УДК 537.531

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВИДИМОСТИ РЕНТГЕНОВСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ МУАРОВЫХ КАРТИН ТРЕХКРАТНЫМ ЧЕТЫРЕХКРИСТАЛЬНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ

#### А.О. АБОЯН, А.А. ХЗАРДЖЯН

#### Государственный инженерный университет Армении

(Поступила в редакцию 30 сентября 2002 г.)

В работе экспериментально исследована видимость рентгеноинтерферометрических картин, полученных от трехкратного четырехкристального интерферометра, в зависмости от разности амплитуд (интенсивностей) интерферирующих волн. Показано, что с уменьшением разности амплитуд интерферирующих волн видимость интерференционных картин увеличивается.

#### 1. Введение

Как известно, контраст (видимость) рентгеноинтерферометрических картин сильно зависит как от разностей амплитуд интерферирующих волн, так и от качества кристаллов интерферометрических систем [1,2]. Рентгеноинтерферометрические картины очень чувствительны к структурным нарушениям кристаллов, являющихся составными частями интерференционных систем.

Если рентгеноинтерферометрическими методами с большим разрешением можно обнаружить ничтожные различия межплоскостных расстояний и ориентаций отражающих плоскостей, то оценивание этими же методами средней плотности точечных дефектов и их различных скоплений – достаточно трудная задача. Между тем в настояшее время эта задача очень актуальна, так как в микроэлектронике и в производстве полупроводниковых приборов применяются бездислокационные кристаллы, содержащие точечные дефекты с различными плотностями.

Видимо, эту задачу можно решить исследованием интенсивности диффузного рассеяния [1,2] или видимости рентгеновских муаровых картин, полученных от рентгеновских интерферометров, так как увеличение плотности микродефектов приводит к уменьшению видимости муаровых картин. Для решения этой актуальной проблемы нами разработан рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных (точечных) дефектов в кристаллах [3].

С одной стороны, трудно выращивать монокристаллы, свободные от

точечных дефектов, а с другой – подобные дефекты специально вводятся в некоторых технологических процессах.

В настоящей работе исследована видимость муаровых картин в зависимости от плотности точечных дефектов и их микроскоплений.

Для однозначной интерпретации зависимости видимости рентгеноинтерферометрических картин от плотности точечных дефектов необходимо, в первую очередь, исследовать зависимость этой видимости от разности амплитуд суперпозирующих волн и от отдельных микродефектов, что и сделано в этой (первой) части работы.

Вторая часть посвящена исследованию зависимости видимости от плотности точечных дефектов. Результаты этих исследований будут опубликованы.

# Исследование видимости интерференционных картин, полученных при суперпозиции двух плоских волн

Для дальнейшего изложения полезно предварительно рассмотреть интерференцию двух плоских волн в вакууме в зависимости от разности их амплитуд, угла между направлениями их распространения и начальных фаз.

Пусть две монохроматические, *о*-поляризованные волны с амплитудами

$$E_{01} = E_{02} \exp\{-i[2\pi(\mathbf{k}_{1}\mathbf{r}) + \varphi_{1}]\} \quad \varkappa \quad E_{2} = E_{02} \exp\{-i[2\pi(\mathbf{k}_{2}\mathbf{r}) + \varphi_{2}]\}$$

в вакууме налагаются друг на друга.

Для нахождения суммарной амплитуды в поле их наложения, сумму  $E_1 + E_2$  перепишем в следующем виде (при  $E_1 > E_2$ ):

$$E = E_{1} + E_{2} = (E_{01} - E_{02}) \exp\{-i[2\pi(\mathbf{k}_{1}\mathbf{r}) + \varphi_{1}]\} + E_{02} \exp\{-i\left[2\pi\frac{(\mathbf{k}_{1} + \mathbf{k}_{2})\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_{1} + \varphi_{2}}{2}\right]\} \times \exp\{-i\left[2\pi\frac{(\mathbf{k}_{1} + \mathbf{k}_{2})\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_{1} + \varphi_{2}}{2}\right]\} + \exp\{-i\left[2\pi\frac{(\mathbf{k}_{2} - \mathbf{k}_{1})\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_{2} - \varphi_{1}}{2}\right]\}$$

откуда для амплитуды и интенсивности получим

$$E = (E_{01} - E_{02}) \exp\{-i[2\pi(\mathbf{k}_1\mathbf{r}) + \varphi_1]\} + 2E_{02}\cos\left[2\pi\frac{(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2)\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right] \times$$

$$\times \exp\left\{-i\left[2\pi \frac{(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2)\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right]\right\},\tag{1}$$

$$I = |E|^{2} = (E_{01} - E_{02})^{2} + 4E_{01}E_{02}\cos^{2}\left[2\pi \frac{(\mathbf{k}_{1} - \mathbf{k}_{2})\mathbf{r}}{2} + \frac{\varphi_{1} - \varphi_{2}}{2}\right].$$
 (2)

Как видно из (1), при  $E_{01} \neq E_{02}$  в интерференционном поле распространяются две волны: первая – в направлении волнового вектора  $\mathbf{k}_1$  (первая волна), вторая – в направлении векторной суммы волновых векторов  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ .

Амплитуда первой волны не зависит от координат, и ее интенсивность в интерференционном поле во всех точках одинакова (общий фон). