

УДК 538.9

МЕТОД РЕФЛЕКТО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА БАЗЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОСТРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА

© 2021 г. М. А. Воеводина^{а, *}, С. С. Лятуна^а, А. А. Баранников^а, И. И. Лятуна^а,
И. И. Снигирева^{б, **}, А. А. Снигирев^{а, ***}

^аБалтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, 236014 Россия

^бEuropean Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, 38000 France

*e-mail: voevodina.mariia@gmail.com

**e-mail: irina@esrf.fr

***e-mail: anatoly.snigirev@gmail.com

Поступила в редакцию 06.03.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

Представлен новый метод рефлекто-интерферометрии на базе лабораторного источника рентгеновского излучения для исследования тонкопленочных структур с использованием составных преломляющих линз. Одним из основных преимуществ предлагаемого метода является простота оптической схемы, когда сфокусированный рентгеновский пучок, отраженный от параллельных плоских поверхностей, создает интерференционную картину в широком угловом диапазоне. Благодаря этому интерференционная картина может быть получена за один снимок без необходимости проведения процедуры сканирования путем наклона образца или детектора. Возможности нового метода были экспериментально продемонстрированы на базе лабораторного острофокусного источника MetalJet компании Excillum, на характеристической линии GaK_{α} (9.25) кэВ. Была получена серия интерференционных картин для тестового образца – свободно висящей мембраны Si_3N_4 толщиной 500 нм. На основании полученных результатов показаны основные преимущества метода: высокое временное и пространственное разрешение, а также предложены возможные применения рефлекто-интерферометра как на лабораторных, так и на синхротронных источниках излучения.

Ключевые слова: пространственное разрешение, временное разрешение, интерферограммы, рефлекто-интерферометрия, составные преломляющие рентгеновские линзы, рентгеновская рефлектометрия.

DOI: 10.31857/S1028096021010155

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие в микро- и наноэлектронике требует все более совершенных методов исследования тонкопленочных и многослойных структур. Метод рентгеновской рефлектометрии (XRR) является классическим методом исследования структуры и внутреннего строения тонкопленочных и многослойных систем, а также поверхностей раздела сред для широкого круга прикладных задач [1, 2]. Но несмотря на это, данная методика сегодня имеет целый ряд ограничений, которые предъявляют высокие требования к качеству поверхности и геометрическим параметрам образцов. Кроме того, классический метод XRR подразумевает использование сложных оптических схем и проведения сравнительно длительных экспериментов на базе лабораторного оборудования. Появление новых лабораторных и синхротронных источников рентгеновского из-

лучения, а также новых элементов рентгеновской оптики существенно расширяют возможности для развития метода рентгеновской рефлектометрии.

В 1996 г. была экспериментально продемонстрирована первая преломляющая линза для фокусировки жесткого рентгеновского излучения. Сегодня рентгеновские преломляющие линзы являются наиболее динамично развивающимся видом рентгеновской оптики. Составные преломляющие линзы (CRL) быстро завоевали популярность у пользователей синхротронного излучения благодаря их простоте в эксплуатации и возможности применения в широком диапазоне энергий [3, 4]. Сегодня такой вид оптики набирает все большую популярность использования в лабораторных условиях на микрофокусных источниках рентгеновского излучения нового поколения [5–7]. Сочетание новых рентгенооптических элементов с источниками рентгеновского



Рис. 1. Отражение и преломление рентгеновского излучения на поверхности материала.

излучения последнего поколения открывает целый ряд возможностей для исследования тонкопленочных структур, позволяя преодолеть ограничения классических методик, а также реализовать некоторые исследовательские методы в лаборатории, которые ранее были возможны только на синхротронных источниках [8].

В данной работе мы представляем новый метод рентгеновской рефлекто-интерферометрии (XRI) с использованием преломляющей рентгеновской оптики (CRL) на базе лабораторного микрофокусного источника рентгеновского излучения. Благодаря фокусирующим свойствам преломляющих линз, новый XRI обладает как минимум двумя очевидными преимуществами: высоким пространственным и временным разрешением. Возможности метода были экспериментально продемонстрированы на базе лабораторного острофокусного источника MetalJet компании Excillum. В результате эксперимента была получена серия интерференционных картин для тестового образца – свободно висящей мембраны Si_3N_4 толщиной 500 нм. На основании полученных результатов показаны основные преимущества, а также предложены будущие возможные применения рефлекто-интерферометра.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Классический метод рентгеновской рефлектометрии основан на измерении интенсивности рентгеновских лучей, отраженных от поверхности исследуемого объекта, в зависимости от угла падения. XRR позволяет получить достаточно подробную информацию о геометрических и физических свойствах исследуемой структуры: толщине и плотности материала, а также шероховатости поверхности и интерфейсов [9, 10]. При падении

электромагнитной волны на поверхность образца образуются зеркально отраженные и диффузно рассеянные волны, а также возможно возникновение преломленной волны, которая будет распространяться во второй среде (рис. 1) [11, 12].

