

УДК 548.732

ОСОБЕННОСТИ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В КВАРЦЕВЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ

П. А. БЕЗИРГАНЯН, Е. Г. ЗАРГАРЯН, В. Г. АСЛАНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 14 марта 1983 г.)

Исследовано рассеяние рентгеновских лучей в кварцевых монокристаллах. Показано, что даже в толстых монокристаллах кварца происходит кинематическое рассеяние и возникают маятниковые полосы. Экспериментально показано, что в двухкристалльных кварцевых интерферометрах получается только дифракционная картина зазора, а в трехкристалльных интерферометрах не получаются муаровые картины. Пучок, отраженный от одной части кристалла, больше не отражается от других частей данного кристалла.

Кварцевые монокристаллы имеют весьма широкое применение в науке и технике [1, 2]: в прикладной оптике, радиотехнике, ультразвуке и т. д. Эти кристаллы имеют особо важное значение из-за пьезоэлектрических свойств. Для дальнейшего более эффективного использования кварцевых кристаллов и расширения области их применения необходимо более детально исследовать несовершенства этих кристаллов, возникающие под действием различных физических факторов. Ведь физические свойства кристаллов во многом зависят от степени совершенства их структур. Поэтому изучение несовершенства кристаллов является одним из актуальных вопросов физики твердого тела.

Среди различных методов изучения дефектов особое место занимают рентгенографические методы. Однако рентгенодифракционные картины, полученные от кристаллов кварца, очень сложны и не всегда удается их однозначно интерпретировать, что не дает возможности обнаружить истинные структурные несовершенства, возникающие под действием различных факторов.

Настоящая работа формировалась в ходе исследования эффектов динамического рассеяния рентгеновских лучей в кварцевых кристаллах в зависимости от накладываемого на них электрического поля. Была поставлена задача: исследовать влияние постоянного электрического поля на эффект Бормана, краевой эффект, поток энергии и маятниковые полосы, возникающие в однокристалльных образцах [3—5], на полосы смещения и муаровые картины, возникающие в двухблочных интерферометрах [6—8], и на интерференционные картины, возникающие в трехблочных интерферометрах.

При выполнении этой задачи мы столкнулись с трудностями, которые дали повод задуматься над особенностями дифракции (рассеяния) рентгеновских лучей в несовершенных (мозаичных) кристаллах вообще и в кри-

сталлах кварца в частности. Для достоверного определения характерных особенностей дифракции рентгеновских лучей в кварцевых кристаллах нами было исследовано рассеяние рентгеновских лучей в отдельных кристаллах и в системах, состоящих из двух и трех кристаллов (двухблочных и трехблочных интерферометрах).

1. Эффекты, обнаруженные при исследовании дифракции рентгеновских лучей в кварцевых кристаллах

1) Получены маятниковые полосы от толстых клинообразных кристаллов кварца (излучение $Mo K_{\alpha}$, пучок — немонахроматический, толщина основания клина — 4 мм, угол клинности — $5,5^{\circ}$).

Как известно [3, 4], маятниковые полосы получаются в результате интерференции волн первого и второго порядков (в двухполюсовом приближении), распространяющихся почти в одном и том же направлении. Однако в результате аномального поглощения первое поле в достаточно толстых кристаллах ($\mu t \geq 10$) почти полностью поглощается, и поэтому маятниковые полосы могут возникать только в тонких кристаллах ($\mu t \sim 1$). Между тем от наших толстых образцов ($\mu t \geq 10$, где μ — коэффициент поглощения, а t — толщина кристалла) получены четкие маятниковые полосы (рис. 1).



Рис. 1. Маятниковые полосы от толстых кварцевых кристаллов ($\mu t > 10$).

2) При дифракции рентгеновских лучей в двухблочных интерферометрах вместо линий (полос) смещения наблюдалась дифракционная картина зазора между блоками. Как известно [6, 7], в результате дифракции рентгеновских сферических волн в системе,

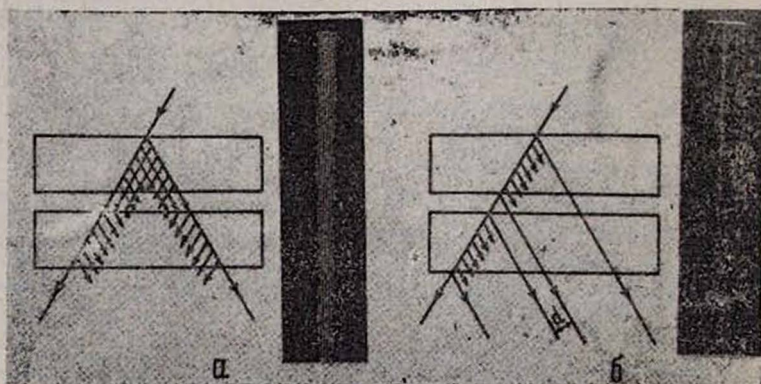


Рис. 2. Дифракция рентгеновских лучей в системе, состоящей из двух близко расположенных кристаллов: а) блоки интерферометра — совершенные кристаллы (отраженные волны налагаются друг на друга, в результате чего получают линии смещения); б) блоки интерферометра — мозаичные монокристаллы (наложения отраженных пучков не происходит, в дифрагированном пучке получается картина зазора, в зоне d интенсивность равна нулю).

