

УДК 539.2

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗГИБНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС НА РЕНТГЕНОВСКИХ СЕКЦИОННЫХ ТОПОГРАММАХ В БРЭГГОВСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

© 2021 г. Э. В. Суворов^а, *, И. А. Смирнова^а

^аИнститут физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН,
Черноголовка, Московская область, 142432 Россия

*e-mail: suvorov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2021 г.

После доработки 24.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Методами секционной топографии и численного моделирования в геометрии Брэгга исследованы особенности образования интерференционных деформационных полос на секционных топограммах однородно изогнутых кристаллов. Исследована роль межветвевое рассеяния в образовании деформационных полос (изгибных контуров) в изогнутой решетке. Установлено, что волновое поле, формируемое в геометрии Бормана–Лемана, обладает очень высокой чувствительностью к локальным деформациям, связанным с дефектами кристаллической решетки. Показана возможность использования “изгибных интерференционных контуров” для измерений очень слабых деформаций поверхности, обусловленных квазиточечными дефектами. Установлено, что различия в интенсивности полос для положительного и отрицательного знака градиента изгиба связаны с различием в фокусировке нормальных и аномальных волн.

Ключевые слова: дифракция, интерференция, рентгеновские лучи, кристаллическая решетка, монокристаллы, интерференционные полосы, дефекты кристаллической решетки, локальные деформации.

DOI: 10.31857/S1028096021120232

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] впервые наблюдали и детально исследовали явления маятниковых осцилляций интенсивности рентгеновского излучения на клиновидных кристаллах в геометрии на прохождение. Эти дифракционные явления оказались очень эффективным методом прецизионных измерений атомных факторов рассеяния [3, 4]. Похожие интерференционные явления наблюдали и на плоскопараллельных кристаллах методами секционной топографии [1, 5]. На основе маятниковых полос разработаны методы однокристалльного рентгеновского интерферометра, позволяющие измерять локальные деформации кристаллической решетки, связанные с ее дефектами [6, 7].

Наблюдение аналогичных маятниковых осцилляций в брэгговской геометрии осложняется двумя факторами. Во-первых, интерференционные полосы в брэгговской геометрии быстро затухают с увеличением номера полосы, и, во-вторых, первичный пучок создает заметный фон, затрудняющий наблюдение таких полос.

В работе [8] описан принципиально другой тип интерференционных полос в брэгговской

геометрии, связанных с изгибом кристаллической решетки и получивших название деформационные интерференционные полосы. Это явление было исследовано экспериментально на кристаллах с аморфной окисной пленкой, при этом методами геометрической рентгеновской оптики был описан механизм образования деформационных полос [9–11].

В представленной работе методами секционной топографии и численного моделирования в геометрии Брэгга исследованы особенности образования интерференционных деформационных полос на секционных топограммах однородно изогнутых кристаллов. Исследована роль межветвевое рассеяния в образовании деформационных полос (изгибных контуров) в изогнутой решетки [12, 13]. Установлено, что волновое поле в геометрии Бормана–Лемана обладает очень высокой чувствительностью к локальным деформациям, связанным с дефектами кристаллической решетки [13]. Показана возможность использования “изгибных интерференционных контуров” для измерений очень слабых деформаций поверхности, обусловленных квазиточечными дефекта-

