

О РАСЩЕПЛЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛАУЭ-ОТРАЖЕНИЙ
И ОБРАЗОВАНИИ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ
В КРИСТАЛЛАХ

В. И. АВУНДЖЯН, П. А. БЕЗИРГАНЯН, Г. М. АЛАДЖАДЖЯН

Экспериментально исследовано расщепление лауэ-рефлексов при съемке в моно- и полихроматическом излучении кристаллов различной толщины и с различным состоянием поверхностей.

Явление расщепления лауэ-пятен, полученных от кристаллов кварца, было впервые обнаружено Сакисака и Сумото [1]. Такое расщепление наблюдалось также на лауэ-пятнах, полученных от разных кристаллов. Рядом авторов [2—9] предложены различные и порой противоречивые объяснения этого явления. Некоторые из предложенных схем расщепления приведены на рис. 1.

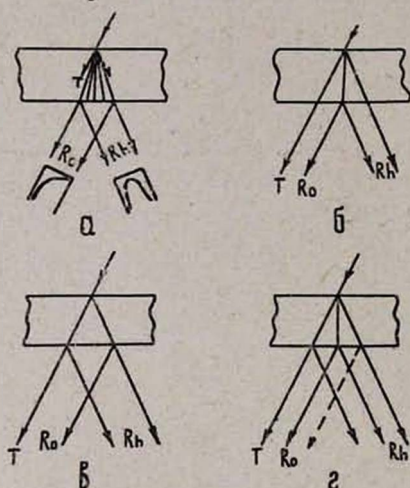


Рис. 1. Схемы различных механизмов расщепления лауэ-рефлексов: а) тонкий ($\mu t \ll 1$) совершенный кристалл с протравленными поверхностями; б) толстый ($\mu t \gg 1$) совершенный кристалл с отшлифованной поверхностью входа; в) кристалл средней ($\mu t \approx 1$) толщины с отшлифованными поверхностями входа и выхода; г) толстый совершенный кристалл с отшлифованными поверхностями входа и выхода; μ — линейный коэффициент поглощения, t — толщина кристалла.

С целью выяснения этого явления и вообще структуры лауэ-рефлексов в настоящей работе исследованы лауэ-отражения в случае монохроматического и полихроматического падающих пучков. Исследовано также влияние толщины и состояния поверхностных слоев кристалла на эти отражения.

В случае полихроматического падающего пучка исследование структуры лауэ-пятен проведено на высокосоввершенных кремниевых кристаллических пластинках толщиной 1÷8 мм. Пучок рентгеновского излучения из Мо-анода после коллимации двумя диафрагмами с диаметром 0,5 мм, установленными на расстоянии 60 мм друг от друга, падал на кристаллическую пластинку перпендикулярно к ее поверхности. Лауэ-пятна регистрировались на рентгеновской пленке, установленной перпендикулярно к проходящему пучку.

Поверхности образцов после травления шлифовались. На рис. 2 приведены изображения лауэ-пятен от кристаллов, у которых отшлифованы либо поверхность входа, либо поверхность выхода, или обе вместе. Когда отшлифованы обе поверхности, лауэ-пятна расщепляются на два компонента (рис. 2а): один соответствует поверхности входа, другой — поверх-

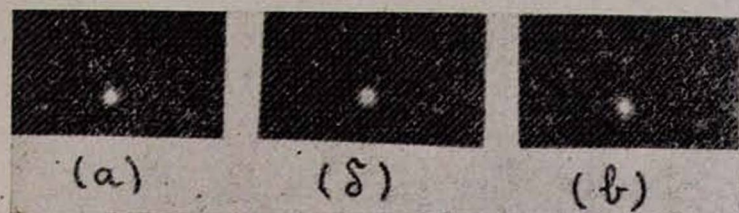


Рис. 2. Изменение структуры лауэ-пятен кристалла кремния толщиной в 3 мм при последовательной шлифовке поверхностей входа и выхода: а) отшлифованы поверхности входа и выхода; б) отшлифована только поверхность выхода; в) отшлифована только поверхность входа.

ности выхода. Измерение расстояний компонентов от центрального пятна (следа проходящего пучка) указывает на их образование по схеме рис. 1в. Они образуются в результате увеличения интенсивности отражения от поверхностей входа и выхода, происходящего вследствие образования на них дефектов в процессе шлифовки. Это дополнительно подтверждается тем, что когда шлифуется только поверхность входа или выхода, то появляется лишь компонент соответствующей поверхности (рис. 2б и в). Появление диффузного максимума, наблюдаемого в промежутке между этими компонентами в случае толстых кристаллов, объясняется эффектом Бормана (рис. 1г).