состоящей из двух близко расположенных кристаллов кремния, получается интерференционная картина, состоящая из системы линий (полос) — линий смещения (рис. 2а). Однако в аналогичных интерферометрах, состоя-

щих из кварцевых кристаллов, линии смещения не получались даже при их идеальной геометрии. От всех исследованных двухблочных интерферометров была получена только картина зазора (рис. 2 б).

3) При дифракции рентгеновских лучей в трехблочных ЛЛЛ интерферометрах, как известно [9, 10], в первом блоке первичная волна расщепляется (получаются волны, дифрагированные в направлениях падения и отражения), во втором блоке эти волны отражаются от противоположных сторон отражающих плоскостей и в третьем блоке они налагаются друг на друга. За третьим блоком получаются 6 пучков, из них два содержат ин-интерференционные картин (полос).

Для исследования влияния электрического поля на интерференционную картину трехблочного интерферометра нами были изготовлены трехблочные кварцевые интерферометры. Из десяти тщательно изготовленных нами интерферометров ни один не работал нормально: во-первых, вместо шести пучков получались четыре, и, во-вторых, эти пучки не содержали интерференционных картин (полос).

4) Наконец, при первичном монохроматическом падающем пучке наблюдалось сильное ослабление проходящего пучка и усиление отраженного пучка. Как известно [11—14], электрические поля (как постоянные, так и переменные), подаваемые на кварцевые монокристаллы, в зависимости от их направления усиливают интенсивности отражения рентгеновских лучей. А при монохроматическом падающем пучке под влиянием переменного электрического поля энергия первичного пучка почти полностью переходит в дифрагированный (отраженный) пучок [15].

2. Обсуждение полученных результатов

1. В первом пункте предыдущего параграфа мы отмечали, что были получены маятниковые полосы от толстых кристаллов ($\mu t > 10$). Каза-лось бы, это противоречит выводам динамической теории рассеяния рентгеновских лучей. Действительно, с одной стороны, если от кристалла получают маятниковые полосы, то можно полагать, что он совершенный. С другой стороны, в совершенных кристаллах имеет место аномальное поглощение, и в толстых кристаллах ($\mu t > 10$) первое поле почти полностью поглощается и в результате в таких кристаллах маятниковые полосы не могут возникать.

Это кажущееся противоречие можно объяснить предположениями:

а) в кварцевых монокристаллах, по крайней мере в исследованных нами, аномальное поглощение (эффект Бормана) не имеет места и оба поля поглощаются одинаково, поэтому в исследованных нами толстых ($\mu t > 10$) кристаллах кварца возникали муаровые полосы;

б) в толстых кристаллах кварца из-за мозаичности аномальное поглощение (эффект Бормана) может отсутствовать, но могут возникать маятниковые полосы.

2. Во втором пункте предыдущего параграфа отмечалось, что при дифракции в двухблочных кварцевых интерферометрах линии смещения не получаются, а наблюдается только картина зазора. Это может иметь место только в том случае, когда из-за несовершенства кристаллов пучок, отра-

женный от какой-либо части кристалла, больше не отражается от других частей данного кристалла, как это было показано на рис. 2.

3. В пункте 3 предыдущего параграфа отмечалось, что в кварцевом трехблочном интерферометре вместо шести пучков получались четыре и при этом они не содержали интерференционных картин. Нетрудно убедиться в том, что это явление — результат того, что в таких системах пучок, дифрагированный в одном блоке, в другом блоке не будет находиться в положении отражения.

Действительно, как видно на рис. 2б, дифрагированные пучки второй раз не дифрагируют. В интерферометре, блоки которого — совершенные кристаллы (рис. 2а), отраженные пучки вторично отражаются, пучки за вторым кристаллом когерентно налагаются друг на друга и поэтому они содержат интерференционные узоры.