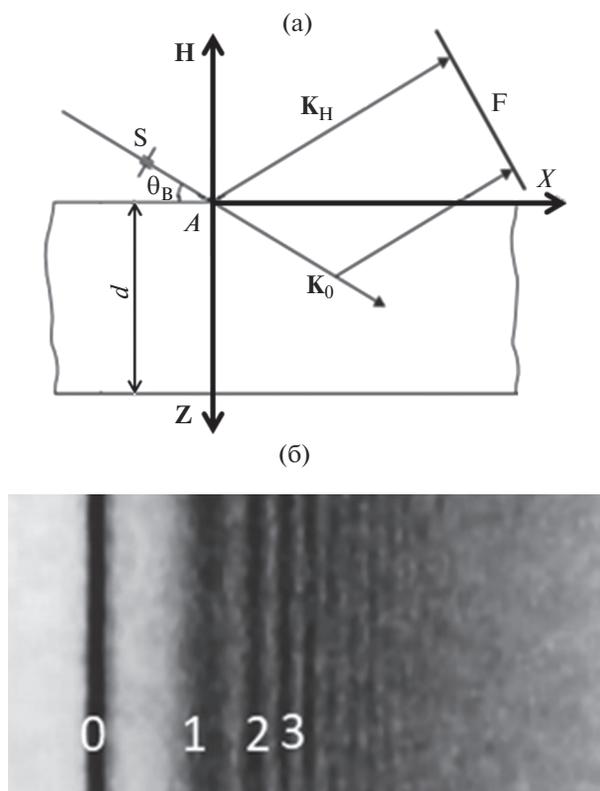


Рис. 1. Схема эксперимента: K_0 , K_H – волновые векторы падающей и дифрагированной волн; N – вектор дифракции; F – детектор; S – коллиматор; θ_B – угол Брэгга (а). Секционная топограмма монокристалла кремния, полученная в брэгговской геометрии: цифры на топограмме – номера первых трех изгибных контуров; радиус изгиба составляет -50 м; знак минус соответствует уменьшению градиента деформации вдоль оси Z ; яркая линия с индексом 0 соответствует краю топограммы (б).

ми. Установлено, что различия в интенсивности полос для положительного и отрицательного знака градиента изгиба связаны с различием в фокусировке нормальных и аномальных волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выполнения экспериментов на изогнутых кристаллах разработано и изготовлено гониометрическое устройство для прецизионного изгиба кристалла с радиусами изгиба в интервале порядка 10 – 300 м (прогиб кристалла для этого диапазона радиусов изгиба составляет ориентировочно 50 – 300 мкм) [14]. В результате многочисленных экспериментов и численного моделирования установлено, что изгибные контуры образуются в результате интерференции отраженной волны и волн межветвевое рассеяния, зарождающихся за счет градиента деформации, направленного вдоль радиуса изгиба кристалла, т.е. вдоль вектора дифракции. На секционной топограмме в гео-

метрии Брэгга наряду с обычными интерференционными контурами (они расположены на левом краю топограммы (рис. 1б) и сливаются в одну яркую линию с индексом 0) формируются изгибные контуры (1, 2, 3 и т.д.). На рис. 1 представлена схема эксперимента и пример экспериментальной топограммы. Топограмма получена на излучении MoK_{α} . Численное моделирование рентгеновского волнового поля (решения уравнений Такаги–Топена) позволяет увидеть геометрию формирования волнового поля на поверхности кристалла и понять механизм образования секционной топограммы.

На рис. 2 показаны волновые поля в идеальном кристалле и в кристалле с изгибом $R = -54$ м и $R = +54$ м. Обычные интерференционные полосы в брэгговской геометрии быстро затухают и на экспериментальной топограмме (рис. 1б) практически не видны. С уменьшением радиуса изгиба кристалла “полосы” сдвигаются в сторону меньших расстояний от брэгговского максимума. Увеличение радиуса изгиба, наоборот, приводит к смещению интерференционных полос в сторону от брэгговского максимума. При этом уменьшается их яркость, и полосы постепенно сливаются с фоном (при радиусах изгиба более 600 м). Необычно высокая чувствительность изгибных интерференционных контуров к локальным деформациям делает их чрезвычайно привлекательными для исследования слабых локальных поверхностных деформаций [13, 14].

На рис. 3 приведено изображение квазиточечного дефекта в однородно изогнутом кристалле. Изображение дефекта состоит из кинематического выброса интенсивности в виде черного пятна справа от брэгговского максимума и белого следа, перпендикулярного интерференционным полосам. Экспериментальная и расчетная топограммы демонстрируют смещение и изгиб контуров в деформационном поле дефекта. Изгиб отчетливо наблюдается только на расчетной топограмме. Это, по-видимому, связано с малой величиной интенсивности изогнутой части полосы и низким разрешением фотопластины (~ 5 – 7 мкм). Оценки смещения первой интерференционной полосы вблизи дефекта соответствуют локальному радиусу изгиба отражающей плоскости $R \approx 540$ м [12, 13].