Направление распространения преломленных волн в материале описывается уравнением Снеллиуса [13]. В общем случае показатель преломления материала n для электромагнитных волн может быть записан в следующем виде [14]:

$$n = 1 - \delta + i\beta, \quad (1)$$

где δ – декремент показателя преломления, β – индекс поглощения. Известно, что рентгеновские лучи полностью отражаются в случае, когда электромагнитная волна падает на плоскую поверхность материала под углом скольжения меньше критического угла θ_c . Критический угол для большинства материалов чрезвычайно мал, поскольку δ в области жесткого рентгеновского излучения имеет значения около 10^{-5} – 10^{-6} , а критический угол может быть оценен по закону Снеллиуса как $\theta_c \approx (2\delta)^{1/2}$, где θ_c – значение критического угла. Причем θ_c в диапазоне энергий от 5–30 кэВ для большинства материалов, как правило, не превышает 8.7 мрад. Стоит отметить, что отражательная способность рентгеновских лучей быстро уменьшается с увеличением угла падения $\theta > \theta_c$, причем интенсивность отраженных рентгеновских лучей уменьшается пропорционально θ^{-4} . При углах падения рентгеновских лучей, больших критического угла полного внешнего отражения, часть излучения отражается от поверхности исследуемого объекта, и часть излучения преломляется, проникая внутрь структуры [15]. В случае свободно висящей тонкой пленки отражение происходит как от верхней, так и от нижней границы раздела двух сред. В результате отраженные рентгеновские лучи интерферируют между собой, формируя интерференционную картину в широком угловом диапазоне отраженных углов, представляющую собой развертку полос равного наклона (осцилляции Киссинга [16]). Из оптики видимого света известно, что тонкопленочная структура постоянной толщины, освещенная сходящимся пучком монохроматического света, позволяет получить кривую рефлектометрии (осцилляции Киссинга) без сканирования образца. Аналогичным образом, фокусируя пучок рентгеновского излучения с помощью составной преломляющей линзы на поверхности тонкой пленки, часть кривой рентгеновской рефлектометрии, необходимой для анализа, можно получить сразу.

Рассмотрим процесс формирования кривой рентгеновской рефлектометрии подробнее. В результате интерференции рентгеновского излучения от границ раздела сред на кривой рефлектометрии формируются максимумы и минимумы

интенсивности, расстояние между которыми связано с толщиной исследуемой структуры. Номер осцилляции m отсчитывается от первого интерференционного максимума или минимума, находящегося вблизи критического угла. Положение интерференционного максимума m_i для разности хода лучей $\Delta = m\lambda$ можно определить следующим образом [17]:

$$\Delta = m\lambda = 2d(\sin^2\theta_m - \sin^2\theta_c)^{\frac{1}{2}} \approx 2d(\theta_m^2 - 2\delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

при $m \in N$

$$\theta_m^2 \approx m^2 \frac{\lambda^2}{4d^2} + 2\delta = \frac{m^2\lambda^2}{4d^2} + \theta_c^2, \quad (3)$$

где d – толщина исследуемой структуры, θ_m – положение m_i -максимума.

В случае, когда подложка является оптически более плотной средой, чем пленка, на отражающей границе раздела сред пленка/подложка возникает разность фаз π , и вместо m используется $m + 1/2$. Используя уравнение (3) и зная разницу между соседними максимумами или минимумами, можно определить толщину исследуемой пленки следующим образом:

$$d = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\sqrt{\theta_{m+1}^2 - \theta_c^2} - \sqrt{\theta_m^2 - \theta_c^2}} \approx \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\theta_{m+1} - \theta_m}, \quad (4)$$

если $\theta_m \gg \theta_c$.