Таким образом, расщепление лауэ-пятен, обычно наблюдаемое от высокосовершенных кристаллов, является следствием дефектов, образовавшихся на поверхностях кристалла, и происходит в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1в. Причиной образования дефектов может явиться резка, шлифовка или полировка. Они могут образоваться также в результате окисления поверхностного слоя, поверхностного натяжения и т. д.

Исследование структуры лауэ-отражений в случае монохроматического падающего пучка было проведено на высокосовершенных кристаллических пластинках кремния с отражающими плоскостями (220), перпендикулярными к поверхности. Пучок рентгеновских лучей от Mo -анода с фокусным пятном $0,02 \times 8$ мм² после прохождения через щель шириной в 0,1 мм монохроматизировался при помощи кристалла кварца, установленного в положение отражения $Mo K_{\alpha_1}$. Кремниевый образец находился на расстоянии 400 мм от монохроматора и был установлен в положении ($n, -n$) отражения. Рентгеновская пленка помещалась перпендикулярно к отраженному пучку таким образом, чтобы на ней можно было регистрировать также проходящий пучок. Толщина образцов составляла 0,3–16,5 мм.

В случае, когда отшлифованы обе поверхности образца, изображения отраженного по Лауэ пучка R_n и пучка R_0 , дифрагированного по направ-

лению проходящего пучка T (рис. 3), представляющие собой вертикальные полосы, имеют пятнистую структуру со слоями, идущими поперек этих

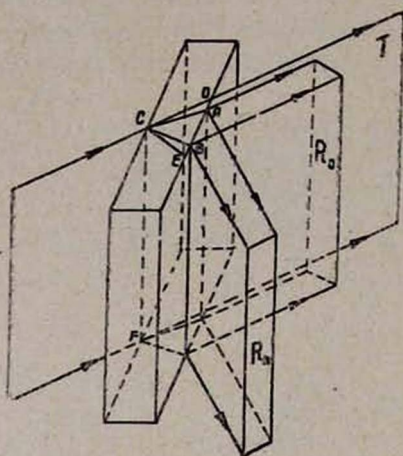


Рис. 3. Схема образования треугольного веера Бормана и пучков R_0 , R_h и T при лентообразной форме падающего пучка.

полос (рис. 4). Когда толщина образца составляет 5 мм или меньше, по краям изображения пучка R_h появляются интенсивные компоненты аналогично вышеописанным компонентам, возникающим при расщеплении лауэ-пятен. Они имеют вид вертикальных линий, параллельных упомянутым полосам (рис. 4в, г). С уменьшением толщины кристалла эти компоненты приближаются друг к другу и одновременно становятся более интенсивными. Однако, когда кварцевый монохроматор снимается и падающий пучок становится полихроматическим, компоненты появляются независимо от толщины кристалла (рис. 4д).

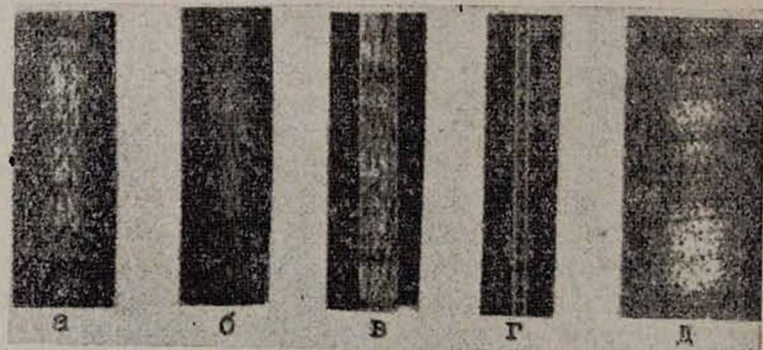


Рис. 4. Изменение интенсивностей краевых компонентов лауэ-отражений (220) при уменьшении толщины пластинки кремния в случаях монохроматического (а, б, в, г) и полихроматического (д) излучений. Толщины образцов: а) 11,4 мм; б) 7 мм; в) 4,4 мм; г) 2 мм и д) 8 мм.