Квазиточечные дефекты создавали уколом индентора Виккерса при нагрузках от 1 до 5 г. В данной модели предполагается, что смещения под поверхностью образца радиальны по отношению к точке контакта, а поверхности равных деформаций имеют полусферическую форму. Размер полусферического ядра оценивали из микротвердости по Виккерсу. Так, например, при нагрузке 5 г радиус ядра составлял 1.45 мкм и хорошо согласовывался с оптическими измерениями. Приведенный пример показывает, что этот метод может

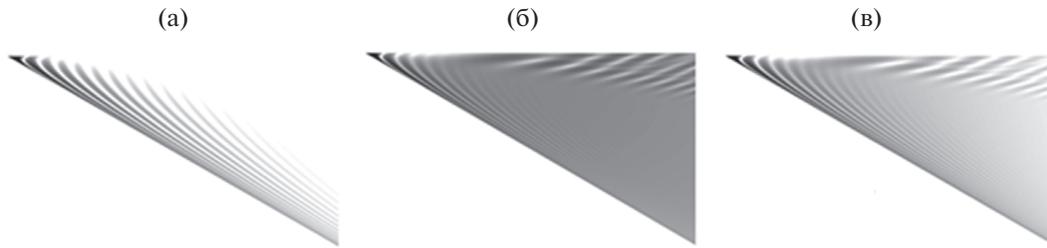


Рис. 2. Распределение интенсивности волнового поля в треугольнике рассеяния для отражения Si(004): излучение $\text{MoK}_{\alpha 1}$, угол Брэгга 15.141° . Высота каждого изображения составляет 900 мкм, ширина – 3326 мкм: а – идеальный кристалл; б – кристалл изогнут; радиус изгиба $R = -54$ м; в – радиус изгиба $R = +54$ м.

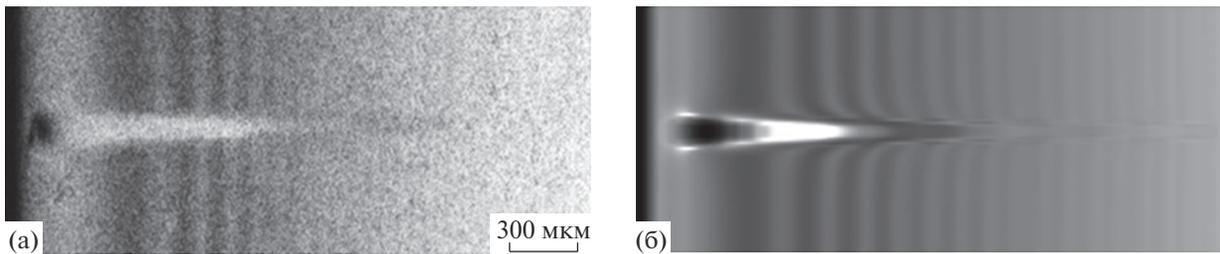


Рис. 3. Секционные топограммы монокристалла кремния с квазиточечным дефектом на поверхности: а – фрагмент экспериментальной секционной топограммы (брэгговское отражение (400), излучение $\text{MoK}_{\alpha 1}$, радиус изгиба кристалла 150 м, расстояние от кинетического изображения дефекта до следа брэгговского отраженного пучка $x = 190$ мкм); б – соответствующая численная топограмма, полученная путем решения уравнений Такаги–Топена.

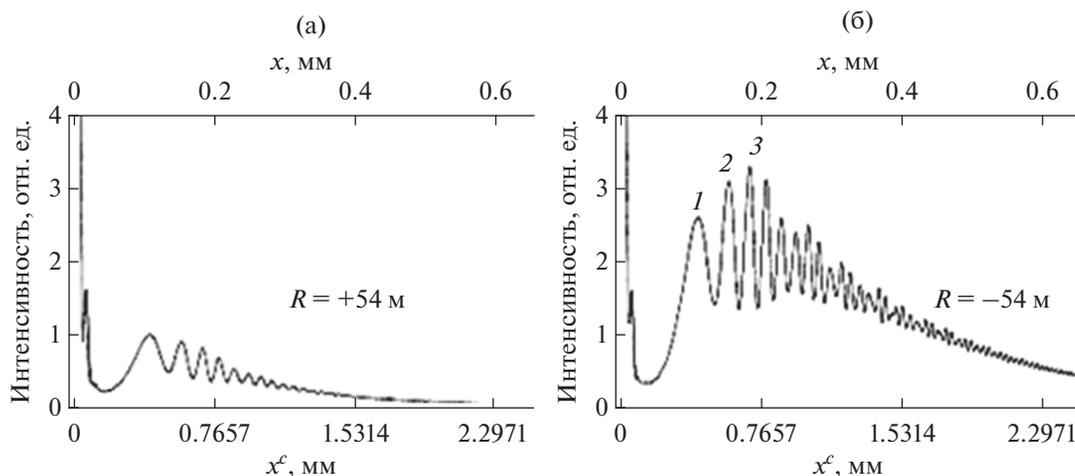


Рис. 4. Моделирование распределения интенсивности деформационных контуров на выходной поверхности кристалла. Неполаризованное излучение: x – координата в плоскости регистрации, x^c – вдоль поверхности кристалла $x = x^c \sin \theta_B$.