Согласно формуле (4), наибольшее угловое расстояние $\Delta\theta = \theta_{m+1} - \theta_m$ между двумя следующими друг за другом интерференционными полосами при условии $\theta_m \gg \theta_c$, может быть оценено как:

$$\Delta\theta = \lambda/2d. \quad (5)$$

Как было сказано ранее, использование преломляющей оптики позволяет наблюдать часть кривой рефлектометрии без проведения процедуры сканирования образца по углу θ . Диапазон падающих углов определяется числовой апертурой рентгеновских преломляющих линз (Numerical Aperture), которую можно оценить по формуле:

$$N.A. = A_{\text{eff}}/L_1, \quad (6)$$

где A_{eff} – эффективная апертура, L_1 – расстояние от линз до объекта исследования. Из этого следует, что минимальное количество полос, наблюдаемых с помощью рефлекто-интерферометра на базе CRL, может быть выражено как $N.A./\Delta\theta$. Полученная формула (5) позволяет сделать оценки минимальной и максимальной толщины пленки, которую можно исследовать методом рентгеновской рефлектометрии на основе составной преломляющей оптики.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация метода рентгеновской рефлекто-интерферометрии была выполнена на базе лабораторного микрофокусного источника рентгеновского излучения MetalJet компании Excillum, входящего в состав уникальной научной установки (УНУ) “Научно-образовательный тренировочный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” БФУ им. И. Канта. Отличительной особенностью данного источника является использование струи жидкого металла (индий-галлиевого сплава) в качестве анода, где максимум интенсивности в спектре излучения источника приходится на характеристическую линию GaK_{α} . Сфокусированный микроразмерный электронный луч ударяется в струю металлического расплава, что вызывает генерацию рентгеновского излучения с энергией 9.25 кэВ ($\lambda = 1.34 \text{ \AA}$) [18]. Основным преимуществом источника подобного типа является его малый размер ($\sim 5 \text{ мкм}$). Максимальное значение спектральной яркости такого источника $\sim 10^{11-13}$ фотонов/(с · мм² · мрад² · кэВ). Эксперимент был выполнен при размере источника $20 \times 15 \text{ мкм}$ (FWHM) в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно. На рис. 2 представлена принципиальная оптическая схема для проведения эксперимента в режиме рентгеновской рефлекто-интерферометрии на базе преломляющей оптики.

Для генерации сходящегося рентгеновского пучка были использованы преломляющие бериллиевые линзы в количестве 28 штук с радиусом параболы $R = 50 \text{ мкм}$. Фокусное расстояние такого объекта для длины волны $\lambda = 1.34 \text{ \AA}$ составило $f = 0.22 \text{ м}$, а значение эффективной апертуры равнялось $A_{\text{eff}} = 276 \text{ мкм}$ [19]. При планировании оптического эксперимента на лабораторном источнике рентгеновского излучения необходимо также учитывать тот факт, что интенсивность (помимо поглощения на воздухе) ослабевает как r^2 , где r – расстояние от источника. Поэтому для того, чтобы минимизировать потери интенсивности необходимо использовать наиболее компактную оптическую схему.

Рассчитаем минимальные расстояния L_0 и L_1 , для этого запишем формулу тонкой линзы $1/f = 1/L_0 + 1/L_1$ и выразим значение для $L_1 = fL_0/(L_0 - f)$. Очевидно, что общая длина оптической схемы L при фокусировке будет равна сумме L_1 и L_0 : $L = L_0 + fL_0/(L_0 - f)$.

Для нахождения минимальных размеров оптической схемы приравняем значение производной функции L к нулю и заменим L_0 на x для удобства вычислений: $L' = (x + (fx/(x - f)))' = 0$. Указанное равенство будет выполняться при условии, что $x = 2f$, соответственно, $L_0 = L_1 = 2f$. Согласно ре-

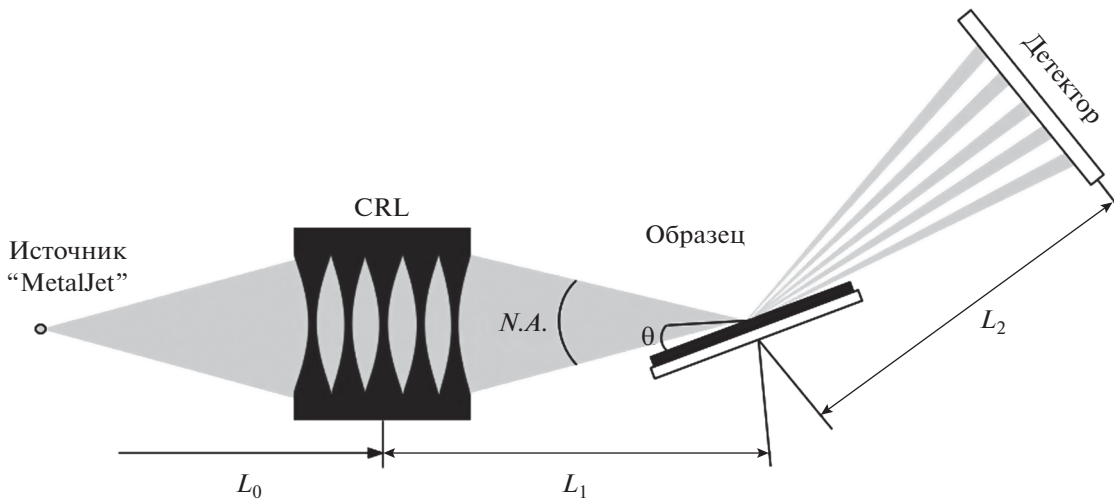


Рис. 2. Схематическое изображение рефлекто-интерферометра.

