

РЕНТГЕНОИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ЖЕСТКОМ ЛЛЛ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Т.О. ЭЙРАМДЖЯН*, Т.С. МНАЦАКАНЯН, Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: tigeuro@ysu.am

(Поступила в редакцию 9 апреля 2025 г.)

Исследован жесткий LLL интерферометр из бездислокационного монокристалла кремния, существенно отличающийся от ранее известных типов рентгеновских интерферометров. Такой интерферометр проявляет большую чувствительность как к изначально присутствующим, так и привнесенным дефектам в кристалле. В измененной части зеркального блока интерферометра генерировалось небольшое количество дислокаций, наличие которых подтверждается рентгеновскими топограммами. Получены интерферометрические изображения дислокаций, генерируемых в зеркальном блоке. Проведено численное моделирование отображения единичной краевой дислокации по рассмотренной схеме.

1. Введение

Реализация голографии в коротковолновом диапазоне рентгеновского излучения важна при изучении внутренних структурных дефектов непрозрачных для видимого света материалов, имеющих кристаллическую структуру. Совместное применение рентгеновской голографии, электронной микроскопии и оптической голографии особенно важно для обнаружения и изучения дислокаций в монокристаллах. Рентгено-голографические исследования открывают новые перспективы в различных областях микроэлектроники, медицинской диагностики и технике.

Для получения рентгеновских голограмм исследован модифицированный жесткий ЛЛЛ интерферометр, отличающийся от обычного LLL интерферометра [1–3]. Исследования проводились с использованием ранее испытанного [4–6] и модифицированного позднее жесткого трехблочного интерферометра для излучения $\text{MoK}\alpha$ ($\lambda = 0.71 \text{ \AA}$). Обязательными при изготовлении интерферометров являются условия идеальной геометрии и аномального прохождения лучей в интерферометре $\mu t \gg 1$ (μ – коэффициент линейного поглощения кристалла для данного излучения, t – толщины отдельных блоков интерферометра). Объектами исследования являются дислокации, возникающие в части зеркального блока интерферометра, интерференционные изображения которых были получены экспериментально.

В работах [7, 8] на основе численного интегрирования уравнений Такаги [9],

описывающих динамическую дифракцию рентгеновских лучей в деформированных кристаллах, смоделировано формирование изображения краевой дислокации в секционных и проекционных топограммах.

2. Описание эксперимента

Интерферометр изготовлен из бездислокационного монокристалла кремния, имеющего форму параллелепипеда, с отражающими плоскостями ($2\bar{2}0$), нормали которых совпадают с направлением роста монокристалла $[111]$, обеспечивая совпадение заранее выбранных кристаллографических плоскостей с соответствующими геометрическими плоскостями образца. Для изготовления интерферометров типа Лауэ [1] исходные размеры монокристалла (рис. 1а) должны удовлетворять условию $BB_1 = (BC - 3t) \tan \theta + c$, где θ – угол брэгговского отражения c – ширина коллимированного рентгеновского пучка ($c = 0.3$ мм). Для каждого из трех отражающих блоков интерферометра $\mu t \approx 7$ ($\mu = 15.6 \text{ см}^{-1}$). В отличие от обычных LLL интерферометров данный интерферометр имеет две разделяющие полости между основанием и потолком (рис. 1б).

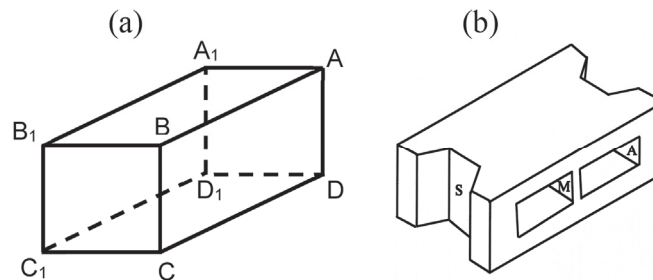


Рис.1. (а) Схема определения начальных размеров кубообразного монокристалла: $B_1B = 15$ мм, $BC = 30$ мм, (б) схема жесткого интерферометра (S – расщепитель, М – зеркало, А – анализатор).

Полости формируются с помощью абразивных порошков и металлических трубок, вращающихся с большой угловой скоростью, после чего им придают прямоугольную форму с помощью специально подготовленных сверхточных металлических пластин и абразивного порошка. На рис.2а показан процесс изготовления интерферометра. Далее, первая половина зеркального блока готового интерферометра (рис.1б) была разделена на две равные части без нарушения целостности интерферометра (рис.2б). Первая часть сохраняет связь с основанием и потолком, верхняя часть второй половины отделена от потолка, а нижняя часть сохраняет связь с основанием, образуя единое целое. Это соединение с основой является продолжением кристалла через шейку.

