

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ МЕЖДУ РЕФЛЕКСАМИ ШЕСТИВОЛНОВОГО РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

П. А. БЕЗИРГАНЯН, Р. Ц. ГАБРИЕЛЯН, А. Л. МШЕЦЯН

Экспериментально исследована симметричная шестиволновая конфигурация на кристалле германия в случае лауэ-брэгговской и брэгг-брэгговской дифракции рентгеновского излучения CuK_{α_1} и MoK_{α_1} . Исследованы три случая. На рефлексах (044) и ($\bar{2}24$), отраженных по Брэггу, наблюдаются эффекты многоволнового взаимодействия (усиление, просветление, тонкая структура). Дано качественное объяснение наблюдаемых эффектов.

При динамическом рассеянии рентгеновских лучей в общем случае в кристалле образуется сложная картина распределения интенсивности излучения. Даже в самом простом случае — в случае двухволнового рассеяния — характер распределения интенсивности в монокристалле достаточно сложный. Картина тем сложнее, чем больше число сильных волн, участвующих в интерференции — в образовании общего волнового поля.

Между тем исследование установленного распределения интенсивности общего волнового поля в кристалле и между рефлексами имеет большое теоретическое и практическое значение. Это дает возможность уточнить теоретическую интерпретацию эффектов динамического рассеяния рентгеновских лучей, а также возможность однозначного определения месторасположения и характера дефектов с помощью их рентгенодифракционных изображений.

В двухволновом случае рассеяния распределение интенсивности в кристалле и между рефлексами исследовано достаточно детально, однако в многоволновом случае из-за теоретических и экспериментальных трудностей, возникающих при исследовании интерференционных картин, образованных многими сильными волнами (больше двух), эти вопросы, к сожалению, мало исследованы, несмотря на то, что именно в многоволновых случаях можно почерпнуть более богатую информацию из этих исследований.

В многоволновом случае весьма интересно исследовать распределение интенсивности между рефлексами данной конфигурации в зависимости от природы их образования (отражениями Лауэ и Брэгга), от толщины образца и длины волны, что и является целью настоящей работы.

Исследована шестиволновая конфигурация (000, $2\bar{2}0$, $2\bar{4}2$, $0\bar{4}4$, $\bar{2}02$, $\bar{2}\bar{2}4$), которая представляет особый интерес. Впервые эта конфигурация исследовалась в работе [1], где теоретическими расчетами было показано, что для одной моды распространения коэффициент поглощения стре-

мится к нулю. В работе [2] эта конфигурация исследована более подробно, как теоретически, так и экспериментально; теоретические расчеты показали, что для четырех мод этой конфигурации коэффициент поглощения меньше единицы, однако в этой работе усиление эффекта Бормана экспериментально не было обнаружено. В проведенном в работе [2] эксперименте образец располагался на расстоянии 7 см от источника рентгеновских лучей, а рентгеновская пленка — на расстоянии 1—2 м от образца. Отрицательный результат опыта авторы объяснили плохим качеством образца (монокристалла германия).

В работе [3] впервые экспериментально было обнаружено усиление эффекта Бормана для указанной шестиволновой конфигурации. В этой работе образец устанавливался на расстоянии 2 м от источника, а пленка — на расстоянии 3 см от образца и было обнаружено указанное усиление.

В работе [4] эксперимент проводился как по схеме, приведенной в работе [2], так и по схеме работы [3], и в обоих случаях было обнаружено усиление эффекта Бормана. Более того, в работе [4] экспериментально было показано, что усиление обнаруживается только при определенных расстояниях образец-источник и образец-пленка, что, видимо, связано с эффектом динамической фокусировки; подобное явление было описано в работах [5—7] для двухволнового случая.

Во всех этих работах при исследовании указанной шестиволновой конфигурации предполагалось, что все рефлексы этой конфигурации образованы лауэ-отражениями. Случаи, когда часть этих рефлексов образована лауэ-отражениями, а часть — отражениями Брэгга, не исследованы. Необходимо добавить, что вообще многоволновые конфигурации, в которых все рефлексы или часть рефлексов образованы брэгговскими отражениями, мало исследованы. В таком аспекте выполнено лишь несколько работ [8—11].

Методика и содержание эксперимента

Для получения большого разрешения при очень малой светосиле мы использовали рентгеновские излучения CuK_α и MoK_α трубки БСВ-7 (размеры фокуса $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$) и располагали исследуемый образец на расстоянии 250 см от источника. Во избежание потерь интенсивности первичного падающего на образец пучка излучение от источника до образца проходило через вакуумную трубку с бериллиевыми окнами. В некоторых случаях (для исследования отдельных рефлексов) рентгеновские пленки устанавливались на расстоянии от 2 до 3 м от образца. В других случаях для одновременного получения всех рефлексов на одной пленке последняя располагалась на расстоянии нескольких сантиметров от образца.

