

Г.Р. ДРМЕЯН

РЕНТГЕНОВСКИЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ УВЕЛИЧИТЕЛЬ (ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА-ЛУПА)

Изготовлена и применена дифракционная линза для увеличения дифракционных картин. Разработана методика, обеспечивающая большое разрешение при наблюдении микроструктур рентгенодифракционных картин.

Ключевые слова: дифракционная линза, угловое увеличение, рентгенотопография, двухкристальная система, разрешение, интерферометр, муар, оптическая сила.

Метод рентгеновской интерферометрии, являющийся одной из важнейших областей диагностики несовершенств и искажений в монокристаллах, успешно применяется для определения поля деформации в упруго-деформированных кристаллах. Высокая чувствительность рентгеноинтерференционных картин к незначительным нарушениям кристаллической решетки объясняется соизмеримостью межплоскостных расстояний кристалла с периодом микроскопической интерференционной структуры падающего на него волнового поля. Метод рентгенодифракционного муара является основным, дающим возможность с большой точностью определить поля напряжений, плотность радиационных (точечных) дефектов в кристаллах [1,2].

Известно, что показатель преломления рентгеновских лучей незначительно отличается от единицы. Поэтому до настоящего времени, к сожалению, не существует ни рентгеновских линз (лупы), ни микроскопов, которые были бы весьма эффективными из-за малости длины волны. В существующих приборах типа "Микрон-2", называемых рентгеновскими микроскопами, не используется ни преломление, ни дифракция рентгеновских лучей. Эти приборы регистрируют тени неоднородностей, появляемые из-за разностей коэффициентов поглощения матрицы и макродефектов (трещин, раковин, включений и т.д.), поэтому являются фактически не микроскопами, а обыкновенными дефектоскопами, имеющими небольшие разрешающие силы и непригодные для наблюдения микродефектов (дислокаций, кластеров и т.д.).

В рентгенотопографических методах прямого наблюдения за дефектами в кристаллах используется динамическая дифракция рентгеновских лучей, т.е. они имеют большое разрешение: пригодны для наблюдения отдельных дислокаций почти совершенных кристаллов. Разрешение рентгенографических методов значительно уступает разрешению электронно-микроскопических методов, применимость которых существенно ограничивается сильным поглощением электронов. Объемные дефекты можно исследовать, как правило, электронно-микроскопическими методами лишь в тонких пленках, толщина которых не больше 1000 Е. Поэтому возникла острая необходимость повышения разрешения

рентгенодифракционных методов исследования структурных несовершенств кристаллов, применяемых в науке, технике и производстве.

При дифракции рентгеновских лучей в кристаллах происходит сильное угловое увеличение пучка, чем и обусловлено большое разрешение рентгенодифракционных методов исследования совершенств кристаллов. Действительно [3], угловое увеличение в кристаллах выражается формулой

$$M = \frac{d\eta}{d\varepsilon} = \frac{\cos \theta}{\cos \varepsilon} \frac{K}{R}, \quad (1)$$

где $d\varepsilon$ - угол сходимости падающего пучка; $d\eta$ - угол расходимости пучка в кристалле; θ - угол Брэгга; R - радиус дисперсионной поверхности; K - волновое число ($K = 1/\lambda$).

Как видно из (1), кристалл является мощным увеличителем: при $MoK_{\alpha 1}$ излучении для 220 отражения кремния M имеет величину порядка 10^4 . Этот эффект углового увеличения можно использовать для получения линейного увеличения, что дает возможность повысить разрешение рентгенодифракционных картин. Указанная цель достигается тем, что через идеальный толстый кристалл, находящийся в положении отражения, пропускается пучок, содержащий информацию о дефектах структуры исследуемого образца или муаровые узоры, полученные от двух- или трехблочного интерферометра.

1. Увеличение рентгеновских муаровых картин

Допустим, имеем двух- или трехкристальную систему, с помощью которой получаем муаровую картину (рис.1 и 2).

