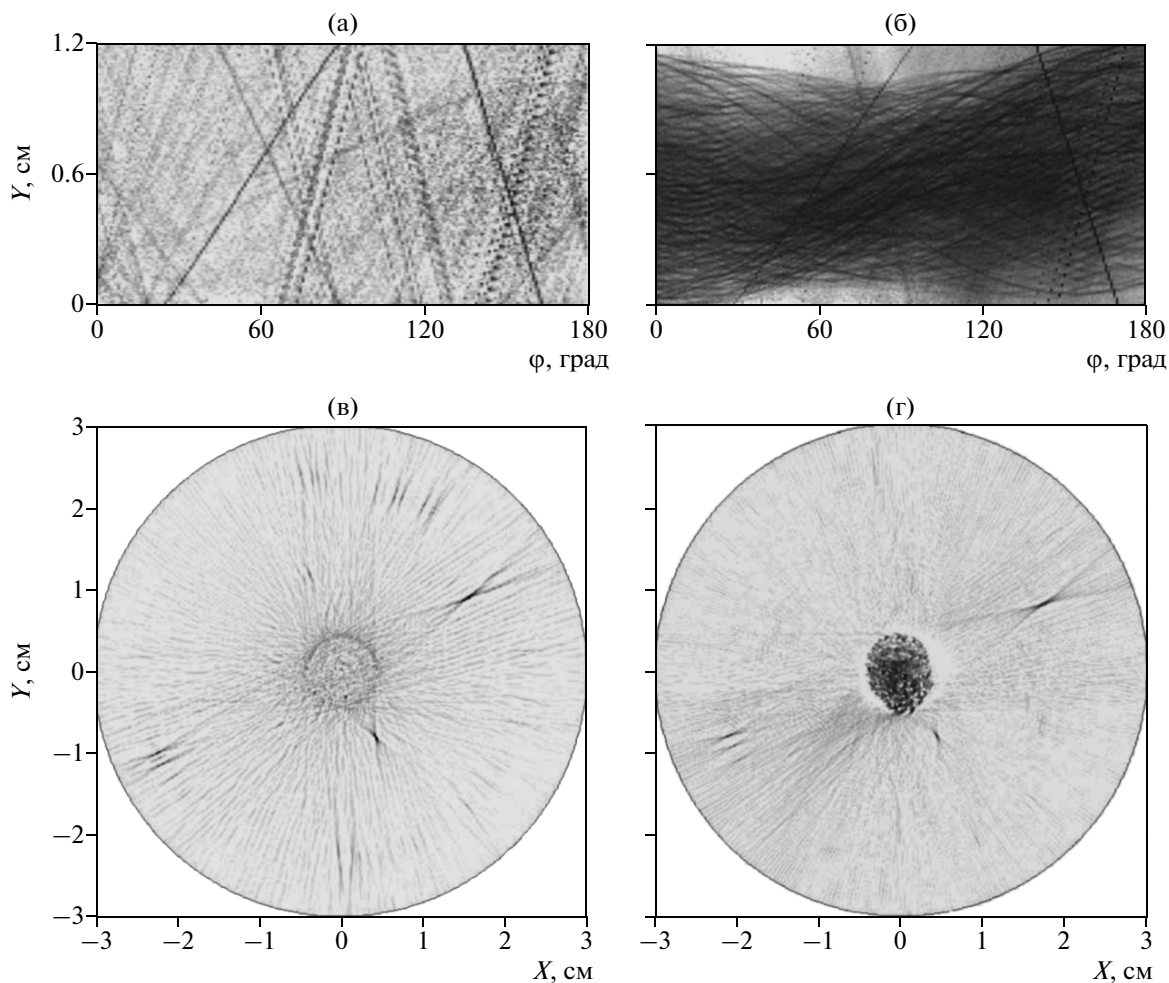


**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: вид сбоку (а), вид сверху (б).

пределений математически восстанавливается поверхностное распределение величины, характеризующей локальное ослабление пучка. Принципы работы различных алгоритмов восстановления подробно описаны в [16]. В нашей схеме геометрия пучка, зондирующего поверхность, является достаточно сложной. По этой причине использовались алгебраические методы реконструкции, которые активно развиваются в последнее время [17].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В качестве источника использовалась рентгеновская трубка с молибденовым анодом и точечным фокусом ( $0.4 \times 0.4 \text{ мм}^2$ ). Для обеспечения широкого углового спектра пучка не использовались ни монохроматор, ни коллимирующие щели. Сферическое зеркало устанавливалось на автоматизированном гониометре таким образом, чтобы пучок всегда падал по касательной на ближайшую к источнику кромку зеркала, которое изготовлено из плавленого кварца методом глубокой шлифовки и полировки. Его радиус кривизны – 25, диаметр – 6 см. Отметим, что угол раствора зеркала, т.е. угол поворота пучка равен  $\psi \sim 13.8^\circ$ , что по расчетам соответствует среднему числу отражений  $\sim 60$ . Над зеркалом помещался поглощающий экран для исключения попадания прямого пучка в окно детектора. Крепление экрана осуществлялось так, чтобы при вращении зеркала во время эксперимента экран оставался неподвижным. Вплотную к задней кромке зеркала располагался двумерный де-



**Рис. 3.** Полученные результаты: а – синограмма чистого зеркала, б – синограмма зеркала с отпечатком пальца, в – реконструкция чистого зеркала, г – реконструкция зеркала с отпечатком пальца. Степень почернения пропорциональна ослаблению пучка.