зультатам расчетов, набор двумерных бериллиевых линз был установлен на расстоянии 0.44 м от источника, а за линзами – тестовая структура на расстоянии 0.44 м. Стоит также отметить, что поскольку $L_0 = L_1$, то экспериментальное увеличение размера источника $M = 1$. Зная расстояние L_1 и эффективную апертуру линз, можно оценить диапазон падающих углов по формуле (9): $N.A. = (276 \times 10^{-6})/0.44 = 6.27 \times 10^{-4}$ рад.

В качестве исследуемой структуры для метода рефлекто-интерферометрии была использована коммерчески доступная тонкопленочная мембрана нитрида кремния компании Silson Ltd [20]. Образцы подобного типа изготавливаются путем нанесения пленки аморфного Si_3N_4 на объемную монокристаллическую кремниевую подложку с последующим травлением окна в Si до пленки Si_3N_4 , формируя тем самым свободно висящую мембрану, закрепленную на Si-раме. Для эксперимента была выбрана мембрана с размером кремниевой несущей рамы, равным 10×10 мм, окно мембраны составило 5×5 мм, а толщина мембраны Si_3N_4 – 500 нм (рис. 3). Стоит отметить, что критический угол θ_c материала Si_3N_4 для энергии 9.25 кэВ равняется 4.1 мрад.

Рефлекто-интерферограммы были записаны на двумерный высокоразрешающий CCD детектор Photonic Science с размером пикселя 6.5 мкм. Оценка расстояния между исследуемым образцом и детектором была проведена исходя из необходимости соблюдения условия: на одну интерференционную полосу должно было приходиться не менее 10 пикселей. Для этого сначала необходимо рассчитать период интерференционных полос по формуле: $\arcsin\theta = \lambda/2d$, тогда искомое расстояние от образца до детектора можно выразить как $L_2 = (t \times 10)/\text{tg}\theta$, где t – размер пикселя

детектора, равный 6.5 мкм. Тогда минимальное значение расстояния $L_2 = 0.48$ м, однако для повышения детализации регистрируемых картин рефлекто-интерферометрии было использовано расстояние $L_2 = 1.0$ м. Зная числовую апертуру объектива и угловой размер интерференционной полосы $\Delta\theta$, можно оценить количество наблюдаемых интерференционных полос N в методе рентгеновской рефлекто-интерферометрии: $N = N.A./\Delta\theta = (6.27 \times 10^{-4})/(1.34 \times 10^{-4}) = 4.6 \approx 5$ полос.

Первым шагом для получения рефлекто-интерферограмм является настройка CRL и определение их точного фокусного расстояния и размера фокусного пятна. CRL, установленные на моторизированных подвижках со всеми необходимыми поступательными и вращательными перемещениями, были введены на пути рентгеновского излучения и центрированы вдоль оптической оси. Измерения фокусного пятна проводились с использованием CCD-детектора, который находился на расчетном фокусном расстоянии. Изображения фокусного пятна были записаны и измерены (FWHM – полная ширина на уровне половины амплитуды) путем сканирования детектором вдоль оптической оси в пределах глубины фокуса объектива. Расстояние, на котором был обнаружен минимальный размер фокусного пятна, соответствует расстоянию от линзы до исследуемой структуры L_1 .

Следующим шагом для получения интерференционных картин методом рефлекто-интерферометрии является выравнивание образца, которое полностью аналогично, как и для метода классической рефлектометрии. Мембрана, расположенная горизонтально на гониометре, поднимается вертикально вверх до тех пор, пока образец не пересечет первичный пучок рентгенов-

