УДК 548.732

ОТОБРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАУЭ-БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

Р.Ц. ГАБРИЕЛЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 ноября 2004 г.)

Экспериментально исследована лауэ-брэгговская дифракция в геометрии Бормана-Лемана для толстых кристаллов, позволяющих получить изображение поверхностных дефектов (искажений) от боковой грани плоскопараллельной кристаллической пластинки как в отраженном, так и в проходящем пучках. Установлено, что чувствительность лауэ-брэгтовской дифракции к поверхностным искажениям намного выше, чем в случае обычных топографических методов.

Современные микроэлектронные приборы создаются в очень узком приповерхностном слое, а иногда и на поверхности кристалла. Задача применяемого диагностичского метода состоит в определении типа, характера и распределения дефектов, особенно на приповерхностных слоях кристаллов. В настоящее время наряду с другими диагностичскими методами широко применяются и разные ренттенографические методы. Естественно полагать, что предпочтение отдается тем методам, чувствительность которых наиболее высока. В связи с этим большой интерес вызывает рентгеновская интерферометрия, обладающая сверхчувствительностью к нарушениям периодов решетки кристаллов (вплоть до $\Delta d/d = 10^{-8}$). К сожалению, этот сверхчувствительный метод имеет очень ограниченное применение. Это связано с тем, что можно исследовать только тот кристалл, из которого сделан интерферометр. Несмотря на это, а также на трудности, связанные с изготовлением интерферометра (требуется большая точность), в задачах по выявлению незначительных дефектов в почти идеальных кристаллах рентгеновская интерферометрия просто незаменима. На примере рентгеновской интерферометрии можно сделать однозначный вывод - сверхчувствительными являются те методы, в которых осуществляется интерференция дифракционных пучков.

Оказывается, что если в ограниченном кристалле сочетать одновременное отражение и по Лауэ, и по Брэггу, то можно получить интерференционную картину в одной кристаллической пластинке, которая после исследования вполне пригодна для дальнейшего использования. Этим можно объяснить большой интерес, который проявляют исследователи к данной задаче дифракционной оптики [1-3].

Очевидно, что такую схему можно реализовать, если кристаллическая пластинка ограничена и с боковой стороны, т.е. когда точка падения первичного излучения находится довольно близко к боковой грани кристаллической пластинки. Такую схему впервые осуществили Борман и Леман на монокристалле кремния излучением Си Ка₁ [4,5]. Волновое поле, возникающее в кристалле в угловом интервале 2θ между векторами S₀ и S₁, распространяется до выходной грани, а другая часть, достигающая боковой грани, подвергается отражению по Брэггу. Таким образом, во-первых, реализуется дифракция и по Лауэ, и по Брэггу в одном и том же кристалле, а во-вторых, происходит интерференция между разными частями волнового поля.

В работе [1] расчеты сделаны в приближении падающей сферической волны. Дифракционная картина представляется как результат действия двух точечных источников излучения, расположенных симметрично боковой грани. Авторы приводят выражение для волн, прошедших через кристалл без отражения на боковых гранях, и для волн, претерпевших такое отражение.

Исследование по схеме Бормана-Лемана на синхротронном излучении проведено в работах [1,6] на кристалле алмаза при малом поглощении ($\mu_0 t=1.6$, $\mu_0 t=0.47$). По результатам теоретических расчетов и проведенных экспериментов делается вывод, что для обнаружения дефектов кристаллической решетки схема Бормана-Лемана является очень чувствительной, а с точки зрения технического осуществления схема является довольно простой по сравнению с методом на двухкристальных спектрометрах.

Демонстрации высокой чувствительности метода по отображению дефектов на боковой поверхности была посвящена работа [2]. В этой работе теоретические расчеты проведены на основе формул, полученных в [1]. Экспериментально и методом компьютерного моделирования изучено формирование приповерхностных дефектов в зависимости от их положения относительно треугольника потока энергии. Показано, что изображение дефектов в кристаллах высокого совершенства определяется двумя типами контрастов – кинематическим и динамическим. На основе полученных рентгенограмм высокого качества авторами делается вывод, что кинематический контраст связан с изменениями межплоскостных расстояний и ориентации отражающих плоскостей вблизи ядра дефекта, а динамический контраст проявляется в виде интерференционных полос вокруг изображения дефекта и связан с дальними полями напряжений.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению некоторых аспектов влияния дефектов боковой грани кристаллической пластинки на формирование волнового поля по схеме Бормана–Лемана для толстых кристаллов.

Образцы были изготовлены из высокосовершенного монокристалла кремния, их толщина после механической и химической обработки составила около 16 мм, т.е. для Мо К α_1 излучения $\mu_0 t = 23$. Эксперимент проводил-

ся на установке УРС-2 с помощью рентгеновской камеры А-3 фирмы Regaku Denki, были использованы рентгеновские трубки БСВ-25, диаметр фокусного пятна 0,1 мм.

