

Двумерное увеличение изображения в рентгеновском микроскопе асимметричного отражения

А. В. Андреев, В. Е. Асадчиков⁺, А. В. Бузмаков⁺, А. А. Коновко, С. В. Кузин*, А. А. Перцов*, Ю. В. Пономарев, Р. А. Сенин⁺, И. С. Смирнов[△], С. В. Шестов*, В. Н. Шкурко⁺

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 119992 Москва, Россия

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

* Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[△]Московский институт электроники и математики, 109028 Москва, Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2006 г.

Обсуждаются результаты экспериментов по получению 20-кратного двумерного увеличения рентгеновского изображения, полученного в рентгеновском микроскопе асимметричного отражения с использованием лабораторного источника рентгеновского излучения. Поле зрения определялось линейными размерами детектора и составило в наших экспериментах $0,5 \times 0,5$ мм, при времени экспозиции 600 с.

PACS: 07.85.Fv, 41.50.+h, 68.37.Yz

В настоящее время для получения рентгеновского изображения с высоким пространственным разрешением используется ряд схем рентгеновской микроскопии: проекционная, контактная, отражательная (микроскоп Шварцшильда), линзовая (брэгг-френелевские и капиллярные линзы, зонные пластинки) и т.д. [1–3]. Наряду с несомненными достоинствами, продемонстрированными как в практических применениях, так и в научных исследованиях, эти схемы имеют определенные ограничения, связанные с небольшим полем зрения приборов, необходимостью использования синхротронного излучения в качестве источника, значительным временем регистрации изображения. Основными причинами, ограничивающими величину пространственного разрешения, являются дифракционное расплывание на пути от объекта до детектора и пространственный размер ячейки детектора.

В данной работе рассматривается возможность получения двумерного изображения со значительным увеличением при использовании рентгеновского микроскопа асимметричного отражения и лабораторного источника рентгеновского излучения. Данный метод получения увеличенных изображений актуален и для синхротронных исследований, это показывает теоретическая работа д-ра Спола [4], посвященная получению субмикронного разрешения при использовании асимметричной дифракции, а также экспериментальная работа [5], в которой на синхротроне Swiss Light Source получено увеличение, равное 100.

Схема собранной нами экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника

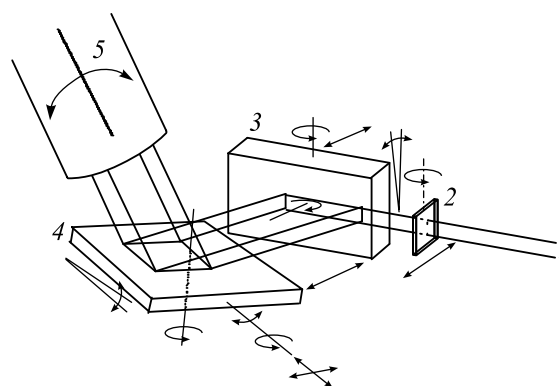


Рис.1. Схема рентгеновского микроскопа, осуществляющего двумерное увеличение: 1 – падающий пучок, 2 – образец, 3 – первый кристалл, 4 – второй кристалл, 5 – CCD-детектор

использовалась рентгеновская трубка $\text{CuK}\alpha$ (размер фокуса около $0,5 \times 0,5$ мм). Источник излучения располагался в 60 см от первого отражающего кристалла, исследуемый объект находился в 10 см от кристалла. В качестве увеличивающих элементов использовались асимметрично отражающие монокристаллы Si(220). Угол среза кристалла относительно кристаллографических плоскостей составил $21^\circ 38'$. Угол падения излучения на поверхность кристалла, соответствующий максимуму брэгговского отражения равен $2^\circ 02'$, а угол выхода отраженного излучения

45°17'. Увеличение коэффициента асимметрии отражения приводит к падению плотности потока излучения, регистрируемого детектором, поэтому в настоящих экспериментах нами был выбран коэффициент асимметрии $\beta = 20$, который позволяет получать качественное увеличенное изображение при разумном времени регистрации.

Юстировка увеличивающей оптической схемы осуществляется в несколько этапов. Сначала устанавливается первый кристалл и производится его настройка на максимум интенсивности отраженного пучка. Далее производится настройка второго кристалла таким образом, чтобы интенсивность отраженного излучения была максимальной. Отметим, что ввиду относительно малого потока рентгеновских квантов (~ 3000 квантов/(с \times мм²)), эту юстировку следует проводить с использованием сцинтилляционного детектора. Неискаженное изображение объекта получается только при определенной взаимной ориентации двух кристаллов, эта задача решается использованием при настройке эталонных объектов.

