

УДК 548.732

ЗАВИСИМОСТЬ УГЛОВОЙ АПЕРТУРЫ ПОЛНОСТЬЮ ПЕРЕБРАСЫВАЕМОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ТОЛЩИНЫ МОНОКРИСТАЛЛА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

С.Н. НОРЕЯН, В.К. МИРЗОЯН, В.Р. КОЧАРЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении

(Поступила в редакцию 18 декабря 2002 г.)

Исследована двухволновая дифракция монохроматического рентгеновского излучения от отражающих атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ монокристалла кварца при наличии температурного градиента (в режиме полной переброски). Показано, что угловая ширина проходящего рентгеновского излучения, которое полностью перебрасывается в направление отражения, зависит от толщины данного монокристалла и может стать намного больше ширины столика Дарвина данного семейства отражающих атомных плоскостей.

Известно, что наличие внешних воздействий (температурный градиент, акустические колебания) приводит к увеличению интенсивности отраженного рентгеновского излучения в процессе рассеяния рентгеновских лучей в монокристаллах, находящихся в условии Брэгга по геометрии Лауэ, и при определенных параметрах внешних воздействий для отражающих атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ кварца происходит полная переброска рентгеновского излучения из направления прохождения в направление дифракции [1]. Поскольку зависимость интенсивности отраженного рентгеновского излучения от параметров внешнего воздействия дала возможность получить управляемые рентгеновские пучки во времени и в пространстве, в дальнейшем были проведены многочисленные работы для исследования разных характеристик (угловая расходимость, пространственное распределение, энергетическая дисперсия) отраженного рентгеновского излучения [2-4]. С целью изучения угловых характеристик отраженного пучка при наличии температурного градиента в работах [5,6] исследовалось поведение этих пучков вне кристалла и было показано, что отраженный пучок вне кристалла фокусируется. Синусоидальная модуляция кристаллической решетки коротковолновой поверхностной акустической волной приводит к появлению на кривой качания дифракционных сателлитов, угловое положение и интенсивность которых зависят от амплитуды и длины волны ультразвуковой сверхрешетки, а также от энергии падающего рентгеновского излучения и порядка рефлекса [7].

В работе [3] экспериментально исследован ход потока волновой энергии внутри кристалла в зависимости от величины и направления температурного градиента при условии полной переборки ($\mu t \gg 1$, где t – толщина кристалла, μ – линейный коэффициент поглощения для данной энергии, $\Delta T/\Delta X = 160$ град·см⁻¹) и вблизи этого условия. Показано, что при полной переборке сильно меняется как траектория, так и плотность потока волновой энергии в объеме кристалла, и все восемь пучков, соответствующих ветвям дисперсионной поверхности как для σ -, так и для π -поляризации, протекают по одной локальной области.

Однако в указанных работах [1-6] не рассматривался вопрос угловых ширин падающего рентгеновского излучения, участвующих в дифракции при режиме полной переборки.

В работе [4] показано, что переборка интенсивности только от определенной части падающего монохроматического рентгеновского пучка объясняется тем, что для одних и тех же атомных плоскостей угловая ширина брэгговского отражения в 2-3 раза больше соответствующей ширины лауэвского отражения, а юстировка лауэвского отражения соответствует данной угловой области падающего пучка.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование угловой ширины перебрасываемого монохроматического рентгеновского излучения в зависимости от толщины исследуемого монокристалла. Работа выполнялась по трехкристальной схеме (рис.1.). Рабочим пучком рентгеновского излучения служило монохроматизированное по Брэггу MoK_{α_1} излучение от отражающих атомных плоскостей (10 $\bar{1}$ 1) монокристалла кварца.

