

Рентгеновское томографическое изображение депозита на сферической поверхности

И. В. Якимчук^{+*1)}, А. В. Бузмаков⁺, А. В. Андреев^{*}, В. Е. Асадчиков⁺¹⁾

⁺Институт кристаллографии им. Шубникова РАН, 119333 Москва, Россия

^{*}Физический факультет МГУ им. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 сентября 2011 г.

Настоящая работа посвящена развитию метода получения двумерных рентгеновских томографических изображений депозитных объектов, находящихся на изогнутых зеркально отражающих поверхностях. Предложена и экспериментально реализована методика, позволившая получить двумерное рентгеновское изображение объекта (отпечатка пальца), находящегося на поверхности сферического зеркала. Разработаны математические алгоритмы реконструкции изображений.

1. Традиционные методы рентгеновской томографии основаны на измерении абсорбционного или рефракционного контраста, обусловленного внутренним строением объекта. Однако если объект находится на непрозрачной или сильно поглощающей подложке, то традиционные методы оказываются неприменимыми. Если подложка является плоской, можно в принципе реконструировать традиционную схему и производить измерения не в прошедшем, а в отраженном пучке. При изогнутых поверхностях подложки задача становится гораздо более сложной и в общем случае практически неразрешимой. Исключение составляют, по-видимому, лишь цилиндрические и сферические поверхности, отражательные свойства которых достаточно хорошо изучены [1–12]. Следует отметить, что последние два случая представляют наибольший практический интерес, поскольку принципы создания фокусирующих элементов рентгеновской оптики основаны на использовании отражения от указанных поверхностей. С математической точки зрения эти два случая являются выделенными, поскольку существуют строгие аналитические решения задачи дифракции электромагнитного излучения на цилиндре и сфере. Моды шепчущей галереи, распространяющиеся на значительные расстояния вдоль вогнутых цилиндрических и сферических поверхностей, нашли широкое применение в плане исследования качества соответствующих зеркал, позволяя из измерения угловых спектров выходящего пучка определять параметры шероховатости поверхности (среднеквадратичную высоту шероховатостей и длину корреляции) [13–15].

Результаты, полученные в настоящей работе, показывают возможность применения методов, основанных на использовании мод шепчущей галереи, для

определения положения и размеров дефектов обработки вогнутых сферических зеркал, а также для визуализации внутренней структуры депозитных нанослоев, нанесенных на указанные поверхности.

2. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника применялась

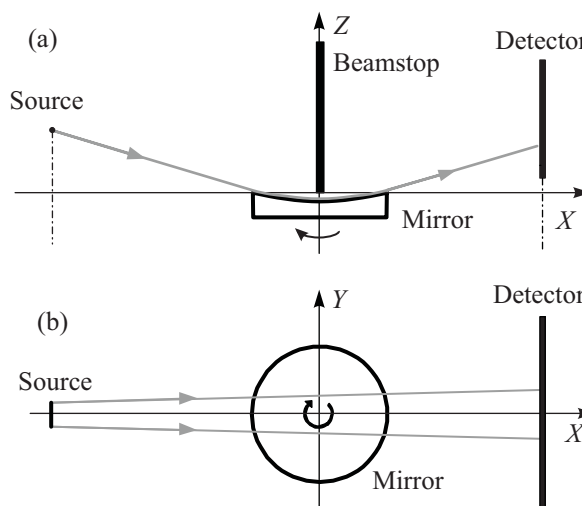


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: (a) – вид сбоку; (b) – вид сверху

рентгеновская трубка с молибденовым анодом и точечным фокусом ($0.4 \times 0.4 \text{ мм}^2$). Для обеспечения широкого углового спектра пучка в эксперименте 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. Зеркало было изготовлено из плавленного кварца методом глубокой шлифовки и полировки. Его радиус кривизны 25 см, диаметр 6 см. Отметим, что угол раствора зеркала, т.е. угол поворота пучка, равен $\psi \approx 13.8^\circ$, что по нашим расчетам соответствует среднему числу отражений 60.