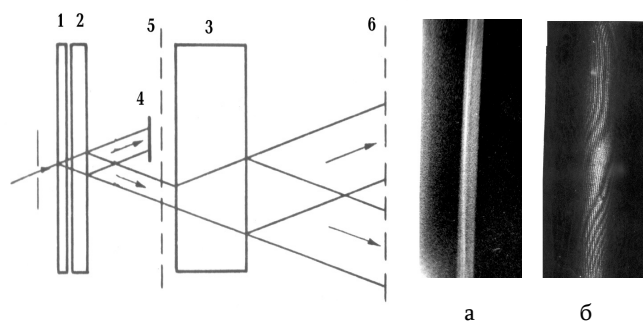


Рис. 1. Увеличение рентгеновских муаровых картин, полученных с помощью двухкристальной системы: а - муаровая картина, образованная двухкристальной системой; б - муаровая картина 1а после увеличения

Узкий пучок рентгеновских лучей, проходя через коллиматор с диафрагмой, падает на двухблочную систему, состоящую из кристаллов **1** и **2**. Дифрагированный пучок падает на совершенный толстый кристалл **3**, находящийся в положении отражения, а проходящий пучок задерживается посредством экрана **4**. Дифрагированный пучок, содержащий муаровые картины, проходит через толстый кристалл, который, не меняя характера муара, увеличивает эту картину. На рис. 1а приведена муаровая картина, образованная двухкристальной системой. Снимок получен на фотопластинке **5**, помещенной между вторым и третьим блоками. На рис. 1б приведена эта же картина на фотопластинке **6**, расположенной после третьего блока. Как видно, муаровых полос на фотопластинке не видно; они четко проглядываются только после третьего блока, т.е. после увеличения.

Аналогичный эффект получается при использовании трехблочной системы вместо двухблочной. На рис. 2 узкий пучок рентгеновских лучей падает на трехблочную систему кристаллов **1**, **2** и **3**. Пучки **7** и **8**, содержащие муаровую картину, падают на толстый совершенный кристалл **4**, а пучки, не участвующие в образовании муаровой картины, задерживаются экранами **5** и **6**.

На рис. 2а приведена муаровая картина, образованная трехкристальной системой (рис. 2). Снимок получен на фотопластинке **9**, помещенной между третьим и четвертым блоками. На рис. 2б приведена эта же картина на фотопластинке **10** после увеличения (после прохождения через четвертый блок).

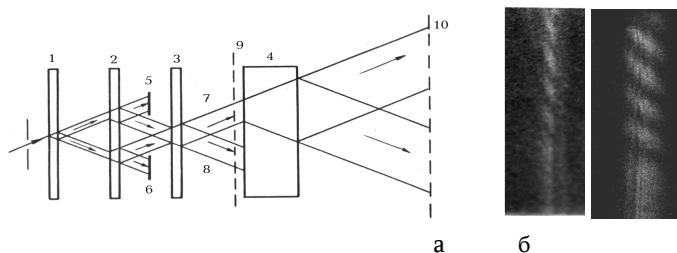


Рис. 2. Увеличение рентгеновских муаровых картин, полученных с помощью трехкристальной системы: а - муаровая картина, образованная трехкристальной системой; б - муаровая картина 2а после увеличения

Как видно, при прохождении пучков, содержащих муаровые картины, через толстый кристалл в положении отражения эти картины сильно увеличиваются, следовательно, значительно увеличивается разрешение системы.

2. Увеличение рентгенотопографических картин

Увеличить можно не только муаровые, но и рентгенотопографические картины. Это можно сделать, пропустив пучок, содержащий рентгенотопографическую картину, полученную от тонкого исследуемого образца, через толстый совершенный кристалл в положении отражения.

На рис. 3 узкий рентгеновский пучок падает на исследуемый кристалл **1**. Дифрагированный пучок **2**, содержащий топографическую картину кристалла **1**, падает на толстый идеальный кристалл **3** в положении отражения, а прошедший

пучок задерживается экраном **4**. На рис. 3а показана топограмма, полученная от исследуемого образца **1** на фотопластинке **5**, а на рис. 3б - увеличенная топограмма, полученная на фотопластинке **6**.