Для коллимации первичного пучка использовалась жесткая шель шириной 0,4 мм около трубки, а также еще одна шель перед образцом, ширину и высоту которой можно изменять с помощью микровинтов. В процессе эксперимента размеры щели составляли 0,1×10 мм. Дифракционное изображение регистрировалось на рентгеновской пленке типа Primax RDX-58. Камера была снабжена сканирующим механизмом, который был использован для юстировки и топографии образцов. Чтобы определить состояние поверхностей кристалла после механической и химической обработки, была снята топограмма от боковой грани кристалла. Топограмма не выявила каких-либо существенных искажений поверхности. Отражающая плоскость (220) параллельна боковой поверхности. Большая толщина образцов дала возможность регистрировать дифракционные пучки не только в направлении отражения, но и в направлении первичного пучка. Это имеет существенное значение, т.к. при маленьких толщинах последний сливается со следом первичного пучка и информация, содержащаяся в нем, теряется.

В наших экспериментах, несмотря на большую толщину кристалла, след падающего непрерывного излучения также сильно расширялся и нам пришлось использовать свинцовый поглотитель (k) толщиной 1 мм (см. рис.1а). Результат применения поглотителя хорошо виден на рис.26, где верхняя часть первичного пучка получена без поглотителя. Из рис.1 и 2 видно, что поглотитель не полностью устраняет след первичного излучения на рентгенограммах, но довольно сильно сужает его, превращая в тонкую линию, которая необходима для геометрических расчетов.



Рис.1. Схема эксперимента (а). Полученная рентгенограмма (b).



Рис.2. Образец со слегка отшлифованной областью в центральной части боковой грани (затемненная полоска) и свинцовый экран на выходной поверхности (а). Схема эксперимента та же самая, что и на рис.1а. Полученная рентгенограмма (b).

На рис.1 расстояние точки падения первичного излучения от боковой поверхности составляет 1,1 мм. Режим съемки 35–40 кВ, 10 мА, время экспозиции 4–8 часов.

Из полученной рентгенограммы, приведенной на рис.16, видно, что лучи внутри кристалла, достигающие области ВС на боковой грани, полностью отражаются. Об этом свидетельствует почти нулевая интенсивность соответствующей области ab в дифрагированном пучке – в направлении первичного пучка. Неравномерное распределение интенсивности (разрезанная форма) в рефлексах b и с свидетельствует о дефектной поверхности ВС. С одной стороны, это доказывает, что как бы тщательно мы не проводили механическую и химическую обработку кристалла, полученные поверхности нельзя считать идеальными: они содержат некоторые микрошероховатости, выявление которых недоступно обычным топографическим методам. С другой стороны, обнаружение таких незначительных поверхностных дефектов свидетельствует о высокой чувствительности метода Бормана-Лемана. А высокая чувствительность, в свою очередь, является результатом интерференционного взаимодействия прошедшей и зеркально отраженной волны от боковой поверхности кристалла. Принципиальное значение имеет то обстоятельство, что эти волны принадлежат различным точкам возбуждения на одной и той же ветви (слабопоглощающей) дисперсионной поверхности и поэтому не исчезают при наличии сильного поглощения (толстого кристалла). Об этом свидетельствуют одинаковые распределения интенсивностей (контрастность) в этих рефлексах. В данной точке рефлекса увеличение или уменьшение интенсивности обусловлено фазовыми соотношениями между интерферирующими волнами, которые связаны с характером дефекта в соответствующей точке на боковой поверхности.

В рентгенограммах, полученных нами, не наблюдаются интерференционные линии (полосы) в направлении дифракционного вектора, которые хорошо видны в работе [2]. Это объясняется разницей используемых экспериментальных параметров (диаметр фокусного пятна, ширина входной щели, разрешение используемой рентгеновской пленки и т.д).

Для сравнительного анализа важно исследование таких поверхностных дефектов, изображение которых легко получается и традиционными топографическими методами. С этой целью слегка была отшлифована центральная часть боковой поверхности кристалла в виде полоски (рис.2а). Одновременно, чтобы определить распределение волновой энергии на выходной грани образца, был использован свинцовый экран определенной формы на выходной грани кристалла (рис.2b). Изучение полученных рентгенограмм показало, что поток энергии в кристалле, в основном, находится в области, непосредственно примыкающей к боковой грани, и медленно спадает с удалением от боковой грани. На расстоянии 0.4 мм от боковой грани имеет место сильное излучение в дифрагированных пучках как в отраженном, так и в падающем направлениях. Интенсивность, соответствующая искаженной (отшлифованной) части боковой грани, полностью отсутствует в пучке, дифрагированном в направлении первичного пучка, а в отраженном пучке интенсивность сильно увеличена и приобрела тонкую структуру, имеющую высокую контрастность. Фактически, вследствие макроискажений боковой грани возникает явление переброса интенсивности от проходящего пучка к отраженному. Явление переброски интенсивности пучка, дифрагированного в направлении падающего излучения, в направление отраженного пучка под влиянием внешних воздействий (ультразвук, температурный градиент и т.д) экспериментально хорошо изучено [7], но оно имеет место при слабом поглощении (µ0t~1) и с увеличением поглощения полностью исчезает. Этот результат (явление переброски интенсивности при больших поглощениях) будет способствовать, с одной стороны, поиску более всестороннего объяснения явления переброски интенсивности, а с другой стороны, раскрывает возможность схемы Бормана-Лемана по изучению дефектной структуры поверхностей монокристаллов.