Образцы были изготовлены из почти бездислокационных монокристаллов германия, что было продиктовано тем, что в прежних работах [1—4] при исследовании указанной шестиволновой конфигурации, все рефлексы которой были образованы лауэ-отражениями, интересные результаты получились именно от кристалла германия. Исследуемые образ-

цы изготовлялись в виде плоских пластинок, ориентация которых контролировалась на установке ДРОН-1. После механической шлифовки пластинки подвергались химической обработке (травителем СР-4). Травлением снимались слои толщиной от 150 до 200 мкм.

Исследования проводились на японской камере типа А-3 фирмы Rigaku. Были исследованы следующие случаи отражений:

1) рефлекс ($0\bar{4}4$) образовывался брэгговским отражением, а остальные рефлексы шестиволновой конфигурации — лауэ-отражениями;

2) рефлексы (044), (224), (242) образовывались брэгговскими отражениями, а остальные — лауэ-отражениями;

3) все рефлексы шестиволновой конфигурации образовывались отражениями типа Брэгга (конечно, за исключением рефлекса (000)).

Во всех случаях для проведения более точных многоволновых измерений первичный пучок пропусклся через узкую щель (ширина щели — 0,2 мм), а для исследования одновременно с многоволновыми областями и их окрестностей (двухволновые фоны) использовался широкорасходящийся пучок.

В первом случае образец вырезался таким образом, чтобы его большая поверхность составляла с плоскостью (111) угол величиной 55° (или с плоскостью ($0\bar{1}1$) угол в 35°). Во втором случае большая поверхность образца совпадала с плоскостью ($0\bar{1}1$). В третьем случае использовались те же образцы, что и в первом случае, однако для того, чтобы рефлексы конфигурации получились отражениями типа Брэгга, пришлось первичный пучок направить на образец в направлении рефлекса ($0\bar{4}4$) в первом случае, т. е. под углом 15° , что не дало возможности исследовать толстые кристаллы; рефлекс (000) получался только для тонких кристаллов. Поэтому в третьем случае мы смогли исследовать распределение интенсивности между рефлексами шестиволновой конфигурации только для кристаллов толщиной не более 380 мкм.

Результаты и их обсуждение

В первом случае, когда все рефлексы шестиволновой конфигурации, за исключением ($0\bar{4}4$), были отражениями по Лауэ, казалось, что почти всю энергию унесет с собой рефлекс ($0\bar{4}4$), отраженный по Брэггу, сильно ослабив все остальные рефлексы, отраженные по Лауэ, при условии, конечно, что толщина кристаллов больше экстинкционной глубины. Однако получился неожиданный результат. В первом случае для всех исследованных толщин кристалла имело место сильное ослабление рефлекса ($0\bar{4}4$) (см. рис. 1) и в то же время наблюдалось усиление рефлекса (000). Измерения показали, что интегральная интенсивность шестиволнового рефлекса ($0\bar{4}4$) в 3—4 раза меньше, чем интегральная интенсивность его двухволнового фона. Для одновременной регистрации всех рефлексов пленку помещали на расстоянии нескольких сантиметров от образца. Но поскольку интенсивности разных рефлексов почти на порядок отличаются друг от

друга и появление одного типа рефлекса происходит на фоне передержки других типов рефлексов, то пришлось в первую очередь снимать (с самой короткой экспозицией) рефлекс $(0\bar{4}4)$, отраженный по Брэггу, затем — рефлексы (000) , (202) , $(2\bar{2}0)$ и, наконец, слабые рефлексы $(\bar{2}\bar{2}4)$, $(2\bar{4}2)$.

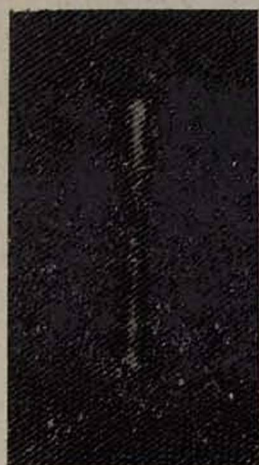


Рис. 1.



Рис. 2.



Рис. 3.

Рис. 1. Рефлекс $(0\bar{4}4)$, отраженный по Брэггу (первый случай).

Рис. 2. Рефлекс $(0\bar{4}4)$, отраженный по Брэггу (второй случай).

Рис. 3. Рефлекс (000) , третий случай.

В рассматриваемом случае интенсивности рефлексов типа $(\bar{2}\bar{2}0)$ не изменились: интенсивности многоволновых областей рефлексов типа $(\bar{2}\bar{2}0)$ ничем не отличались от своих двухволновых областей. Не изменились и рефлексы типа $(\bar{2}\bar{2}4)$.