быть использован для измерений очень слабых деформаций поверхности.

Экспериментальные исследования показали, что при изменении знака изгиба кристалла сильно изменяется яркость деформационных полос. Из сопоставления рис. 2б и 2в также хорошо видно, что при положительном радиусе изгиба контраст деформационных полос существенно ниже.

Анализ этого интересного явления показывает, что оно может быть связано с особенностями распространения траекторий нормальных и аномальных волн [16]. Известно, что нормальные и аномальные волны межветвевое рассеяния, зарождающиеся за счет градиента деформации в изогнутом кристалле, имеют существенно различные коэффициенты поглощения. В дополнении к этому эффекту существует еще и фокусиров-

ка. Поэтому результат интерференции этих волн с отраженной волной на поверхности кристалла может отличаться по яркости деформационных (интерференционных) полос. На рис. 4 показан результат численного моделирования этого процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют понять физическую природу и механизмы образования деформационных контуров, образующихся на секционных топограммах в брэгговской геометрии. Деформационные контуры оказались очень чувствительны к локальным деформациям кристаллической решетки. Смещения контуров позволяют измерять величины локальных деформаций $\Delta d/d$ порядка 10^{-12} .

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Источник финансирования: Госзадание РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Authier A.* Dynamical Theory of X-Ray Diffraction. Oxford, 2001. P. 724.
2. *Kato N., Lang A.R.* // Acta Cryst. 1959. V. 12. № 4. P. 787.
3. *Hart M., Milne A.D.* // Acta Cryst. A. 1969. V. 25. P. 134.
4. *Tanemura S., Kato N.* // Acta Cryst. A. 1972. V. 28. P. 69.
5. *Суворов Э.В., Половинкина В.И., Никитенко В.И.* // ФТТ. 1971. Т. 13. № 9. С. 2692.
6. *Suvorov E.V., Polovinkina V.I., Nikitenko V.I., Indenbom V.L.* // PSS. 1974. V. 26. P. 385.
7. *Суворов Э.В., Горелик О.С., Пономарева Р.Р.* // Кристаллография. 1976. Т. 21. № 6. С. 1151.
8. *Zaumseil P.* // Krist. Tech. 1978. V. 13. P. 983
9. *Шульпина И.Л., Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н., Даниэльян К.Т.* // Тезисы Докл. IV Всесоюзного совещания "Дефекты структуры в полупроводниках". Изд-во СО АН СССР. Новосибирск, 1984. Ч. 2. С. 114.
10. *Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н., Шульпина И.Л., Кютт Р.Н.* // ФТТ. 1987. Т. 29. № 5. С. 1608.
11. *Chukhovskii F.N., Petrashen P.V.* // Acta Cryst. A. 1988. V. 44. № 8. P. 15.
12. *Смирнова И.А., Суворов Э.В., Шулаков Е.В.* // ФТТ. 2011. Т. 53. № 1. С. 35.
13. *Шулаков Е.В., Смирнова И.А., Суворов Э.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2003. № 6. С. 5.
14. *Суворов Э.В., Смирнова И.А., Образова А.С.* // ПТЭ. 2015. № 1. С. 1.
15. *Суворов Э.В., Смирнова И.А.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 18. С. 55.
16. *Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н.* // Кристаллография. 1971. Т. 16. № 6. С. 1101.

Features of Formation of Flexural Interferential Strips on X-Ray Section Topograms in Bragg Geometry

E. V. Suvorov^{1,*}, I. A. Smirnova¹

¹*Institute of Solid State Physics, the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russia*
*e-mail: suvorov@issp.ac.ru

In the presented work the features of formation of interferential deformation strips on uniformly curved crystals have been investigated by the methods of section topography and numerical modeling in Bragg geometry. The role of interbranch scattering in the formation of deformation strips (flexural contours) in a curved lattice has been investigated. It has been established that the wave field formed by Borrmann-Lehman effect has very high sensitivity to local deformations associated with defects of a crystal lattice. The possibility of use of "flexural interferential contours" for measurements of very weak surface deformations caused by quasidot defects is shown. It has been determined that differences in intensity of strips for the positive and negative sign of a gradient of a bend are associated with distinction in focusing of normal and abnormal waves.

Keywords: diffraction, interference, X-rays, crystal lattice, monocrystals, interferential strips, defects of a crystal lattice, local deformations.