¹⁾ e-mail: yakimchuk@physics.msu.ru; asad@ns.crys.ras.ru

Над зеркалом помещался поглощающий экран для исключения попадания прямого пучка в окно детектора. Крепление экрана осуществлялось таким образом, чтобы при вращении зеркала во время эксперимента экран оставался неподвижным. Вплотную к задней кромке зеркала располагался двумерный детектор на основе ПЗС-матрицы, позволяющий регистрировать распределение интенсивности вышедшего после многократных отражений пучка. Детектор имел 2048×2048 ячеек размером 13×13 мкм², а полная длина/ширина матрицы 26.6 мм. Управление детектором и гониометром производилось автоматически согласно заданной программе. Данная установка практически эквивалентна описанной в [16]. Принципиальное отличие состоит лишь в возможности вращения зеркала вокруг собственной оси симметрии (оси Z на рис. 1).

Нужно отметить, что выбор того или иного материала анода трубки не столь важен. Связано это с тем, что для наблюдения эффекта шепчущей галереи на сфере требуется широкий угловой спектр источника. Энергетический спектр пучка определялся спектром тормозного излучения (от ~ 1.2 до ~ 3 Å с максимумом в ~ 1.5 Å). Характеристическое излучение в эксперименте не использовалось.

3. На рис. 2 проведено сравнение теоретически рассчитанного и экспериментально наблюдаемого

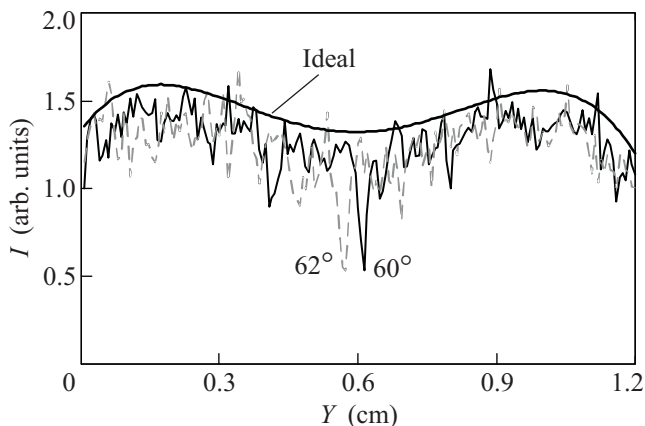


Рис. 2. Теневые проекции для идеальной поверхности (модель) и реальной поверхности (эксперимент) в разных угловых положениях с разницей в 2°

(для двух разных углов поворота зеркала) распределений интенсивности многократно отраженного пучка, выходящего с задней кромки зеркала. Причины возникновения двух широких максимумов на теоретической кривой обсуждались нами ранее [16]. Отклонения экспериментальных кривых от теоретических определяются как реальной статистикой эксперимента, так и дефектами обработки поверхности зеркала.

Если на идеальной сферической поверхности находится дефектная область малых размеров, при проходе которой рентгеновское излучение сильно поглощается, то в пространственном профиле распределения интенсивности на детекторе будет наблюдаться соответствующий ей минимум. Результаты математического моделирования представлены на рис. 3а, б. Эти результаты получены методом прогонки лучей с помощью алгоритма, подробно описанного в [16]. Расчеты проводились для излучения с длиной волны 1.54 Å, зеркала из плавленного кварца диаметром 6 см с радиусом кривизны 25 см и диаметром особенности 2 мм.

При проведении аналогичного эксперимента в лабораторных условиях искусственно областей поглощения на поверхности зеркала не создавалось. Измеренное двумерное распределение интенсивности зарегистрированного излучения показано на рис. 3с (на рис. 3d представлено сечение вдоль получаемого пятна, аналогичное рис. 3б). Видно, что на поверхности зеркала на пути распространения пучка располагались некоторые особенности (вероятно, обусловленные дефектами обработки поверхности), приводящие к локальному частичному ослаблению интенсивности в пучке. Очевидно, что при смещении такой особенности в другое место сферической поверхности локальный минимум в измеряемом распределении интенсивности также сместится.