После завершения модификаций интерферометр подвергается химической обработке, которая сопровождается резким повышением температур раствора и интерферометра и способствует образованию дислокаций в модифицированной части зеркального блока.

Изготовление интерферометра сопровождается измерениями расстояний между блоками и их толщин. Допускаемые погрешности отклонений не должны превышать 8 мкм. Измерения производились в течение всего процесса с помощью высокоточных механооптических приборов. После изготовления интерфе-

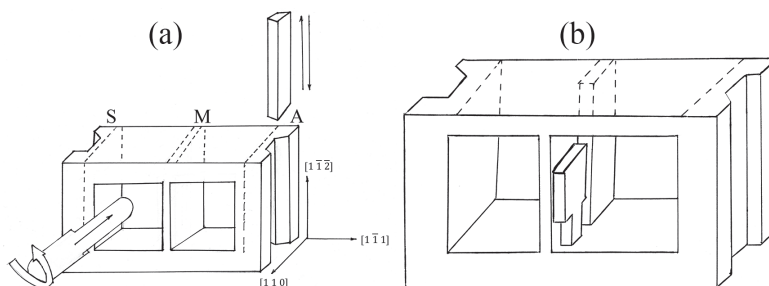


Рис.2. (а) Схема изготовления жесткого интерферометра, (б) схематическое изображение модифицированного интерферометра.

рометра был сделан ряд рентгенотопографических съемок как из его отдельных участков, так и из целых блоков (рис.3а,б). В топограммах отчетливо видны дислокации, образовавшиеся в одной части зеркального блока.

В другой части зеркального блока дислокации отсутствуют, что также видно из одновременно полученных топограмм от двух половин зеркального блока (рис.3с).

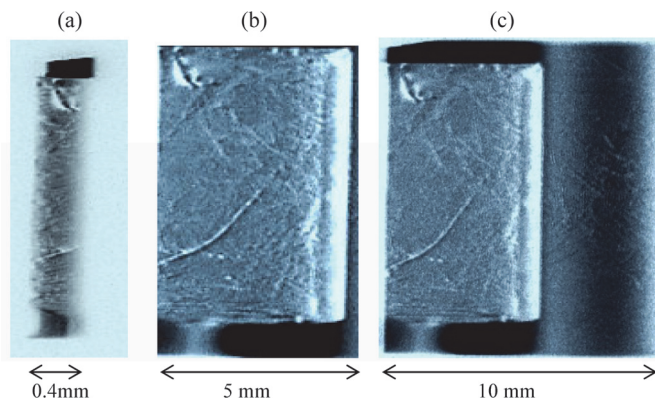


Рис.3. (а) Рентгеновская топограмма ограниченной области зеркального блока, (б) топограмма измененной области зеркального блока, где четко видны дислокации, (с) топограмма двух половин зеркального блока (в правой части зеркального блока дислокации отсутствуют).

На снимках за анализатором были получены голографические изображения дислокаций, возникших в одной части зеркального блока. Голографические изображения, полученные из разных частей зеркального блока интерферометра, представлены на рис.4. При этом на голографических рентгенограммах отсутствует прямое топографическое изображение каких-либо дислокаций или муаров. На основе полученных в ходе экспериментов снимков можно заключить, что они являются голографическим представлением дислокаций, присутствующих в модифицированном среднем блоке.

Эксперименты проводились с модифицированной рентгеновской дифракционной камерой Ригаку. Коллимированный пучок падает на первую пластину интерферометра, с помощью которой производится окончательная юстировка интерферометра и его приведение в рабочее состояние. Длина рентгеновского коллиматора составляет 400 мм, ширина падающего на интерферометр пучка –

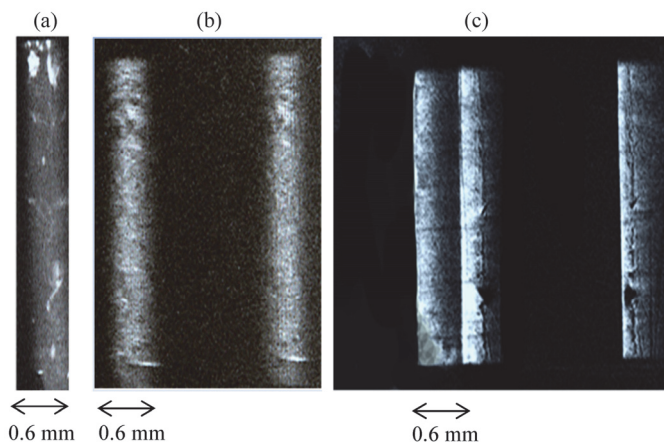


Рис.4. Интерферометрические изображения, полученные из разных частей зеркального блока интерферометра. Рентгенограммы сделаны (а) с левого края, (b) с правого края и (с) от центральной части зеркального блока.