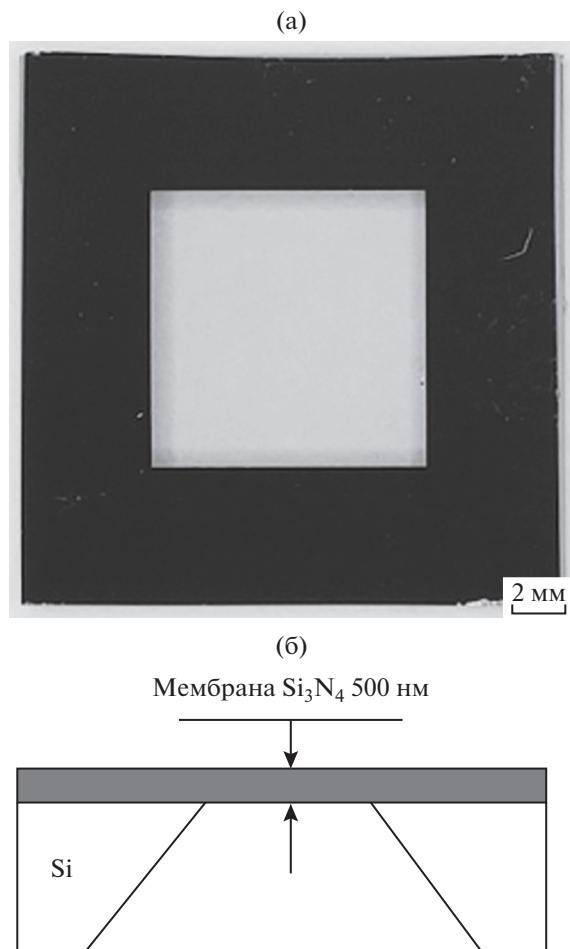


Рис. 3. Оптическое изображение тестовой мембраны Si_3N_4 (а) и схематическое изображение (б).

ского излучения так, что на детекторе будет зафиксирована половина интенсивности пучка. Затем производится сканирование образцом по оси θ . Начиная с исходного углового положения, образец наклоняется в направлении, позволяющем наблюдать один из двух краев мембраны, далее образец наклоняется в противоположном направлении, чтобы увидеть второй край мембраны на детекторе. Среднее угловое значение между двумя этими угловыми положениями соответствует условию параллельности первичного пучка и поверхности образца. Для поиска более точного положения мембраны, при котором $\theta = 0^\circ$, необходимо повторить два последних шага несколько раз. Стоит отметить, что тестовый образец не обязательно должен располагаться горизонтально, но возможно вертикальное положение, поскольку используемая оптическая система, в частности преломляющая рентгеновская оптика, не накладывает никаких ограничений на строгую ориентацию образца в пространстве.

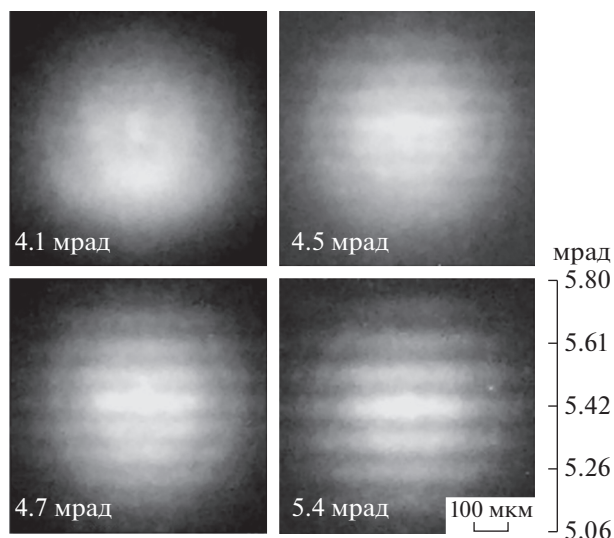


Рис. 4. Серия интерференционных картин, полученная для мембраны толщиной 500 нм.

Далее в результате эксперимента была получена серия интерференционных картин для мембраны нитрида кремния толщиной 500 нм. Интерферограммы были получены при разных углах наклона мембраны от 4.1 до 5.4 мрад, время получения интерференционных картин варьировалось от 20 до 40 с из-за уменьшения отражательной способности при увеличении угла наклона мембраны (рис. 4).

Как упоминалось ранее, период интерференционной картины обратно пропорционален толщине исследуемой структуры. Оценка толщины исследуемого образца была выполнена по периоду полученной интерференционной картины согласно формуле (6). С этой целью из полученной интерференционной картины при угле наклона 5.4 мрад были отобраны профили интенсивности и построены графики зависимости интенсивности отраженного излучения от угла наклона мембраны (рис. 5). Далее были определены положения максимумов, значения которых были подставлены в формулу (6) для оценки толщины исследуемой структуры. По экспериментальным данным толщина составила $d = 498 \pm 3$ нм.