Регистрируя последовательность пространственных распределений интенсивности выходящего пучка, получаемых для различных углов вращения зеркала относительно оси его симметрии, мы можем определить не только пространственное положение и размеры депозитных областей на поверхности зеркала, но и их внутреннее строение. Действительно, при таком вращении условия возбуждения мод шепчущей галереи остаются неизменными. Поэтому в случае абсолютно гладкого зеркала пространственное распределение интенсивности на детекторе оставалось бы неизменным. Однако наличие на поверхности тех или иных особенностей, ослабляющих интенсивность излучения, приводит к тому, что снимки, сделанные для разных угловых положений, отличаются друг от друга по относительным положениям локальных минимумов в распределении интенсивности.

4. Набор пространственных распределений интенсивности выходного излучения (теневых проекций) можно объединить в одно двумерное, которое отражает зависимость теневых проекций от угла поворота зеркала φ . Такое представление экспериментальных результатов в томографии принято называть синограммой. Реконструкция экспериментальных данных позволяет получить распределение коэффициентов ослабления на исследуемой сферической поверх-

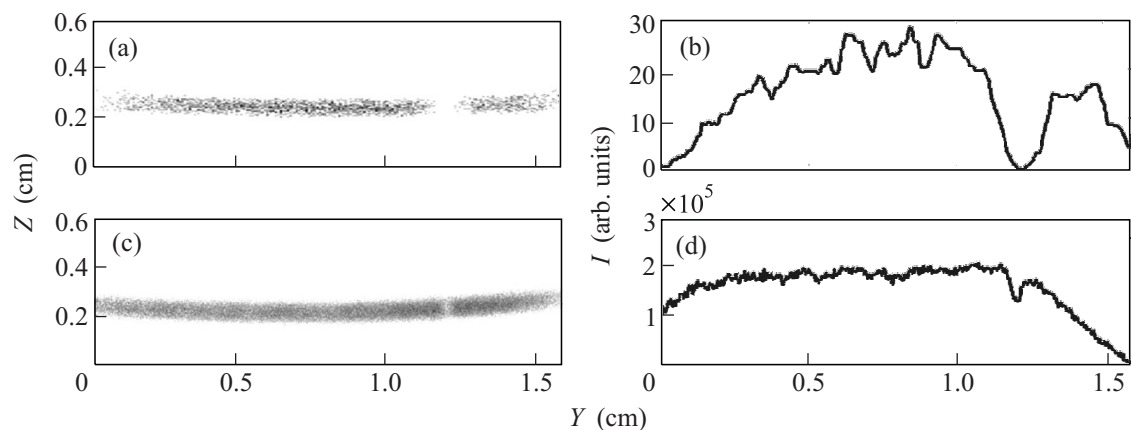


Рис. 3. Интенсивность I выходящего пучка в плоскости детектора. Модель: (а) – двумерное распределение; (б) – сечение. Эксперимент: (с) – двумерное распределение; (д) – сечение. На рисунках (а) и (с) степень почернения пропорциональна интенсивности