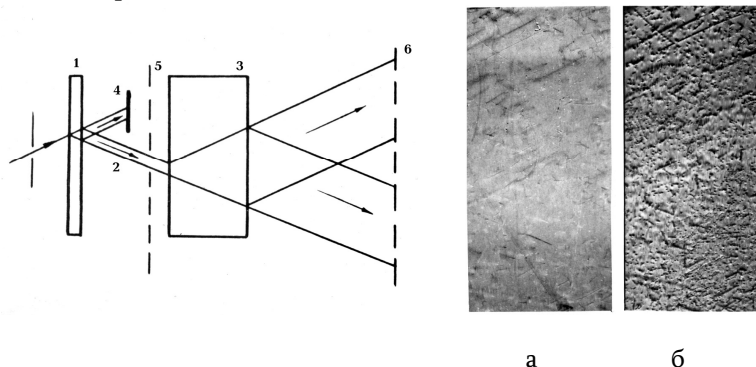


Рис. 3. Схема для увеличения рентгенотопографических картин:
а – топографическая картина, полученная без увеличения;
б – картина 3а после увеличения

Как видно, при прохождении пучка, содержащего дифракционную топографическую картину, через толстый кристалл в положении отражения происходит повышение разрешения этой картины.

Таким образом, схемы, показанные на рис. 1-3, фактически, являются схемами рентгеновских увеличителей (рентгеновских луп или микроскопов), которые дают возможность сильно увеличить рентгеноинтерференционные картины.

3. Рентгеновская дифракционная линза с большой оптической силой

В предыдущих разделах был предложен прибор для увеличения рентгеноинтерференционных и рентгенотопографических картин, которое практически не превышает двух порядков. Действительно, увеличение таких систем фактически определяется отношением толщин кристалла-анализатора (толстый совершенный кристалл, находящийся в положении отражения и установленный после системы тонких монокристаллов) и исследуемого образца (представляющего собой систему из нескольких тонких монокристаллов). Это увеличение из-за неминуемого поглощения рентгеновских лучей в анализаторе нельзя сделать большим. Дело в том, что увеличение по схеме, показанной на рис. 4 (где **1** – исследуемый кристалл, **2** – толстый совершенный кристалл, **3** – экран для задержки прошедшего пучка, **4** – рентгеновская фотопластинка), небольшое – картина ограничена в пределах треугольника SA_1B_1 , и ширина картины не больше, чем основание A_1B_1 этого треугольника. Увеличение определяется отношением AB/A_2B_2 или d_t/d_m , где d_m – суммарная толщина тонких кристаллов, d_t – толщина толстого кристалла, и его можно увеличить, уменьшая A_2B_2 .

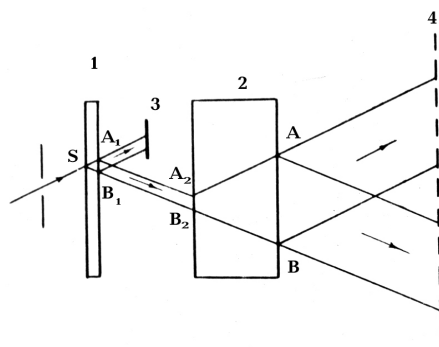


Рис. 4. Схема для увеличения рентгенодифракционных картин

Последнего можно достичь, пропуская последовательно отдельные части дифрагированного пучка $A_1A_2B_2B_1$ через специальную узкую щель, т. е. увеличивая картину по частям.

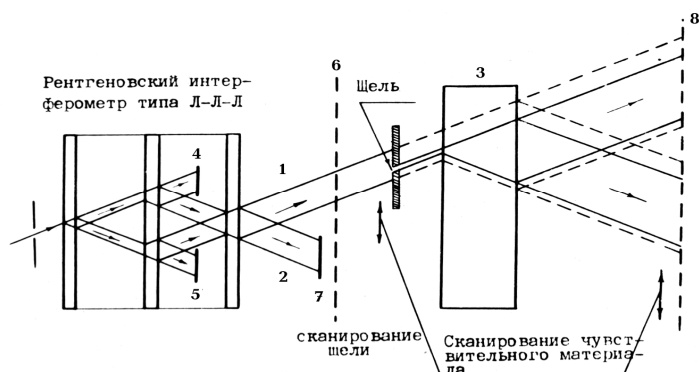


Рис. 5. Схема рентгеновской дифракционной линзы с большой оптической силой

Предлагается метод, дающий возможность повысить разрешение, по крайней мере, еще на порядок, т.е. увеличить рентгенодифракционные картины на три порядка, что очень важно как для науки, так и для производства. Действительно, если дифракционную картину увеличить по частям, то есть пропустить ее отдельные части через узкую щель (рис. 5), то получим дополнительное увеличение. Следовательно, повышается разрешение рентгено топографических и рентгеноинтерферометрических методов исследования совершенств кристаллов и динамических эффектов.