Для более точного определения толщины исследуемой структуры нами была получена часть экспериментальной кривой отражательной способности путем комбинирования индивидуальных интерферограмм (рис. 6а), полученных при анализе мембраны Si_3N_4 толщиной 500 нм в диапазоне углов от 5.2 до 5.6 мрад. Кривая рентгеновской рефлекто-интерферометрии была сформирована с использованием следующих шагов: сечение профиля интенсивности было снято с каждой интерференционной картины, после чего интенсивность фона фокусирующих линз была вычте-

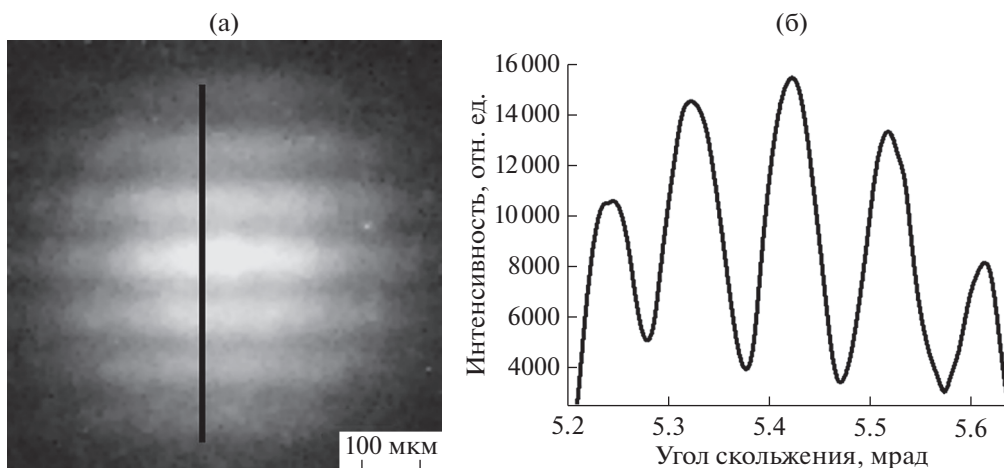


Рис. 5. Интерференционная картина, полученная в результате эксперимента, угол наклона составляет 5.4 град (а). Профиль распределения интенсивности в интерференционной картине (б).

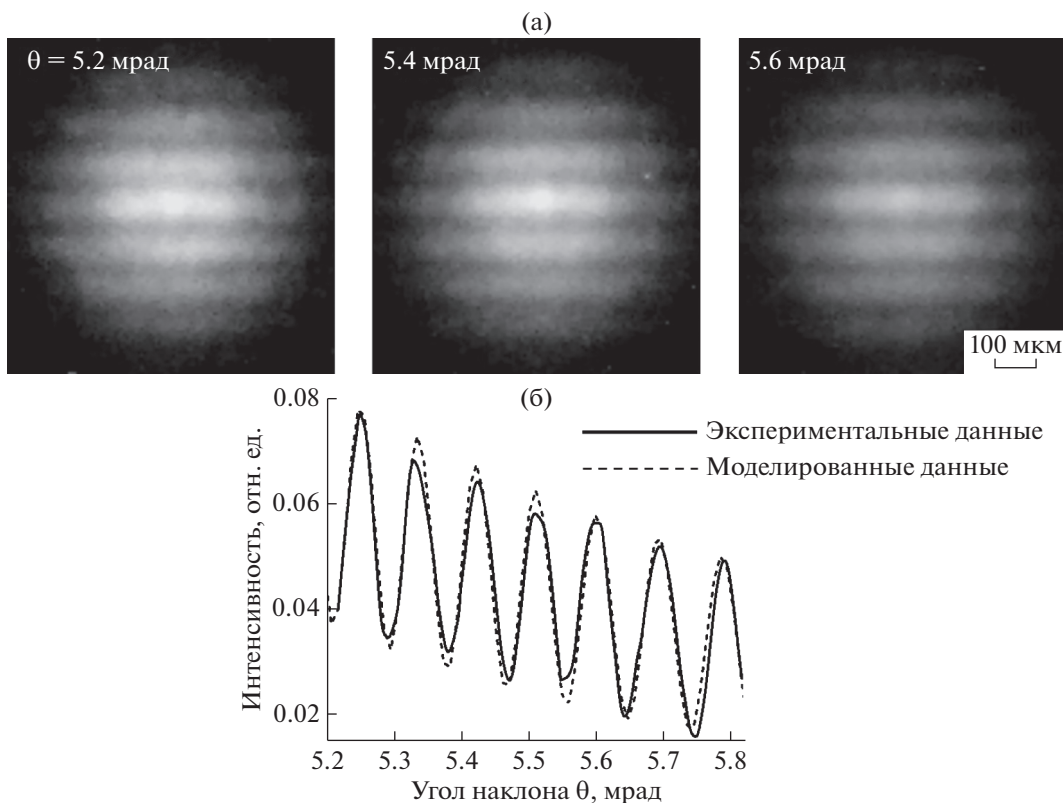


Рис. 6. Интерференционная картина мембраны нитрида кремния толщиной 500 нм при различных углах наклона (а). Экспериментальная кривая отражения, полученная путем объединения интерферограмм, записана при углах наклона мембраны от 5.2 до 5.5 град (б).