Когда образец травится, описанная структура пучков R_0 и R_h исчезает вместе с интенсивными компонентами, что указывает на то, что их возникновение обусловлено дефектами, образующимися на поверхностях

кристалла при шлифовке. Шлифовка только поверхности входа или только поверхности выхода показала, что происхождение поперечных слоев обусловлено дефектами поверхности входа, а пятнистая структура — дефектами поверхности выхода. Этот факт приводит к следующему объяснению их образования. Когда падающий пучок в виде ленты (рис. 3) проходит сквозь отшлифованную поверхность входа, то вследствие определенного распределения дефектов вдоль линии CF , по которой он входит в кристалл, его интенсивность на различных отрезках этой линии убывает по-разному. Далее, распространяясь в кристалле, пучок расширяется, образуя треугольный веер Бормана CAB , и, достигая поверхности выхода, расщепляется на пучки R_0 и R_h , которые, падая на пленку, образуют вертикальные полосы, изображенные на рис. 5 и 6. В результате расширения по треугольнику

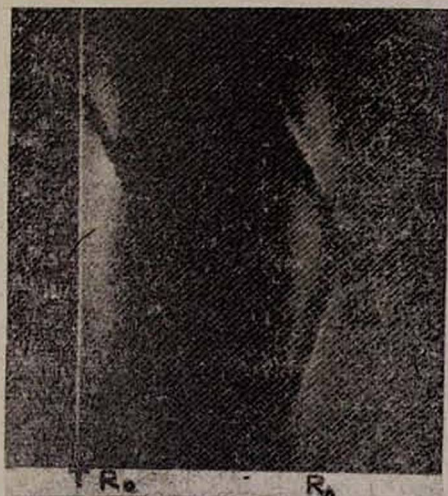


Рис. 5.

Рис. 5. Контрасты изображений царапины, сделанной на поверхности выхода кристалла кремния, в пучках R_0 и R_h .

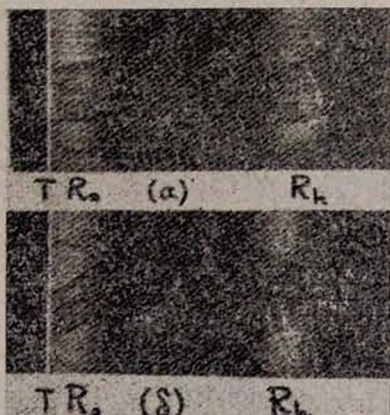


Рис. 6.

Рис. 6. Рентгенотопографические изображения отверстия, сделанного в кристалле под углом к его поверхности и к отражающим плоскостям, при различных глубинах пересечения с ним проходящего пучка T : а) сечение близко к поверхности входа; б) сечение близко к поверхности выхода.

CAB любой отрезок высоты CF пучка, проходящего через поверхность входа, на поверхности выхода превращается в слой, перпендикулярный плоскости. Пучок же, который кинематически отражается от тонкого слоя поверхности входа, содержащего большое количество дефектов, далее распространяясь в кристалле вдоль направления CE (рис. 3), полностью поглощается в нем в случае толстого кристалла, так как длина волны излучения в этом пучке отличается от брэгговской длины волны для внутренних совершенных слоев кристалла. В случае тонкого кристалла этот пучок образует интенсивный компонент у того края изображения пучка R_h , который соответствует поверхности входа. Таким же образом интенсивный

компонент, соответствующий поверхности выхода и появляющийся у другого края изображения пучка R_h , образуется кинематическим отражением в точке D тех длин волн, которые содержатся только в пучке T и которые отличаются от брэгговской длины волны для совершенного участка кристалла. Если кристалл достаточно толстый, эти волны поглощаются в кристалле, не доходя до точки D .

Расщепление пучка, распространяющегося внутри кристалла, на пучки R_0 и R_h фактически происходит непосредственно перед его прохождением через тонкий несовершенный слой поверхности выхода, так как в этом слое нарушены динамические условия дифракции. Таким образом, пучки R_0 и R_h после расщепления, проходя через этот тонкий слой поверхности выхода, проектируют имеющиеся в нем дефекты на их изображения в виде кинематического отражения и тем самым создают вышеописанную пятнистую структуру.

Контрасты изображений дефектов поверхности выхода в изображениях пучков R_0 и R_h имеют противоположный знак в результате указанного механизма их образования: местам усиленной интенсивности в изображении пучка R_0 соответствуют места ослабленной интенсивности в изображении пучка R_h , и наоборот. Контрасты же изображений дефектов поверхности входа в изображениях этих же пучков имеют одинаковый знак. Противоположность знака контраста дефекта поверхности выхода на изображениях пучков в R_0 и R_h хорошо иллюстрируется на рис. 5, где запечатлено топографическое изображение царапины, сделанной на поверхности выхода кристалла кремния.

В случае полихроматического падающего пучка независимость появления интенсивных краевых компонентов от толщины кристалла можно объяснить ростом угловой ширины Ω падающего пучка, который происходит при снятии кварцевого монохроматора. Угловая ширина отражения ω отшлифованных поверхностей вообще больше, чем аналогичная ширина для внутренних совершенных частей. Когда на кристалл падает монохроматический пучок, то для его внутренних совершенных частей $\Omega > \omega$, а для поверхностей $\Omega < \omega$. При удалении монохроматора Ω растет и вследствие этого для поверхностных слоев также условие $\Omega < \omega$ переходит в условие $\Omega > \omega$, что приводит к росту интенсивности отражения от них. Для лауэ-пятен, полученных стандартным методом (методом Лауэ), последнее условие всегда выполняется.