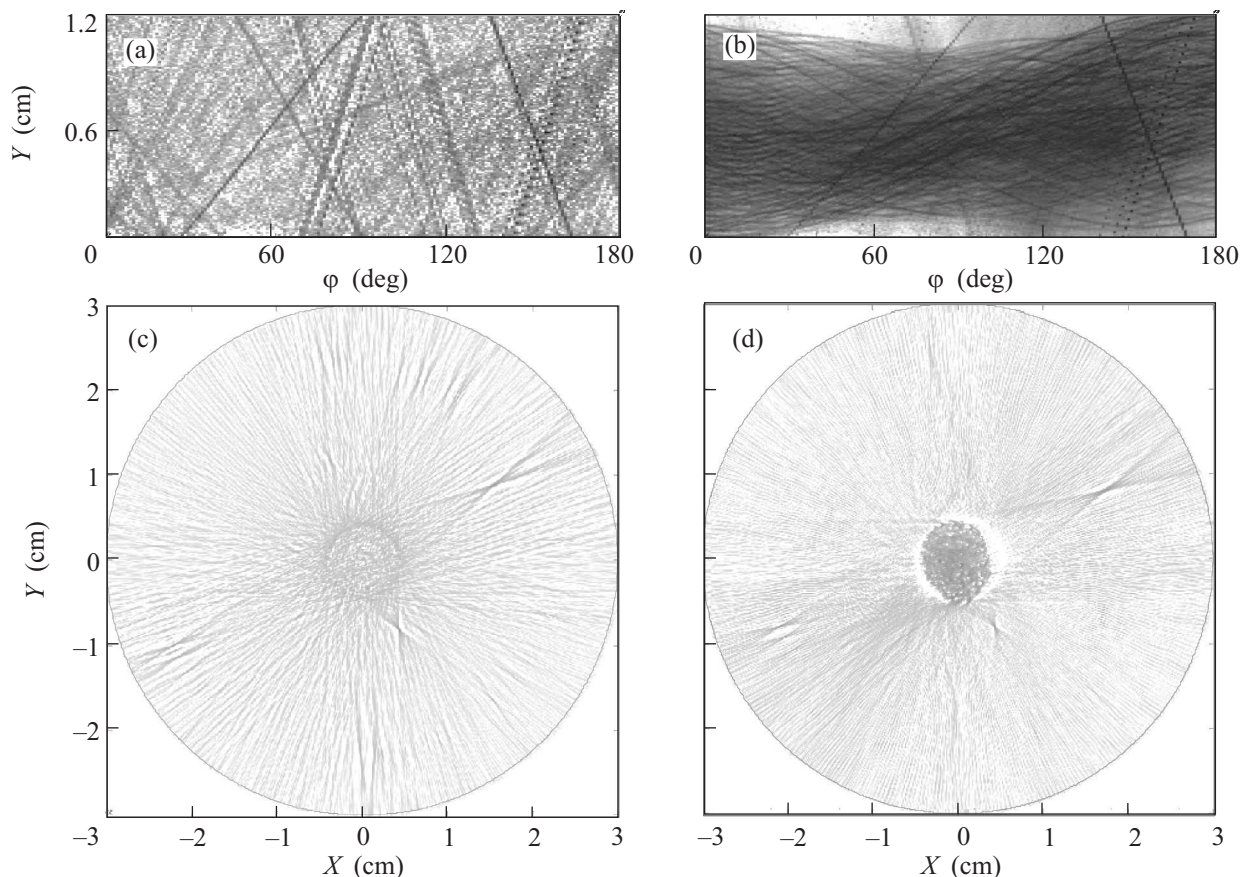


Рис. 4. Полученные результаты: (а) – синограмма чистого зеркала; (б) – синограмма зеркала с отпечатком пальца; (с) – реконструкция чистого зеркала; (д) – реконструкция зеркала с отпечатком пальца. Степень почернения пропорциональна ослаблению пучка

ности. Для наглядности будем отображать эти поверхностные распределения в проекции на плоскость XY (см. рис. 4).

На рис. 4а показаны результаты измерений для зеркала без искусственно созданных областей, ослабляющих пучок. На рис. 4б приведены результаты

реконструкции. Последующие эксперименты с различными искусственно нанесенными на поверхность особенностями показали, что рассматриваемый метод очень чувствителен к следам, оставленным на поверхности зеркала. В качестве яркой иллюстрации сказанного могут служить неожиданные резуль-

таты реконструкции отпечатка пальца (см. рис. 4b и d), сделанного в центре зеркала. Расстояния между папиллярными линиями, измеренные по результатам реконструкции, находятся в диапазоне от 0.2 до 0.5 мм, что совпадает с независимыми измерениями. Обратим внимание на то, что на обеих реконструкциях в одних и тех же местах прослеживаются механические дефекты поверхности зеркала, не исчезающие после ее очистки. Отметим, что при создании отпечатка никаких контрастирующих веществ не использовалось.