на из интенсивности полученных профилей, затем они были сшиты. Полученная часть кривой рефлекто-интерферометрии была профитирована (экспериментальная кривая на рис. 6б) с использованием стандартного ПО для анализа

XRR-данных от компании BRUKER DIFFRAC. Leptos [21].

Анализируя полученные данные (рис. 6б) мы можем видеть, что период интерференционных максимумов на экспериментальной кривой соот-

ветствует периоду, полученному при фитировании экспериментальных данных теоретической кривой с толщиной слоя Si_3N_4 500 нм. Небольшая разница в контрасте полос на экспериментальной и теоретической кривых отражения может быть объяснена шероховатостью мембраны, поскольку в теоретической модели граница раздела абсолютно гладкая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был успешно продемонстрирован новый метод рентгеновской рефлекто-интерферометрии на базе рентгеновской преломляющей оптики с применением лабораторного микрофокусного рентгеновского источника. Основная идея предлагаемого метода – это получение картины рефлектометрии без сканирования (посредством освещения поверхности исследуемой структуры сфокусированным рентгеновским пучком). Апробация метода была выполнена на базе лабораторного источника рентгеновского излучения MetalJet компании Excillum с использованием тестовой тонкопленочной мембранной структуры нитрида кремния толщиной 500 нм. В результате исследований была получена серия интерференционных картин. По полученным данным была рассчитана толщина исследуемой мембранной структуры, экспериментальные результаты которой хорошо согласуются с заявленными характеристиками, что подтверждает корректную работу метода.

XRI обладает очевидными преимуществами благодаря использованию составных преломляющих рентгеновских линз для создания конусного пучка. Во-первых, исследования методом рентгеновской рефлекто-интерферометрии не требуют использования сложных оптических схем и могут проводиться без необходимости вращения образца и/или детектора, что существенно расширяет спектр возможных образцов и вариантов их позиционирования. Фокусировка излучения на поверхности исследуемой структуры позволяет получить существенный выигрыш в интенсивности падающего излучения, а использование скоростных высокочувствительных детекторов позволяет получить высокое временное разрешение. Запись интерференционной картины за один снимок открывает возможность быстрого анализа радиационно не стойких материалов, включая биологические и органические структуры. А также позволяет проводить in-situ исследования, получая информацию о толщине, шероховатости и плотности пленки или структуры в режиме реального времени. Очевидно, что временное разрешение данного метода ограничено только чувствительностью детектора, с помощью которого происходит запись интерференционной картины.

Во-вторых, преимущество предлагаемого метода – высокое пространственное разрешение, которое достигается благодаря использованию преломляющей рентгеновской оптики. Это открывает новые возможности в исследовании тонкопленочных структур со сложной морфологией поверхности и/или с высокой шероховатостью. Кроме того, область анализа образца можно легко варьировать путем изменения размера фокального пятна на поверхности образца.

Метод рефлекто-интерферометрии может быть осуществлен как на синхротронных, так и на лабораторных микрофокусных источниках [22]. Кроме того, он обеспечивает преимущества по сравнению с классической рентгеновской рефлектометрией, так как позволяет проводить исследования с принципиально новым пространственным и временным разрешением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (Проект № 19-72-30009). Закупка тонкопленочных мембран была финансирована из средств программы повышения конкурентоспособности в БФУ им. И. Канта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gibaud A., Hazra S. // *Current Science*. 2000. V. 78. P. 1467.
2. Lekner J. *Theory of Reflection*. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1987.
3. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., & Lengeler B. // *Nature*. 1996. V. 384. № 6604. P. 49. <https://doi.org/10.1038/384049a0>
4. Lengeler B., Schroer C., TuÈmmler J., Benner B., Richwin M., Snigireva A., Snigireva I., Drakopoulos M. // *Journal of Synchrotron Radiation*. 1999. V. 6. №. 6. P. 1153. <https://doi.org/10.1107/S0909049599009747>
5. Serebrennikov D.A., Dudchik Y.I., Barannikov A.A., Klimova N.B., Snigirev A.A. // *Advances in Laboratory-based X-Ray Sources, Optics, and Applications VI*. International Society for Optics and Photonics, 2017. V. 10387. P. 103870H. <https://doi.org/10.1117/12.2274736>
6. Petrov A.K., Bessonov V.O., Abrashitova K.A., Kokareva N.G., Safronov K.R., Barannikov A.A., Ershov P.A., Klimova N.B., Lyatun I.I., Yunkin V.A., Polikarpov, M., Snigireva I., Fedyanin A.A., Snigirev A.F // *Optics Express*. 2017. V. 25. №. 13. P. 14173. <https://doi.org/10.1364/OE.25.014173>
7. Polikarpov M., Kononenko T., Ralchenko V., Ashkinazi E., Konov V., Ershov P., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigirev A. // *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XI*. International Society for Optics and Photonics. 2016. V. 9963. P. 99630Q. <https://doi.org/10.1117/12.2238029>