Для более глубокого изучения дифракции в ограниченном кристалле (распределение волновых полей, направление потока энергии, а также изображение поверхности дефектов и их влияние на вышеупомянутые характеристики) проводился эксперимент и по другой схеме, когда первичное излучение падает в ту же точку *E* входной поверхности, но с другой стороны отражающих плоскостей (рис.3а). Иными словами, мы поворачивали образец вокруг вертикальной оси на угол 2*θ*. Одновременно на боковой грани кристалла, кроме горизонтальной искаженной области, такая же отшлифованная полоска создавалась и в вертикальном направлении на расстоянии 5 мм от края образца (рис.3b). Отметим, что созданный вертикальный дефект находится в пределах палатки Бормана. Схема эксперимента, вид бокового блока, а также полученная рентгенограмма приведены на рис.3.

Фактически, нижняя часть кристалла по-прежнему оставалась без искажений (совершенной), что нужно было для сравнения картин полученных рефлексов от совершенной и искаженной областей. Картина, полученная от



Рис.3. Схема эксперимента (а). Вид боковой поверхности с отшлифованными областями (b). Полученная рентгенограмма (c).

нижней (совершенной) части образца, как и следовало ожидать, почти полностью повторяет результат прежней схемы эксперимента (рис.1b) - неравномерное (полосатое) распределение интенсивности по высоте рефлекса. Оба рефлекса, как и прежде, со стороны, прилегающей к боковой грани образца, имеют разрезанную структуру и одинаковую контрастность. Общая интенсивность этих рефлексов намного ниже, чем при первой схеме эксперимента, ниже также контрастность их тонкой структуры. Понижение общей интенсивности рефлексов объясняется тем, что основная доля падающей интенсивности уносит с собой мощное отражение по Лауэ, происходящее в точке Е, которая затем только частично отражается от боковой грани обратно в кристалл и участвует в дальнейшем формировании волнового поля в кристалле. В рентгенограмме (рис.3с) отраженный пучок в точке Е представлен сильным рефлексом d, верхняя часть которого в области, охватывающей дефект в виде вертикальной полоски на боковой грани, сопровождается параллельным тонким рефлексом е. Появление рефлекса е свидетельствует о том, что оставшаяся часть энергии в кристалле, поток которой направлен в основном по отражающим плоскостям, выбрасывается из кристалла в области вертикального дефекта. Подтверждением этому служит тот факт, что в верхних областях рефлексов с и b интенсивность полностью отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. T.Saka, T.Katagava, N.Kato. Acta Cryst., A28, 102 (1972).
- 2. Е.В.Шулаков, И.А.Смирнова, Э.В.Суворов. Поверхность, №1, 100 (2002).
- 3. A.R.Lang, G.Kowalski, A.P.W.Makepeace, M.Moore. Acta Cryst., A42, 501 (1986).
- G.Borrmann, K.Lehmann. In: Crystallography and Crystal Perfection. London, Academic Press, 1963, pp.101-108.

5. K.Lehmann, G.Borrmann. Z. Crystall., 125, 234 (1967).

6. A.R. Lang, G.Kowalski, A.P.W.Makepeace. Acta Cryst., A46, 215 (1990).

7. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян. ЖТФ, 8, 677 (1982).

ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԱՅԻՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ԱՐՏԱՊԱՏԿԵՐՈՒՄԸ ԼԱՈՒԵ-ԲՐԵԳՅԱՆ ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՅԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ռ.Ց. ԳԱԲՐԻԵԼՅԱՆ

Փորձնականորեն ուսումնասիրված է լաուե-բրեգյան դիֆրակցիան Բորման-Լեմանի երկրաչափությամբ հաստ բյուրեղների համար, որը հնարավորություն է ընձեոնում ստանալ հարթ զուգահեռ թիթեղի կողային մակերևույթի արատների պատկերը ինչպես անցնող, այնպես էլ անդրադարձող փնջում։ Հաստատված է, որ լաուե-բրեգյան դիֆրակցիայի միջոցով մակերևույթային արատների արտապատկերման զգայունությունը էապես գերազանցում է սովորական տոպոգրաֆիկ մեթոդների զգայունությունը։

SURFACE DEFECT MAPPING BY THE LAUE-BRAGG DIFFRACTION

R.Ts. GABRIELYAN

The Laue-Bragg diffraction for thick crystals with the Borrmann-Lehmann geometry is investigated experimentally which makes possible to obtain the defect patterns of the lateral surfaces of plane reflected beams. It is shown that the sensitivity of the surface defect mapping by the Laue-Bragg diffraction is essentially higher than that of usual topographic methods.