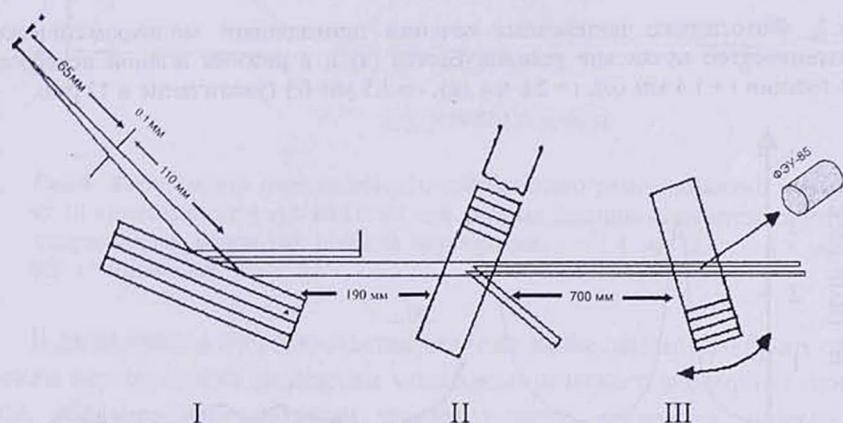


Рис.1. Схема эксперимента (I – кристалл-монокроматор, II – исследуемый образец, III – кристалл-анализатор, детектор ФЭУ-85).

Для исследования угловой ширины перебрасываемого рентгеновского излучения на расстоянии 70 см от исследуемого образца были сделаны фотоснимки фронта поперечного сечения проходящего пучка и параллельно с

этим с помощью кристалла-анализатора были сняты зависимости интенсивности отраженного пучка от III кристалла-анализатора при его качании (т.е. распределения интенсивности в проходящем пучке). В качестве исследуемых образцов использовались монокристаллы кварца X-среза с атомными плоскостями $(10\bar{1}1)$, $(10\bar{1}0)$, $(20\bar{2}3)$ и KDP (200) с разными толщинами и получены аналогичные результаты с атомными плоскостями $(10\bar{1}1)$.

Эксперименты проводились при температурном градиенте, приложенном перпендикулярно отражающим атомным плоскостям данного образца. На рис.2 представлены фронты поперечного сечения проходящего монохроматического рентгеновского излучения в отсутствие условия Брэгга (а) и в режиме полной переборки для исследуемых образцов (б,в,г) с разными толщинами. Как видно из представленных картин, с увеличением толщины исследуемого монокристалла увеличивается часть поперечного сечения, которая соответствует определенной угловой ширине перебрасываемого рентгеновского излучения.

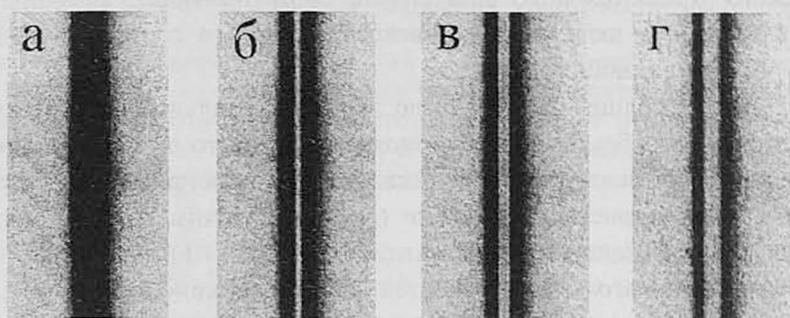


Рис.2. Фотоснимки поперечных сечений проходящего монохроматического рентгеновского пучка вне условия Брэгга (а) и в режиме полной переборки для толщин $t = 1.4$ мм (б), $t = 2.8$ мм (в), $t = 3,5$ мм (г) (увеличение в 12 раз).