тектор на основе ПЗС-матрицы, позволяющий регистрировать распределение интенсивности вышедшего после многократных отражений пучка. Детектор имел  $2048 \times 2048$  ячеек размером  $13 \times 13$  мкм<sup>2</sup>, а полная длина/ширина матрицы равна 26.6 мм. Управление детектором и гониометром проводилось автоматически, согласно заданной экспериментатором программе. Данная установка практически эквивалентна описанной в [155]. Принципиальное отличие состоит в возможности вращения зеркала вокруг собственной оси симметрии (оси  $Z$  на рис. 2).

Следует отметить, что выбор того или иного материала анода трубки не столь важен. Это связано с тем, что для наблюдения эффекта шепчущей галереи на сфере требуется широкий угловой спектр источника. Энергетический спектр пучка определялся спектром тормозного излучения (от  $\sim 1.2$  до  $\sim 3$  Å с максимумом в  $\sim 1.5$  Å). Характеристическая линия в эксперименте не возбуждалась.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Как было сказано, непосредственным результатом измерений является серия распределений интенсивности (сечений) пучка, прошедшего вдоль зеркала, полученных при разных угловых положениях зеркала (т.е. набор теневых проекций). Этот набор одномерных распределений удобно объединить в одно двумерное, которое отражает зависимость теневых проекций от угла поворота зеркала  $\varphi$ . Такое представление экспериментальных результатов в томографии принято называть синограммой.

Реконструкция экспериментальных данных позволяет получить распределение коэффициентов ослабления на исследуемой сферической поверхности. Для наглядности будем отображать эти поверхностные распределения в проекции на плоскость  $XY$  (рис. 3).

Первый эксперимент состоял в исследовании поверхности зеркала без искусственно созданных

областей, ослабляющих пучок. На рис. 3а, 3в показаны результаты этого эксперимента и его реконструкции. Последующие эксперименты с различными искусственно нанесенными на поверхность особенностями показали высокую чувствительность метода к различным особенностям поверхности. Подтверждением сказанного могут служить неожиданные результаты – реконструкция отпечатка пальца (рис. 3г), сделанного в центре зеркала. На реконструкции отчетливо видны папиллярные линии. Отметим, что при создании отпечатка никаких контрастирующих веществ не использовалось.

Обратим внимание на тот факт, что на обеих реконструкциях в одних и тех же местах прослеживаются механические дефекты поверхности зеркала, не исчезающие после простой очистки поверхности.

Достигнутое на данный момент пространственное разрешение вдоль поверхности составляет около 50 мкм. Факт локального выявления дефектов на зеркальных поверхностях с помощью предлагаемой методики сомнений не вызывает. Несмотря на определенные трудности, полученные результаты демонстрируют перспективность разрабатываемого подхода для анализа качества крупногабаритных вогнутых зеркал.

Авторы выражают благодарность И.В. Кожевникову за обсуждение результатов, ценные советы и замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.В.* Зеркальная рентгеновская оптика. Л.: Машиностроение, 1989.
2. *Кожевников И.В.* // Тр. ФИАН. 1989. Т. 196. С. 143.
3. *Bukreeva I.N., Kozhevnikov I.V., Vinogradov A.V.* // J. X-Ray Sci. Technol. 1995. V. 5. P. 396.
4. *Оруджалиев М.Н., Бушуев В.А.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 51.
5. *Kaiholo L.* // Appl. Optics. 1981. V. 20. P. 1269.
6. *Виноградов А.В., Елинсон В.М., Жилина В.И. и др.* // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. С. 594.
7. *Виноградов А.В., Елинсон В.М., Кожевников И.В. и др.* // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 67. С. 206.
8. *Aleksandrov Yu.M., Bukreeva I.N., Vinogradov A.V. et al.* // J. Sov. Laser Res. 1992. V. 13. P. 400.
9. *Ostashev V.I., Asadchikov V.E., Bukreeva I.N. et al.* // Opt. Commun. 1998. V. 155. P. 17.
10. *Аркадьев В.А., Кумахов М.А.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. Т. 10. С. 25.
11. *Chien L., Golovchenko J.A.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 788.
12. *Bukreeva I.N., Kozhevnikov I.V.* // Physica. B. 1994. V. 198. P. 13.
13. *Асадчиков В.Е., Букреева И.Н., Виноградов А.В. и др.* // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. С. 845.
14. *Bukreeva I.N., Asadchikov V.E., Gilev O.N. et al.* // Proc. SPIE. 1999. V. 3739. P. 395.
15. *Якимчук И.В., Рошин Б.С., Кожевников И.В. и др.* // Кристаллография. 2008. Т. 53. С. 1111.
16. *Kak A.C., Slaney M.* Principles of Computerized Tomographic imaging. IEEE New York: Press, 1988.
17. *Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А. и др.* // Материалы рабочего совещ. "Рентгеновская оптика-2010". Черногоровка, 2010. С. 168.