0.3 мм, высота – 10 мм. Следует отметить, что жесткий интерферометр устанавливался на угломерную головку без использования клеев и каких-либо приспособлений, что исключает возникновение неконтролируемого муара. Это важное условие, поскольку «жесткий» интерферометр очень чувствителен даже к ничтожным механическим воздействиям, вызванным физическим воздействием клея или фиксирующего устройства.

Учитывая высокую чувствительность жесткого интерферометра к дефектам в монокристалле и обобщая полученные экспериментальные результаты, можно утверждать, что получены голографические изображения дислокаций. Съемки проведены от разных частей зеркального блока интерферометра. Поскольку распределение дислокаций в модифицированном зеркальном блоке интерферометра неоднородно по объему, полученные голографические изображения отличаются друг от друга (рис.4а,б,с).

3. Численное моделирование

Методом численного моделирования представлено отображение прямолинейной краевой дислокации, находящейся во втором блоке интерферометра, поперек волнового пакета, отраженного от первого кристаллического блока (см.рис.5). Предполагается, что линия дислокации перпендикулярна входной поверхности кристаллической пластины: вектор Бюргерса $\mathbf{b}$ антипараллелен вектору обратной решетки $\mathbf{h}$ рассматриваемого отражения. Рассматривается симметричная геометрия дифракции Лауэ, так что вектор $\mathbf{b}$ параллелен входной поверхности пластины. Для x -проекции поля смещения кристаллической решетки, вызванной наличием дислокации, взято выражение из работы [10]:

$$u_x(x, y) = \frac{b}{2\pi} \left[\arctan \frac{y}{x} + \frac{xy}{2(1-\nu)(x^2 + y^2)} \right],$$

где ν – коэффициент Пуассона (в расчетах принято значение $\nu = 0.28$), (x, y, z) – декартова система координат с осями x и z в плоскости рассеяния (x параллельна,

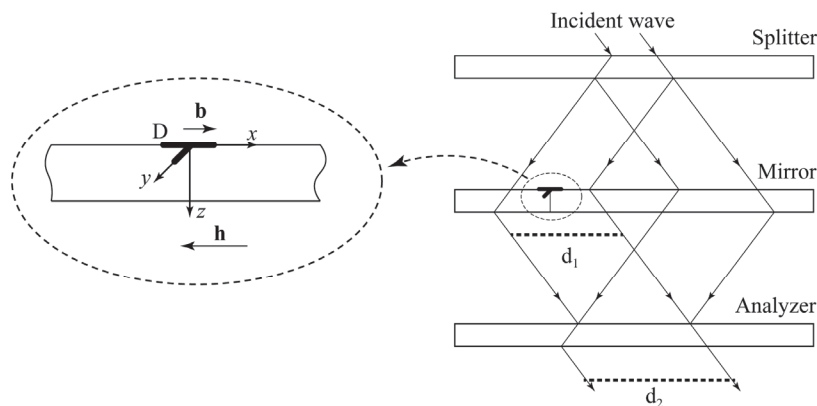


Рис.5. Схематическая картина хода лучей в интерферометре, а также расположение дислокации и детекторов при численном моделировании.

а z перпендикулярна входной поверхности пластины) и осью y – перпендикулярной плоскости рассеяния. Линия дислокации проходит через точку $x = y = 0$ входной поверхности пластины. Остальные параметры численного интегрирования (источник излучения, кристалл, отражающие плоскости, общая геометрия интерферометра и т.д.) совпадают с выше представленными данными физического эксперимента. Интегрирование уравнений Такаги проведено по алгоритму, представленному в работах [11–13]. На рис.6 представлены смоделированные топограммы рентгеновских пучков – (а) дифрагированной от левой половины зеркального блока и (б) отраженной от анализатора интерферометра, что приводит к резкому повышению чувствительности отображения.