Во втором случае, где рефлексы $(0\bar{4}4)$, $(\bar{2}\bar{2}4)$ и $(2\bar{4}2)$ образовывались отражениями по Брэггу, наблюдалось усиление интенсивности шестиволнового рефлекса $(0\bar{4}4)$ относительно его двухволнового фона, что также является неожиданным результатом: во втором случае число рефлексов, отраженных по Брэггу, в три раза больше, чем число таких отражений в первом случае, но рефлекс $(0\bar{4}4)$ вместо того, чтобы еще больше ослабиться, усиливается. На рис. 2 зарегистрирован только рефлекс $(0\bar{4}4)$, на котором видно, что интенсивность и угловая область шестиволнового рефлекса увеличиваются. При некоторых других толщинах образца в центральной части многоволнового рефлекса наблюдается тенденция к расщеплению.

В рассматриваемом случае на рефлексах $(\bar{2}\bar{2}4)$ и $(2\bar{4}2)$ наблюдается как область ослабления интенсивности (просветление), так и область слабого усиления интенсивности. Рефлексы типа $(\bar{2}\bar{2}0)$, которые во втором случае образовывались отражениями по Лауэ, не изменились, как и в пре-

дыдущем случае. В рефлексе (000), как и в первом случае, наблюдается усиление, в котором видна угловая асимметричность.

В третьем случае, когда только рефлекс (000) образовывался лауэ-отражением, наблюдалось сильное асимметричное увеличение интенсивности в шестиволновой области этого рефлекса (см. рис. 3). Среди всех случаев самое большое увеличение интенсивности рефлекса (000) получается в третьем случае. Угловая область отражения шестиволнового рефлекса (044) сильно сужается вдоль двухволнового фона и интенсивность сильно падает (просветление), что хорошо видно на рис. 4.

В рассматриваемом третьем случае интересное явление наблюдается в рефлексах типа ($\bar{2}\bar{2}4$). В этих рефлексах кроме просветления наблюдается и усиление (см. рис. 5—7). Исследования показали, что этот эффект зависит от толщины образца. Мы исследовали эффект просветления и усиления рефлексов типа ($\bar{2}\bar{2}4$) для трех толщин образца и убедились, что самый большой контраст просветления и усиления наблюдается при толщине кристалла в 150 мкм (см. рис. 6), а при толщинах 50 и 380 мкм этот эффект постепенно ослабляется, как это следует из рис. 5 и 7.

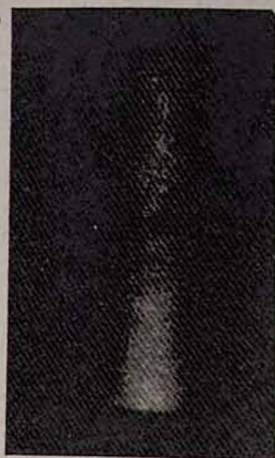


Рис. 4. Рефлекс ($0\bar{4}4$), третий случай.

Вышеописанные исследования были проведены на излучении CuK_α . Кроме них были проведены аналогичные исследования на излучении MoK_α . Последние показали, что во всех трех случаях наблюдается усиление только рефлекса (000). Шестиволновые области всех рефлексов, кроме рефлекса (000), ничем не отличаются от своих двухволновых фонов, причем рефлекс ($0\bar{4}4$) был получен на расстоянии 2,5 м от образца, и даже на таких расстояниях многоволновая область не отличается от двухволновой.

Для более или менее точной и однозначной интерпретации полученных результатов необходимо решить шестиволновую задачу рассеяния рентгеновских лучей для данной конфигурации в зависимости от толщины кристалла и длины падающей волны. Результаты такого теоретического исследования будут приведены нами в другой работе, а здесь мы ограничимся качественной интерпретацией эффектов, наблюдаемых экспериментально.

В первом случае уменьшение интенсивности в многоволновой области для рефлекса ($0\bar{4}4$) по сравнению с его двухволновым фоном можно объяснить тем, что для этого направления падения в отражающем положении находятся также и другие плоскости, и интенсивность должна раз-

делиться на шесть, разумеется неравных, частей (вместо двух в двухволновом случае), и, естественно, на долю рефлекса ($0\bar{4}4$) достанется сравнительно небольшая интенсивность. Но здесь довольно неожиданным является то, что такое распределение энергии между отдельными рефлексами (ослабление рефлекса, отраженного по Брэггу) происходит на толщинах, значительно превышающих экстинкционную.



Рис. 5.



Рис. 6.



Рис. 7.

Рис. 5. Рефлекс ($\bar{2}\bar{2}4$), третий случай; для образца толщиной 50 мкм.

Рис. 6. Рефлекс ($\bar{2}\bar{2}4$), третий случай; для образца толщиной 150 мкм.