В качестве объекта нами была выбрана медная решетка с квадратными отверстиями (рис.2). Период

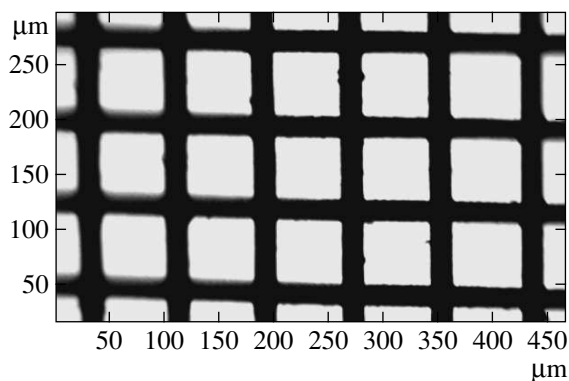


Рис.2. Изображение исследуемой сетки, полученное на оптическом микроскопе

повторяемости решетки составляет ~ 60 мкм, а сторона квадратного отверстия ~ 48 мкм. На рис.3

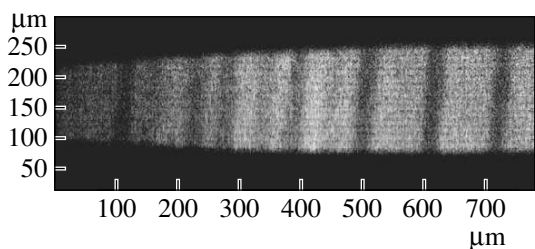


Рис.3. Изображение сетки, увеличенной в одном направлении

представлено изображение сетки, полученное с применением лишь одного асимметричного кристалла. Несложно видеть, что на снимке присутствуют 2 системы вертикальных штрихов, сдвинутых друг относительно друга. Это изображения сетки, сформированные линиями $\text{CuK}_{\alpha 1}$ и $\text{CuK}_{\alpha 2}$. Узкие горизонтальные полосы – также линии решетки, но не увеличенные, а полученные фактически проекционным методом.

Увеличенное в двух направлениях изображение сетки представлено на рис.4. Регистрация увели-

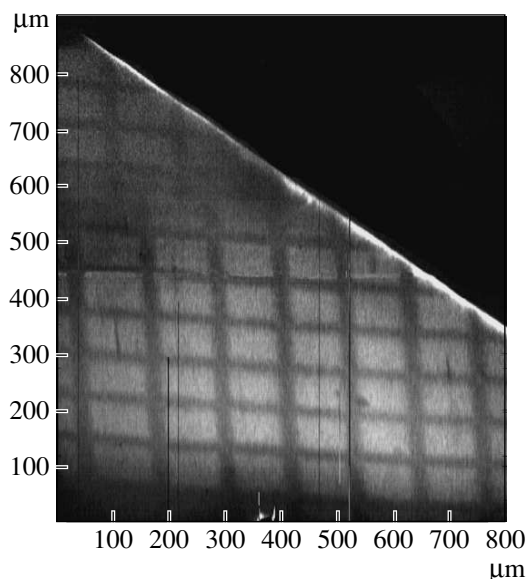


Рис.4. Увеличенное в двух направлениях изображение сетки

ченного изображения производилась с применением матрицы прибора с зарядовой связью (ПЗС) – размеры пикселя 9×9 мкм. Время экспозиции составляло 600 с, при этом в каждом пикселе матрицы фиксировалось до 200 событий. В этих условиях относительная погрешность составляла $\sim 7\%$.

На рис.4 хорошо видны два изображения сетки (в центре и в левом верхнем углу), смещенные друг относительно друга. Этот эффект вызван тем, что используемая схема является дисперсионной в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет пространственно разносить изображения, полученные на различных длинах волн (в данном случае линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (λ_1) и $\text{CuK}_{\alpha 2}$ (λ_2)). Действительно, углы Брэгга при дифракции на кристалле Si(220) излучения с длинами волн λ_1 и λ_2 равны соответственно $\lambda_1 = 23^\circ 40'$ и $\lambda_2 = 23^\circ 43'$. Таким образом, при используемой геометрии эксперимента изображения одной точки объекта, даваемые рентгеновским излучением с длинами волн λ_1 и λ_2 , уже на

поверхности первого кристалла будут разнесены на расстояние $\delta x = 2,9$ мм. На поверхности ПЗС-матрицы расстояние между изображениями точки объекта в предложенной схеме эксперимента составит 6,7 мм, что хорошо согласуется с результатами эксперимента. Очевидно, что всегда можно выбрать такое положение детектора, при котором на него будет попадать только одно изображение. Яркая диагональная линия на снимке соответствует отражению от края второго кристалла.