Дифрагированный рентгеновский пучок, содержащий информацию о структуре волнового поля системы тонких монокристаллов (муаровые узоры, топографические изображения дефектов в кристалле или различные картины динамических эффектов), пропускается последовательно по частям по ширине специальной узкой сканируемой щели, установленной между системой тонких монокристаллов и толстых монокристаллов, и фиксируется на рентгеновской пленке, которая расположена за толстым совершенным монокристаллом. Рентгеновская пленка сканируется син-хронно с щелью с определенным

соотношением скоростей, согласован-ным с параметрами системы $V_s/V_r=d_m/d_t$, где V_s и V_r - соответственно скорости перемещения щели и рентгеновской пленки.

Таким образом, щель при ее сканировании постепенно пропускает отдельные части пучка, дифрагированного в первом кристалле (или в системе тонких кристаллов), которые, проходя через толстый совершенный монокристалл в направлении отражения, претерпевают угловое увеличение. Если скорости сканирования выбрать так, чтобы их отношение удовлетворяло условию

$$V_r/V_s = S/S_1, \quad (2)$$

где S - основание треугольника Бормана; S_1 - ширина щели, т.е. ширина пучка, падающего на толстый идеальный монокристалл, то на рентгеновской пленке получим увеличенное изображение топограммы или различных картин динамических эффектов. Такая система дает значительное увеличение дифракционной картины, т.е. позволяет существенно повысить разрешающую способность рентгенодифракционных методов.

Итак, цель достигается тем, что через совершенный толстый кристалл, находящийся в положении отражения, с помощью специальной узкой сканируемой щели последовательно пропускаются отдельные части пучка вдоль ее ширины, содержащего информацию о дефектах структуры исследуемого образца или муаровые узоры, полученные от разных типов интерферометров, а окончательная картина фиксируется на сканируемой пленке.

4. Экспериментальная часть

Допустим, система тонких монокристаллов представляет собой трех-кристальный интерферометр типа Л-Л-Л, с помощью которого получаем муаровую картину (рис. 5). Узкий пучок рентгеновских лучей, проходя че-рез коллиматор с диафрагмой, падает на интерферометр. Пучки **1** и **2**, содержащие муаровые картины, падают на толстый совершенный моно-кристалл **3**, находящийся в положении отражения, а пучки, не участвующие в образовании муаровой картины, задерживаются экранами **4** и **5**. Для наглядности на рисунке показан ход лучей в толстом кристалле только для пучка **1** (пучок **2** задерживается экраном **7**).

На рис. 6а приведена муаровая картина, образованная трехкристальной системой. Снимок получен на рентгеновской пленке **6**, помещенной между третьим и четвертым блоками. На рис. 6б приведена та же картина, зарегистрированная на рентгеновской пленке **8** после увеличения (после прохождения через четвертый блок), без сканируемой щели и при неподвижной рентгеновской пленке, а на рис. 6в - эта же картина, зарегистрированная на рентгеновской пленке **8**, которая сканируется синхронно с щелью согласно соотношению скоростей, данному в (2). Как видно из рис.6б, при прохождении пучков, содержащих муаровые картины, через толстый кристалл в положении отражения они увеличиваются. Из рис.6в видно, что эффект увеличения гораздо сильнее выявляется при наличии

сканирующей щели. На рис. 5 пунктирные линии после щели показывают ход лучей в толстом совершенном кристалле при отсутствии щели.

Таким образом, схема, показанная на рис.5, фактически, является схемой рентгеновских увеличителей (микроскопов).



Рис. 6. Муаровая картина: а - образованная трехкристальной системой; б - увеличенная картина 5а без сканируемой щели и рентгеновской пленки; в - увеличенная картина 5а при сканируемой щели и рентгеновской пленке

Аналогичным образом можно получить увеличение интерференционных картин, полученных от интерферометров произвольного типа, а также повысить разрешение рентгенотопографических методов.

Этот эффект может применяться в таких областях физических исследований, как рентгенография микродефектов, рентгеновская спектроскопия, рентгеновская интерферометрия, прецизионный рентгеноструктурный анализ, а также для исследования тонкой структуры интерференционных картин. Может показаться, что интерференционные картины, наблюдаемые после увеличителя (идеально толстого кристалла), не существовали до него и образовались в нем, т.е. последний кристалл не играет роли увеличителя, а участвует в процессе образования этих картин.