Кроме этого ширина интервала длин волн $\Delta\lambda$, которые могут отражаться от поверхностных слоев, больше соответствующего интервала для внутренней части. Отсутствие же такой большой ширины интервала длин волн в монохроматическом падающем пучке также может быть причиной меньшей интенсивности отражения от поверхностных слоев в случае монохроматического падающего пучка. Это обстоятельство может играть важную роль во многих случаях образования рентгеновских изображений дефектов. Для подтверждения этого вывода в одном из образцов было просверлено отверстие диаметром в 1 мм под углом 35° как к его поверхностям, так и к отражающим плоскостям (220). Были получены рентгено-

топографические картины различных участков образца, в которых сечение отверстия находилось на различных глубинах от поверхности входа. Сравнение этих картин (рис. 6) показывает, что изображение сечения отверстия в виде эллипса образуется кинематическим отражением длин волн от тех мест в кристалле, где проходящий пучок T пересекается с отверстием (рис. 7). Это дополнительно подтверждается формой и размерами эллипса

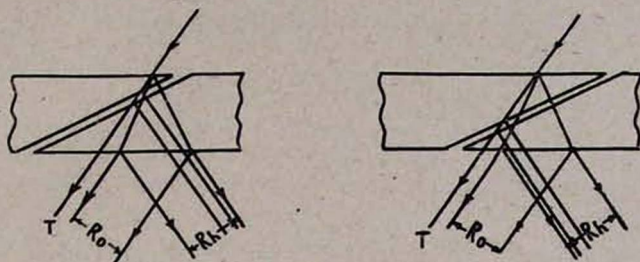


Рис. 7. Схемы образования изображений отверстия (а) на рис. 6а; (б) на рис. 6б.

в изображениях. Это означает, что длины волн, отраженных от сечения отверстия и образующих его изображение в виде эллипса, отсутствуют в пучке, распространяющемся внутри треугольника Бормана $СAB$ (рис. 3), и что они содержатся лишь в пучке T .

Ереванский государственный
университет

Поступила 22.XII.1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Sakisaka, I. Sumoto. Proc. Math.-Phys. Soc. (Japan), 13, 221 (1931).
2. J. H. Cork. Phys. Rev., 42, 729 (1932).
3. C. C. Murdock. Phys. Rev., 45, 117 (1934).
4. Р. Джеймс. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей, Изд. АН СССР, М., 1950.
5. N. Kato. Acta Cryst., 13, 349 (1960).
6. R. W. James. Sol. Stat. Phys., 15, 53 (1963).
7. П. А. Безиригян, В. И. Авунджян. Изв. АН АрмССР, Физика, 2, 224 (1967).
8. В. И. Авунджян, П. А. Безиригян. ДАН АрмССР, 42, 284 (1966).
9. В. И. Иверонова, Г. П. Ревкевич. Теория рассеяния рентгеновских лучей, Изд. МГУ, М., 1972.

ՌԵՆՏԳԵՆՆԱՆ ԼԱՈՒԷ- ԱՆԴՐԱԴԱՐՁՈՒՄՆԵՐԻ ՃԵՂՔՄԱՆ
ԵՎ ԲՅՈՒՐԵՂՈՒՄ ԵՂԱԾ ԹԵՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ
ԿՈՆՏՐԱՍՏԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ՀԱՐՅԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Վ. Ի. ՀԱՎՈՒՆՋՅԱՆ, Պ. Հ. ԲԵԶԻՐԴՆԱՆՅԱՆ, Գ. Մ. ԱՎԱՋԱՋՅԱՆ

Աշխատանքում փորձնականորեն ուսումնասիրված է լաուե-տիպի անդրադարձումների ճեղքումը մոնոխրոմատիկական և պոլիքրոմատիկական ընկնող ռենտգենյան փնջերի դեպքում: Ճեղքման հետ կապված ուսումնասիրված են նաև բյուրեղում եղած թերութիւնների պատկերների կոնտրաստի առաջացման որոշ հարցեր:

ON THE SPLITTING OF LAUE-REFLECTIONS AND THE FORMATION OF DEFECTS IMAGE CONTRAST IN CRYSTALS

V. I. HAVUNJIAN, P. H. EEZIRGANYAN, G. M. ALADJADJIAN

In the present paper a detailed experimental study of the splitting of Laue-reflections has been carried out in cases of monochromatic and nonmonochromatic incident beams. The effect of the crystal surface state on this splitting and some connected aspects of defects image formation were also studied.