4. Почти полную перекачку энергии первичного падающего пучка в отраженный пучок, о чем уже отмечалось в четвертом пункте первого параграфа, можно объяснить тем, что в несовершенном кристалле независимо от толщины происходит кинематическое рассеяние. При кинематическом рассеянии по мере углубления первичного пучка в кристалл происходит отражение, как это показано на рис. 3а. При этом из-за несовершенства кри-

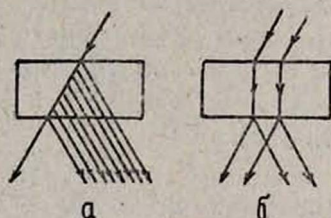


Рис. 3. Ход лучей в кристаллах при отражении: а) кинематическое рассеяние; б) динамическое рассеяние.

сталла уже раз отраженный пучок больше не отразится от других частей данного кристалла. При динамическом рассеянии кристалл — совершенный, и в нем происходит взаимодействие между отраженными и проходящими волнами. Поэтому при кинематическом рассеянии в случае Лауэ энергия первичного пучка при достаточной толщине кристалла может полностью переходить в отраженный пучок, тогда как при динамическом рассеянии энергия первичного пучка в среднем распределяется между отраженными и проходящими пучками (рис. 3б).

3. Дополнительные исследования, подтверждающие выводы, полученные в предыдущих параграфах

Таким образом, все вышеуказанные особенности дифракции рентгеновских лучей в кварцевых кристаллах (мозаичных кристаллах) обусловлены тем, что:

а) в таких (даже толстых) кристаллах происходит кинематическое рассеяние — энергия в дифрагирующем кристалле течет в направлениях падения и отражения (вдоль плоскостей не течет), отсутствует эффект Бормана;

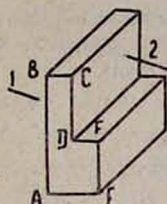
б) в таких (даже толстых) кристаллах структура этих кристаллов не мешает возникновению маятниковых полос.

Для большей убедительности наших выводов мы провели дополнительные исследования.

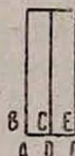
1. Приведем доказательство того, что в кварцевых кристаллах в дифракционной ситуации энергия не течет вдоль плоскостей (кинематическое рассеяние, отсутствие эффекта Бормана).

Рассмотрим дифракцию рентгеновских лучей от ступенчатых кристаллов, изображенных на рис. 4.

а) Допустим, что первичный пучок падает с гладкой стороны (направление 1, рис. 4) и рассеяние является кинематическим. Как видно на рис. 5, сечение дифрагированного пучка имеет вид отражающих плоскостей: с одной стороны оно — гладкое, с другой — ступенчатое.



а



б

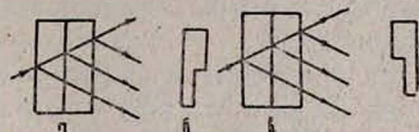


Рис. 5. Кинематическое рассеяние от ступенчатого кристалла: а и в — ход лучей в кристалле; б и г — сечение отраженного пучка (а, б — первичный пучок падает со стороны гладкой поверхности; в, г — первичный пучок падает со стороны ступенчатой поверхности).

Рис. 4. Ступенчатый монокристалл: а) ABCDEF — отражающие плоскости. AF — толщина нижней (толстой) части кристалла, BC — толщина верхней (тонкой) части кристалла, 1 и 2 — направления падения в двух противоположных направлениях; б) вид кристалла сверху.

б) Теперь предположим, что волна падает со ступенчатой стороны (рис. 4а, направление 2) и рассеяние — опять кинематическое. Как видно на рис. 5, и в этом случае поперечное сечение пучка имеет вид отражающих плоскостей (рис. 5в и 4а).

в) Если первичный пучок падает со стороны гладкой поверхности кристалла (рис. 4а, направление 1), но рассеяние при этом — динамическое, как это показано на рис. 6а, б, то происходит взаимодействие между падающими и отраженными волнами. В результате этого взаимодействия энергия течет вдоль отражающих плоскостей, и, во-первых, части следов дифрагированного пучка сдвинуты друг относительно друга (рис. 6б), во-вторых, толщины этих следов мало отличаются друг от друга.

г) Наконец, когда первичный пучок падает со ступенчатой стороны, а рассеяние — вновь динамическое, то опять верхние и нижние части сечения дифрагированного пучка сдвинуты друг относительно друга, но в этом случае сдвиг совершен в обратную сторону (рис. 6г).

Для экспериментального доказательства того, что в кварцевых кристаллах во время дифракции рентгеновских лучей энергия не течет вдоль плоскостей, т. е. происходит кинематическое рассеяние и отсутствует эффект Бормана, а в кристаллах кремния (совершенные кристаллы) энергия течет вдоль отражающих плоскостей и, следовательно, происходит динамическое рассеяние, нами были изготовлены ступенчатые образцы из кварцевых и кремниевых монокристаллов. Отражающими плоскостями в квар-

цевых ступенчатых монокристаллах были (1120), в кремниевых кристаллах — (220), использовалось излучение $Mo K_{\alpha}$. Толщина кварцевых кристаллов в тонкой части — 2 мм, в толстой части — 4 мм, а кремниевых кристаллов — соответственно 3 и 6 мм.