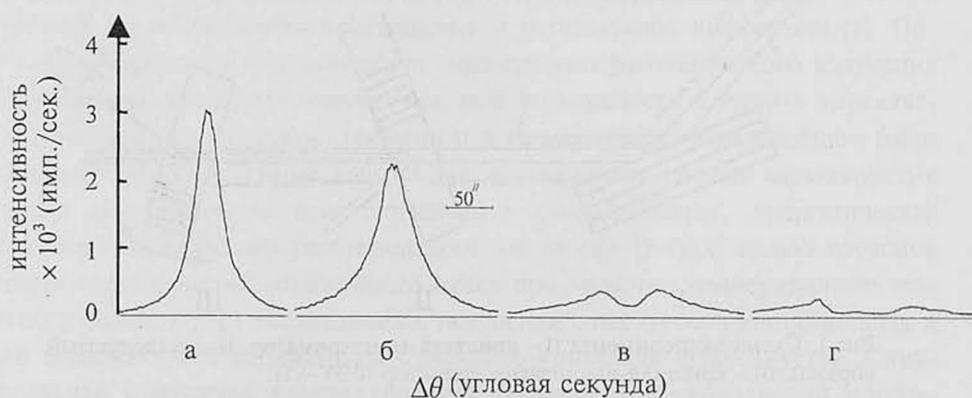


Рис.3. Зависимость интенсивности отраженного рентгеновского излучения от III кристалла-анализатора при его качании в зависимости от температурного градиента для монокристалла SiO_2 с толщиной $t = 3,5$ мм: $\Delta T/\Delta X = 0$ (а), $\Delta T/\Delta X = 15$ град./см (б), $\Delta T/\Delta X = 35$ град./см (в), $\Delta T/\Delta X = 70$ град./см (г).

На рис.3 приведены зависимости интенсивности отраженного рентгеновского излучения от III кристалла-анализатора при его качании в зависимости от величины температурного градиента, приложенного перпендикулярно к отражающим атомным плоскостям II монокристалла кварца с толщиной 3,5 мм. Видно, что с увеличением величины температурного градиента интенсивность проходящего пучка в определенном участке угловых ширин уменьшается, а в режиме полной переброски (рис.3г) интенсивность проходящего пучка в данном участке практически зануляется.

На рис.4 приведены зависимости интенсивности отраженного рентгеновского излучения от плоскости $(10\bar{1}1)$ III кристалла-анализатора при его качании для разных толщин исследуемых монокристаллов в режиме полной переброски. Как видно из приведенных кривых, угловая ширина излучения, которая участвует в дифракции в режиме полной переброски, с увеличением толщины монокристалла увеличивается. Отражение от атомных плоскостей $(10\bar{1}1)$ в геометрии Лауэ от образца кварца толщиной $t=3,5$ мм практически полностью перебрасывает всю угловую ширину падающего монохроматического излучения, монохроматизированного по Брэггу.

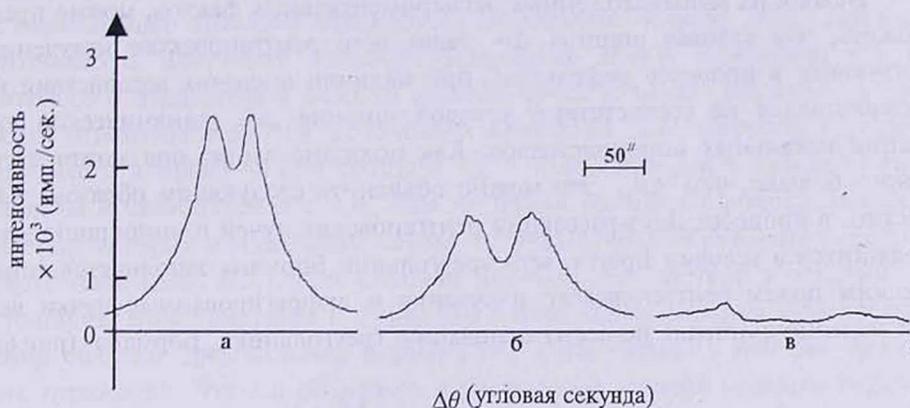


Рис.4. Зависимость интенсивности отраженного рентгеновского пучка от III кристалла при его качании для разных толщин исследуемых монокристаллов в режиме полной переброски; $t = 1.4$ мм (а), $t = 2.8$ мм (б), $t = 3.5$ мм (в).