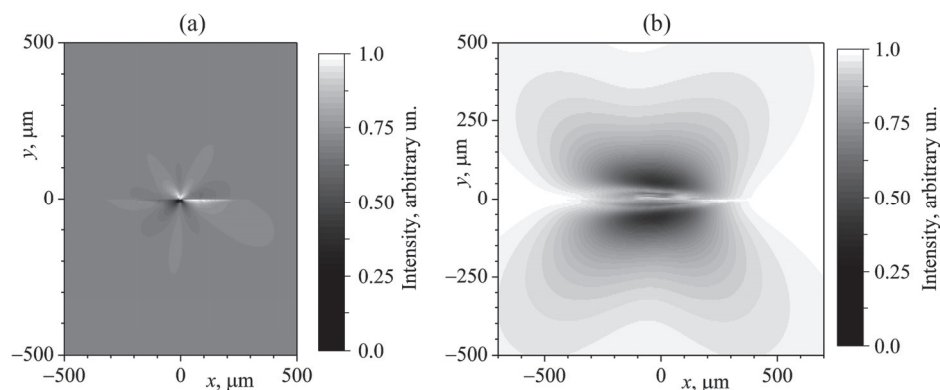


Рис.6. Численно моделированные отображения дислокации: (а) топограмма левой половины зеркального блока, (б) интерферометрическое отображение дислокации в дифрагированном от третьего блока пучке (детекторы d_1 и d_2 , соответственно, представленные на рис.5).

4. Заключение

Экспериментально исследован модифицированный жесткий интерферометр LLL типа. В отличие от обычного LLL интерферометра, жесткий LLL интерферометр имеет не только основание, но и «потолок». Вследствие этой особенности жесткий интерферометр не приводит к образованию неконтролируемых

муаровых полос. Он весьма чувствителен к механическим напряжениям, а также к дефектам, присутствующим в кристаллической решетке, в частности к дислокациям.

В части зеркального блока интерферометра было введено небольшое количество дислокаций, наличие которых четко видно в ряде топограмм. Экспериментально получены интерферометрические отображения введенных в зеркальный блок дислокаций для различных частей зеркального блока.

Проведенное численное моделирование отображения прямолинейной краевой дислокации показывает высокую чувствительность рассмотренного интерференционного метода отображения искажений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **U. Bonse, M. Hart.** Appl. Phys. Lett., **6**(8), 155 (1965).
2. **U. Bonse, M. Hart.** Z. Phys., **188**, 154 (1965).
3. **Т. Еурамжян, Т. Мнатсакянан.** J. Contemp. Phys., **59**, 342 (2024).
4. **А. Ростомян, М. Месропян, С. Нариманян, А. Григорян.** Патент СССР 1458781 А1.
5. **Т. Еурамжян, Т. Мнатсакянан, М. Бальян.** Acta Cryst. A, **74**, 595 (2018).
6. **Т. Еурамжян, М. Месропян, Т. Мнатсакянан, М. Бальян.** Acta Cryst. A, **76**, 390 (2020).
7. **И. Смирнова, Э. Суворов, Е. Шулаков.** ФТТ, **49**, 1050 (2007).
8. **I. Smirnova, E. Shulakov, E. Suvorov.** Phys. Solid State, **61**, 1444 (2019).
9. **S. Takagi.** J. Phys. Soc. Japan, **26**, 1239 (1969).
10. **Д. Хирт, И. Лоте.** Теория дислокаций, Москва: Атомиздат, 1972.
11. **A. Authier, C. Malgrange, and M. Tournarie.** Acta Cryst. A, **24**, 126 (1968).
12. **Y. Epelboin.** Acta Cryst. A, **33**, 758 (1977).
13. **Y. Epelboin.** Materials Science and Engineering, **73**, 1 (1985).

X-RAY INTERFEROMETRIC IMAGING OF DISLOCATIONS GENERATED IN HARD LLL INTERFEROMETER

T.H. EYRAMJYAN, T.S. MNATSAKANYAN, L.A. HAROUTUNYAN

A hard LLL interferometer made of dislocation-free silicon single crystal has been investigated that differs significantly from previously known types of X-ray interferometers. Such an interferometer is highly sensitive to both initially present and introduced defects in the crystal. Several dislocations were generated in the modified part of the mirror block of the interferometer, which is confirmed by X-ray topograms. Interferometric images of dislocations generated in the mirror block were obtained. The numerical simulation of the imaging of a single edge dislocation is carried out according to the considered scheme.