В качестве регистрирующей системы в эксперименте был использован детектор для регистрации рентгеновского изображения на базе крупноформатной ПЗС-матрицы “Кельт” (1024×1152 ячеек с размером 9×9 мкм) отечественного производства с фронтальной регистрацией. Эта матрица является фазовым прибором с переносом заряда с объемным каналом n -типа. Она имеет один выходной регистр и двухкаскадный выходной узел с “плавающей” диффузией. Матрица охлаждается двухкаскадным холодильником Пельтье, обеспечивающим перепад температур около 50 К, что позволяет уменьшить тепловые шумы матрицы более чем в 100 раз. Для уменьшения шумов еще на порядок (до ~ 8 электронов/с) использована система жидкостного охлаждения.

Выбор матрицы определялся, с одной стороны, необходимостью высокой эффективности регистрации с учетом малой плотности потока рентгеновского излучения в эксперименте и, с другой стороны, малым размером элемента регистрации. С учетом этих факторов была выбрана именно матрица данного типа, обеспечивающая, с одной стороны, 9-микронный элемент разрешения и, с другой, разумное время экспозиции ~ 10 минут. Для блокировки оптического излучения в качестве входного окна ПЗС-матрицы установлен многослойный фильтр из лавсановой пленки, запыленной с двух сторон алюминием. Это позволяет проводить эксперимент в нормальных лабораторных условиях без дополнительного затемнения установки.

Детектор на основе этой матрицы имеет 12-битное АЦП. Чувствительность детектора составляет 5–10 уровней АЦП на один рентгеновский фотон для линии $\text{Cu}K_{\alpha} = 0,154$ нм.

Управление детектором осуществляется с помощью специального программного обеспечения, позволяющего управлять режимом работы детектора и записывать полученные изображения в компьютер. Для обработки данных используется программное обеспечение, написанное на языке программирования высокого уровня IDL.

Именно детектор с такими параметрами обеспечил проведение описанных экспериментов за разумное время (10 мин).

Разрешение двумерного детектора можно повысить при использовании сцинтиллятора в качестве преобразователя рентгеновского сигнала в оптический и введении в состав детектора систему оптического сопряжения для переноса и масштабирования оптического изображения. Это, однако, ведет к значительным световым потерям и снижению отношения сигнал/шум.

В случае непосредственной регистрации рентгеновских квантов на ПЗС-матрицу разрешение будет определяться размером ее ячейки. В настоящее время производятся ПЗС-матрицы с размером ячейки от 6 до 30 мкм и CMOS-детекторы с размером элемента от 3 мкм. При такой регистрации обеспечивается наилучшая эффективность ($\sim 50\%$), а также возможность регистрировать единичные фотоны. Это, в свою очередь, приводит к существенному сокращению времени регистрации и высокому отношению сигнал/шум. Однако воздействие ионизирующего излучения непосредственно на матрицу вызывает ее постепенную деградацию. В нашем случае это обстоятельство не является определяющим, поскольку регистрируемые сигналы весьма слабы.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов наглядно демонстрируют возможность получения 20-кратного увеличения изображения объектов с использованием двух асимметрично отражающих кристаллов на лабораторном рентгеновском источнике. Относительно небольшое время регистрации позволяет надеяться на применение рентгеновских микроскопов с асимметричным отражением для развития схем рентгеновской томографии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 05-02-16764).

1. F. Cerrina, *Medical Physics* **14**, 694 (1987).
2. А. В. Андреев, В. Е. Асадчиков, И. А. Артюков и др., *Кристаллография* **46**, 658 (2001).
3. И. А. Артюков, В. Е. Асадчиков, А. И. Виленский и др., *ДАН* **372**, 608 (2000).
4. R. D. Spal, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3044 (2001).
5. M. Stambanoni, G. Borchert, R. Abela et al., *J. Appl. Phys.* **92**, 7630 (2002).