В дальнейшем с целью подтверждения вышесказанного были проведены также исследования рассеяния монохроматического излучения от клиновидных образцов при наличии температурного градиента, приложенного перпендикулярно отражающим атомным плоскостям. Клиновидные образцы изготовлены таким образом, чтобы направление клина было перпендикулярно плоскости отражения, и толщина образца в данном направлении изменялась от 0,1 мм до 3 мм. Как видно из рис.5, угловая ширина перебрасываемого рентгеновского излучения по длине образца с изменением толщины меняется и в конце клина достигает своего максимального значения.



Рис.5. Поперечное сечение проходящего рентгеновского пучка в режиме полной переборки от клиновидного образца (увеличение в 7 раз).

Исходя из вышеизложенных экспериментальных фактов, можно предположить, что угловая ширина $\Delta\theta$ падающего рентгеновского излучения, участвующая в процессе дифракции, при наличии внешних воздействий на монокристаллах не соответствует угловой ширине $\Delta\theta_0$ динамической дифракции идеальных монокристаллов. Как показано выше, она может стать намного больше, чем $\Delta\theta_0$. Это можно объяснить следующим образом. Как известно, в процессе Лауэ-рассеяния рентгеновских лучей в монокристаллах, находящихся в условии Брэгга, весь треугольник Бормана заполняется динамическим полем рентгеновского излучения и дифрагированные пучки выходят из монокристалла по всему основанию треугольника Бормана (рис.6).

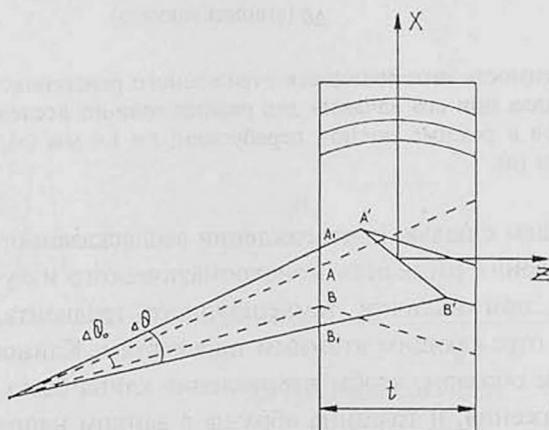


Рис.6. Изменение угловой ширины пучка, участвующего в дифракции рентгеновских лучей в присутствии внешних воздействий.

Однако приложение температурного градиента на монокристалл приводит к ряду изменений в кристаллической решетке: изгибу отражающих атомных плоскостей, изменению межплоскостных расстояний и т.д., т.е. в монокристалле устанавливается деформационное поле, которое в данном случае будет описываться функциями $d(z, x)$ и $n(z, x)$, где $d(z, x)$ – межплоскостное расстояние, а $n(z, x)$ – нормали отражающих атомных плоскостей. Эти изменения, в свою очередь, приводят к нарушению условия брэгговского отражения на всей площади треугольника Бормана, и для каждого участка пучка в угловой ширине падающего рентгеновского излучения, в зависимости от $d(z, x)$ и $n(z, x)$, будет обеспечено условие брэгговского отражения в разных областях монокристалла.

Поскольку при отсутствии внешнего воздействия только угловая ширина $\Delta\theta_0$ участвует в процессе рассеяния рентгеновского излучения и динамическое поле образуется от отрезка АВ входной поверхности монокристалла, то при приложении температурного градиента отражающие атомные плоскости изгибаются и на входной поверхности монокристалла нарушается условие брэгговского отражения. Когда отношение $t/2R$ (R – радиус кривизны отражающих атомных плоскостей) становится больше $\Delta\theta_0$, падающее рентгеновское излучение начинает проникать вглубь монокристалла без брэгговского отражения и каждый участок пучка начинает испытывать брэгговское отражение при разных глубинах кристалла. Динамическое рассеяние имеет место в эффективной толщине $t_{\text{эф}} = R\Delta\theta_0$, которая в зависимости от величины R становится меньше, чем истинная толщина t монокристалла. А те пучки, которые в идеальном случае не участвуют в образовании динамического поля (AA_1 , BB_1), при наличии внешних воздействий в зависимости от толщины монокристалла и кривизны отражающих атомных плоскостей в разных областях треугольника Бормана будут находиться в условии брэгговского отражения. Этим и объясняется увеличение угловой ширины перебрасываемого рентгеновского излучения в зависимости от толщины исследуемого монокристалла в режиме полной переброски.