Рис. 7. Рефлекс ($\bar{2}\bar{2}4$), третий случай; для образца толщиной 380 мкм.

Во втором случае увеличение интенсивности рефлекса ($0\bar{4}4$) невозможно объяснить на основе механизма, предложенного в первом случае. Усиление интенсивности многоволновой области по сравнению со своим двухволновым фоном можно объяснить изменением экстинкционной длины для этого рефлекса, т. е. связанный с многоволновым взаимодействием луч неглубоко проникает в кристалл.

В третьем случае возникновение просветления и усиления в многоволновых областях рефлексов типа ($\bar{2}\bar{2}4$) можно объяснить перераспределением волнового поля в кристалле. Зависимость этого явления от толщины, по-видимому, аналогична явлению фокусировки сферических волн в двухволновом случае [5—7]. Наблюдение многоволновых эффектов, кроме рефлекса (000), при переходе к излучению MoK_{α} , можно объяснить тем, что многоволновые области настолько сужаются, что разрешения пленки и установки не дают возможности выявить их. Здесь можно предположить, что распределение энергии между многими рефлексами (по сравнению с двухволновым случаем) компенсируется уменьшением коэффициента поглощения (усиление интенсивности) в шестиволновом случае, и поэтому многоволновые области не отличаются от двухволновых. Но известно [4], что это явление (усиление интенсивности в шестиволно-

вом случае) зависит от толщины, следовательно при изменении толщины один из этих эффектов должен доминировать и проявиться в отраженных рефлексах в виде усиления или просветления. Но эксперимент показывает, что ни для одной толщины этого не наблюдается.

Ереванский государственный
университет

Поступила 15.XII.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Joko, A. Fukuhara. J. Phys. Soc. Japan, 22, 597 (1967).
2. T. C. Huang, M. H. Tillinger, B. Post. Z. Naturforsch. (a), 28, 600 (1973).
3. С. А. Кшевецкий, И. П. Михайлюк. Кристаллография, 21, 381 (1976).
4. Р. Ц. Габриелян, А. О. Аболян. Материалы Всесоюзного межвузовского совещания по многоволновому рассеянию рентгеновских лучей, Ереван, 1968, стр. 66.
5. А. М. Афанасьев, В. Г. Кон. ФТТ, 19, 1775 (1977).
6. В. В. Аристов и др. Письма ЖЭТФ, 28, 6 (1978).
7. В. Д. Козьмич, И. П. Михайлюк. Письма ЖЭТФ, 28, 673 (1978).
8. М. А. Кшевецкая и др. УФЖ, 18, 1171 (1973).
9. М. А. Кшевецкая и др. УФЖ, 18, 2052 (1973).
10. R. Bubakova, O. Pacheroova. Acta Cryst., A24, 5233 (1978).
11. S. Hildebrandt, W. Scherz. Acta Cryst., A34, 5232 (1978).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ՎԵՑԱԼԻՔԱՅԻՆ ՑՐՄԱՆ
ՌԵՖԼԵՔՍՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ԲԱՇԽՄԱՆ
ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Պ. Հ. ԲԵԶԻՐԳԱՆՅԱՆ, Ռ. Յ. ԳԱԲՐԵԼՅԱՆ, Ա. Լ. ՄՇԵՏՅԱՆ

Կատարված է գերմանիումի բյուրեղից $\text{CuK}\alpha_1$ և $\text{MoK}\alpha_1$ ռենտգենյան ճառագայթներով սիմետրիկ վեցալիքային դիֆրակցիայի փորձարարական հետազոտություն ևառի-Բրեգ և Բրեգ-Բրեգ դեպքերում: ($0\bar{4}4$) և ($2\bar{2}4$) ըստ Բրեգի անդրադարձած ռեֆլեքսների վրա դիտվում է բազմալիքային փոխազդեցության երևույթներ (ուժեղացում, պայծառացում, նուրբ կառուցվածք): Դիտված երևույթների համար տրված է որակական բացատրություն:

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INTENSITY DISTRIBUTION AMONG THE REFLEXES OF SIX-WAVE X-RAY SCATTERING

P. A. BEZIRGANYAN, R. Ts. GABRIELIAN, A. L. MSHETSYAN

Using the $\text{CuK}\alpha$ and $\text{MoK}\alpha$ radiation for the Laue—Bragg and Bragg—Bragg cases, the experimental study of symmetrical six-wave configuration on a germanium crystal is carried out. The interesting results (e. g. fine structure, enhancement) are obtained on ($0\bar{4}4$) and ($2\bar{2}4$) type reflexes. Manywave reflexes of ($2\bar{2}0$) type do not differ at all from their two-wave backgrounds. In all the cases the enhancement of (000) reflection is observed.