5. Таким образом, предлагаемый нами метод исследования состояния поверхности вогнутых сферических зеркал во многом схож с томографией 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 скользкого рентгеновского пучка на выходе из зеркала. По набору таких распределений математически восстанавливается поверхностное распределение величины, характеризующей локальное ослабление пучка. Принципы работы различных алгоритмов восстановления подробно описаны в [17]. В нашей схеме геометрия пучка, зондирующего поверхность, является достаточно сложной. По этой причине нами использовались алгебраические методы реконструкции, которые мы активно развиваем в последнее время [18].

Отметим основные особенности, отличающие рассмотренный подход от томографии. Во-первых, траектории зондирующих лучей принципиально отличаются от характерных для томографии. Во-вторых, важна ориентация объекта (зеркала) при вращении (оси вращения и симметрии зеркала должны совпадать). В-третьих, "прямой" пучок, необходимый для реконструкции данных, экспериментально измерить нельзя. Наконец отметим, что результатом эксперимента является определение локального ослабления рентгеновского пучка на поверхности, которое может быть вызвано различными причинами. К таким причинам следует отнести поглощение, рассеяние, отражение под большим углом за счет локальной несферичности, отражение с меньшим коэффициентом за счет локального изменения оптических констант.

Вместе с тем сам факт возможности локального выявления дефектов на зеркальных поверхностях с помощью предлагаемой методики сомнений не вызывает. Предполагается, что дальнейшее исследование и более точный учет описанных выше особенностей приведут к повышению информативности и ка-

чества получаемых результатов. Однако и уже полученные результаты указывают на перспективность разрабатываемого подхода, например, для исследования качества крупногабаритных вогнутых сферических зеркал или депозитных нанослоев, наносимых на сферическую поверхность. Как правило, депозитные слои наносятся через маску. Полученные изображения позволяют определять отличия реальной структуры слоев от планируемой. Приведенные результаты подтверждают работоспособность предложенного нами подхода. Достигнутое на данный момент пространственное разрешение составляет ~ 50 мкм.

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

1. А. В. Виноградов, *Зеркальная рентгеновская оптика*, Л.: Машиностроение, 1989.
2. И. В. Кожевников, Труды ФИАН **196**, 143 (1989).
3. I. N. Bukreeva, I. V. Kozhevnikov, and A. V. Vinogradov, *J. X-Ray Sci. Technol.* **5**, 396 (1995).
4. М. Н. Оруджалиев, В. А. Бушуев, *ЖТФ* **61**, 51 (1991).
5. L. Kaihola, *Appl. Optics* **20**, 1269 (1981).
6. А. В. Виноградов, В. М. Елинсон, В. И. Жилина и др., Доклады АН СССР **292**, 594 (1987).
7. А. В. Виноградов, В. М. Елинсон, И. В. Кожевников и др., *Оптика и спектроскопия* **67**, 206 (1989).
8. Yu. M. Aleksandrov, I. N. Bukreeva, A. V. Vinogradov et al., *J. Sov. Laser Research* **13**, 400 (1992).
9. V. I. Ostashev, V. E. Asadchikov, I. N. Bukreeva et al., *Optics Commun.* **155**, 17 (1998).
10. В. А. Аркадьев, М. А. Кумахов, *Поверхность: Физика, химия, механика* **10**, 25 (1986).
11. L. Chien and J. A. Golovchenko, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 788 (1997).
12. I. N. Bukreeva and I. V. Kozhevnikov, *Physica B* **198**, 13 (1994).
13. А. Д. Ахсаханян, В. А. Муравьев, Н. Н. Салащенко, *Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **5**, 1 (2007).
14. В. Е. Асадчиков, И. Н. Букреева, А. В. Виноградов и др., *Квантовая электроника* **24**, 845 (1997).
15. I. N. Bukreeva, V. E. Asadchikov, O. N. Gilev et al., *Proc. SPIE* **3739**, 395 (1999).
16. И. В. Якимчук, Б. С. Рошин, И. В. Кожевников и др., *Кристаллография* **53**, 1111 (2008).
17. A. C. Kak and M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, N.Y., 1988.
18. А. В. Бузмаков, В. Е. Асадчиков, Д. А. Золотов и др., *Материалы рабочего совещания "Рентгеновская оптика-2010"*, 168 (2010).