В том, что последний толстый кристалл (увеличитель, рис.1- 5) только увеличивает линейные размеры дифракционной картины и не вносит никакой дополнительной информации в интерференционную картину, можно убедиться на основании следующих теоретических соображений и экспериментальных фактов:

1. Кристалл-увеличитель – толстый и идеальный, следовательно, поле, имеющее большой коэффициент поглощения, полностью исчезает, и в нем не возникает маятникового распределения интенсивности, а внутриполевое распределение, имеющее период, равный межплоскостному расстоянию отражающих плоскостей, вне кристалла не сохраняется. Далее, так как кристалл-увеличитель совершенный и на его топограмме не наблюдается изображения дефектов, то, исходя из вышесказанного, вытекает, что он не меняет характера распределения интенсивности в пучке, проходящем через него, уменьшает общую интенсивность, не изменяя интерференционной картины, но увеличивая ее угловые размеры в плоскости рассеяния.

2. Первичные муаровые картины (рис. 2а и 6а) и их увеличенные картины (картины, наблюдаемые после увеличителя, рис. 2б и 5в) отличаются только размерами в плоскости рассеяния.

3. Наконец, система, состоящая из двух близко расположенных тонких кристаллических пластинок и одного далеко расположенного толстого кристалла

(увеличитель), показывает, что после тонких пластинок интерференционная картина не видна (рис. 1а), но после толстого кристалла она наблюдается (рис. 1б). Можно убедиться, что эту интерференционную картину создает не толстый кристалл - это результат наложения волн на втором кристалле, полученных в первом тонком кристалле в результате расщепления первичной волны. Действительно, если удалить одну из этих тонких пластинок или увеличить расстояние между ними, то интерференционная картина, наблюдаемая после толстого кристалла, исчезнет.

Следовательно, интерференционная картина, наблюдаемая после толстого кристалла, возникла в подсистеме двух тонких кристаллов и стала видимой после увеличения.

Таким образом, последний опыт также убедительно показывает, что кристалл-увеличитель не вносит новой информации в интерференционную картину, а только увеличивает ее угловые размеры в плоскости рассеяния.

По результатам исследования мы приходим к следующим выводам: пропуская пучок, содержащий дифракционную информацию, через идеальный толстый кристалл в направлении отражения можно увеличить угловые размеры дифракционной картины в направлении дифракционного вектора, что приводит к значительному повышению разрешения рентгенодифракционных исследований; разработаны рентгенодифракционные линзы, с помощью которых увеличены рентгенографические и рентгеноинтерференционные картины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абоян А.О.** Исследование полей деформации в кристалле-анализаторе рентгеновского интерферометра, подвергнутого ионной имплантации // Изв. НАН РА, Физика. -2000.- Т.4.№ 4. – С. 212-219.
2. **Абоян А.О.** Рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных дефектов в монокристаллах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2000. – Т.66, № 6. –С.22-24.
3. **Authier A.** Acta geologica et geographica. Universities Gomenianse // Geologica, Bratislava. -1968. –Vol. 14. – P. 11 – 42.

Гюмрийский педагогический институт. Материал поступил в редакцию 30.09.2002.

Հ.Ռ. ԴՐՄԵՅԱՆ

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ԴԻՖՐԱԿՏԻՈՆ ԽՈՇՈՐԱՑՈՒՑԻՉ

(ԴԻՖՐԱԿՏԻՈՆ ՈՍՊԵՏԱԿ - ԽՈՇՈՐԱՑՈՒՑՅԱԼ)

Պատրաստվել և կիրառվել է դիֆրակցիոն ուսպնյակ դիֆրակցիոն պատկերների խոշորացման համար: Մշակվել է ռենտգենադիֆրակցիոն պատկերների միկրոկառուցվածքների դիտման մեծ լուծաչափություն ապահովող եղանակ:

G.R. DRMEYAN

X-RAY DIFFRACTION MAGNIFIER (DIFFRACTION LENS-MAGNIFIER)

A diffraction lens is prepared and applied to magnify diffraction patterns. A method providing high resolution on observation pattern microstructures is developed.