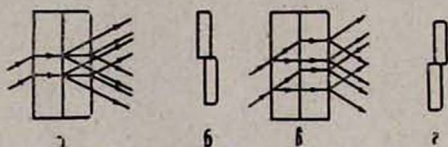


Рис. 6. Динамическое рассеяние от ступенчатого кристалла: а, в — ход лучей в кристалле; б, г — сечение отраженного пучка (а, б — первичный пучок падает со стороны гладкой поверхности; в, г — первичный пучок падает со стороны ступенчатой поверхности).

В случае кварцевых кристаллов сечения пучков имели вид отражающих плоскостей, т. е. повторялись картины, изображенные на рис. 5а и б. Следовательно, в этих кристаллах происходило кинематическое рассеяние. В случае кремниевых кристаллов сечения пучков имели вид, приведенный на рис. 6б и г, т. е. в этих кристаллах происходило динамическое рассеяние.

Таким образом, мы считаем однозначно доказанным, что

- 1) в кварцевых достаточно толстых кристаллах происходит кинематическое рассеяние;
- 2) и, что самое важное, в толстых кристаллах кварца ($\mu t \geq 10$), в которых отсутствует эффект Бормана, возникают маятниковые полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубников А. В. Кварц и его применение. Изд. АН СССР, М., 1940.
2. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. Изд. ИЛ, М., 1949.
3. Yamashita S., Kato N. Appl. Cryst., 8, 623 (1975).
4. Адамян С. А., Безиригян П. А., Заргарян Е. Г. Изв. АН АрмССР, Физика, 14, 429 (1979).
5. Borrmann J. Phys. Z., 127, 297 (1950).
6. Authier A., Milne A. D., Sauvage M. Phys. Stat. Sol., 26, 469 (1968).
7. Безиригян П. А., Аветисян Г. Г. Препринт ЕГУ-ФТТ-22-24, 1981.
8. Безиригян П. А., Асланян В. Г. Кристаллография (1984).
9. Bonse U., Hart M. Appl. Phys., Lett. 6, 155 (1965).
10. Bonse U., Hart M. Z. Phys., 190, 455 (1966).
11. Безиригян П. А., Авунджян В. И. Изв. АН АрмССР, Физика, 1, 147 (1966).
12. Безиригян П. А., Авунджян В. И. Изв. АН АрмССР, Физика, 1, 227 (1966).
13. Адамян С. А., Заргарян Е. Г., Григорян Л. С. Ученые записки ЕГУ, Физика, 2, 73 (1980).
14. Адамян С. А., Безиригян П. А., Заргарян Е. Г. Авт. свид. № 935759, 1982.
15. Мкртчян А. Р., Навасардян М. А., Мирзоян В. К. Письма в ЖТФ, 8, 11 (1982).

ԿՎԱՐՑԻ ՄՈՆՈԲՅՈՒՐԵԴՆԵՐՈՒՄ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՅԻ ԱՌԱՆՁԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Պ. Հ. ԲԵԶԻՐԻԳՅԱՆ, Ե. Գ. ԶԱՐԳԱՐՅԱՆ, Վ. Գ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

Ուսումնասիրված է ռենտգենյան ճառագայթների ցրումը կվարցի մոնոբյուրեղներում: Ցույց է տրված, որ նույնիսկ հաստ կվարցի մոնոբյուրեղներում անդի է ունենում կինեմատիկ ցրում և առաջանում են ճոճանակային շերտեր: Փորձականորեն ցույց է տրված, որ կվարցի երկբյուրեղանի ինտերֆերոմետրերից ստացվում է միայն ճեղքի դիֆրակցիոն պատկերը, իսկ երկբյուրեղանի ինտերֆերոմետրերից մուարի պատկերներ չեն ստացվում: Բյուրեղի մի մասից անդրադարձած ճառագայթը այլևս չի անդրադառնում նրա մյուս մասերից:

PECULIARITIES OF X-RAY DIFFRACTION IN QUARTZ MONOCRYSTALS

P. A. BEZIRGANYAN, E. G. ZARGARYAN, V. G. ASLANYAN

The scattering of X-rays in quartz monocrystals has been investigated. It was shown that the kinematic scattering took place even in thick quartz monocrystals and pendular bands appeared. As was demonstrated experimentally, only a diffraction image of clearance was obtained in bicrystal quartz interferometers, while in tricrystal interferometers the moire patterns were not produced. The bundle of rays reflected from one part of the crystal was no longer reflected from other parts of the same crystal.