Угловая ширина перебрасываемого монохроматического рентгеновского излучения в зависимости от толщины исследуемого образца выражается следующим образом:

$$\Delta\theta = \frac{t}{2L_0} \sin \theta_B,$$

где L_0 – расстояние между источником рентгеновского излучения и исследуемым образцом, а θ_B – угол Брэгга отражающих атомных плоскостей. Обеспечение условия брэгговского отражения для каждого участка пучка в угловой ширине падающего излучения в разных глубинах монокристалла приводит к образованию линии (А'В'), форма которой зависит от распределения функций $d(z, x)$ и $n(z, x)$ в монокристалле.

Таким образом, можно сказать, что при внешних воздействиях в про-

пессе образования дифракционного поля участвует лишь часть кристаллической решетки, т.е. объем рассеивающей части кристалла уменьшается в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян. Письма в ЖТФ, 8, 677 (1982).
2. А.Р.Мкртчян, Р.Г.Габриелян, А.А.Асланян и др. Изв. АН Арм.ССР, Физика, 21, 297 (1986).
3. М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян, К.Т.Айрапетян и др. Изв. АН Арм.ССР, Физика, 21, 217 (1986).
4. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, В.К.Мирзоян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, 21, 340 (1986).
5. А.Р.Мкртчян, М.А.Навасардян, Р.Г.Габриелян. Письма в ЖТФ, 11, 1354 (1985); Phys. Lett., A116, 444 (1986).
6. A.R.Mkrtchyan et al. Solid State Com., 59, 147 (1986).
7. Д.В.Иржак, Д.В.Рошупкин, Р.Тукулу, О.Матон. Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед., 1, 10 (2002).

ԼՐԻՎ ՎԵՐԱՄՂՎՈՂ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԱՆԿՅՈՒՆԱՅԻՆ
ԲԱՅՎԱԾԸԻ ԿԱՒՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂԻ ՀԱՍՏՈՒԹՅՈՒՆԻՑ
ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ս.Ն. ՆՈՐԵՅԱՆ, Վ.Գ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ, Վ.Ռ. ԿՈՇԱՐՅԱՆ

Ուսումնասիրված է ռենտգենյան մոնոքրոմատային ճառագայթման երկալիքային դիֆրակցիան SiO_2 միաբյուրեղի (1011) հարթությունների ընտանիքից ջերմային գրադիենտի առկայության դեպքում (լրիվ վերանդան պայմանում): Ցույց է տրված, որ առաջնային փնջից վերանդվող ռենտգենյան ճառագայթման անկյունային բացվածքը կախված է վերամղող միաբյուրեղի հաստությունից և կարող է անհամեմատ մեծ լինել տվյալ անդրադարձնող հարթությունների ընտանիքի Դարվինի սեղանի լայնությունից:

DEPENDENCE OF THE ANGULAR APERTURE OF COMPLETELY
TRANSFERRED X-RAY RADIATION ON THE THICKNESS OF SINGLE CRYSTAL
IN THE PRESENCE OF TEMPERATURE GRADIENT

S.N. NOREYAN, V.GH. MIRZOYAN, V.R. KOCHARYAN

The two-wave diffraction of monochromatic X-ray radiation from reflecting atomic planes of single crystal quartz in the presence of temperature gradient (under the condition of complete transmission) is investigated. It is shown that the angular width of passing X-ray radiation which is completely transferred into the direction of reflection, depends on the thickness of a given single crystal and it may become much larger than the Darwin's reflection curve width of the given family of reflecting atomic planes.