8. Roth T., Alianelli L., Lengeler D., Snigirev A., & Seiboth F. // MRS Bulletin. 2017. V. 42. № 06. P. 430. <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.117>
9. Chason E., Mayer T.M. // Critical Reviews in Solid State and Material Sciences. 1997. V. 22. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1080/10408439708241258>
10. Russell T.P. // Materials Science Reports. 1990. V. 5. № 4. P. 171. [https://doi.org/10.1016/S0920-2307\(05\)80002-7](https://doi.org/10.1016/S0920-2307(05)80002-7)
11. Parratt L.G. // Physical Review. 1954. V. 95. № 2. P. 359. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.359>
12. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Elsevier, 2013.
13. Shirley J.W. // American Journal of Physics. 1951. V. 19. № 9. P. 507. <https://doi.org/10.1119/1.1933068>
14. Thompson A., Vaughan D. X-ray Data Booklet. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.
15. Yasaka M. // The Rigaku J. 2010. V. 26. № 2. P. 1.
16. Kiessig H. // Annalen der Physik. 1931. B. 402. № 6. S. 715. <https://doi.org/10.1002/andp.19314020607>
17. Holy V., Baumbach T., Pietsch U. High-Resolution X-Ray Scattering from Thin Films and Multilayers. Springer, 1999.
18. Otendal M., Tuohimaa T., Vogt U., Hertz H.M. // Review of Scientific Instruments. 2008. V. 79. № 1. P. 016102. <https://doi.org/10.1063/1.2833838>
19. Kohn V., Snigireva I., Snigirev A. // Optics Communications. 2003. V. 216. № 4–6. P. 247. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)02285-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02285-X)
20. Silson Ltd, “Standard silicon nitride membrane windows,” <http://www.silson.com/index.html?content=standard>.
21. Ulyanenkova A. // Advances in Computational Methods for X-Ray and Neutron Optics. International Society for Optics and Photonics, 2004. V. 5536. P. 1. <https://doi.org/10.1117/12.563302>
22. Lyatun S., Zverev D., Ershov P., Lyatun I., Konovalov O., Snigireva I., Snigirev A. // J. Synchrotron Radiation. 2019. V. 26. № 5. P. 1572. <https://doi.org/10.1107/S1600577519007896>

X-Ray Reflecto-Interferometry Technique Using a Microfocus Laboratory Source

M. A. Voevodina^{1,*}, S. S. Lyatun¹, A. A. Barannikov¹, I. I. Lyatun¹, I. I. Snigireva^{2,**}, A. A. Snigirev^{1,***}

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia

²European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, 38043 France

*e-mail: voevodina.mariia@gmail.com

**e-mail: irina@esrf.fr

***e-mail: anatoly.snigirev@gmail.com

An X-ray interferometry technique using an X-ray microfocus laboratory source for thin-film structure research based on compound refractive lenses has been proposed. The main advantage of this technique is to use a very simplified experimental setup where a focused X-ray beam reflected from parallel flat surfaces creates an interference pattern in a wide angular range. Due to this, the interference pattern can be obtained in a single shot without the need to rotate the specimen or the detector. The applicability of this technique has been demonstrated using the Metal Jet Excillium micro-focus laboratory source, which has GaK α emission line at 9.25 keV. As a result, a series of interference patterns for test sample – free-standing thin-film membrane thick of 500 nm were observed. Based on the obtained results the main advantages of this technique such as high spatial and temporal resolution are shown, and also possible application of the reflecto-interferometry both at the laboratory and synchrotron radiation X-ray sources are proposed.

Keywords: spatial resolution, temporal resolution, interferograms, reflecto-interferometers, compound refractive lenses, X-ray interferometry.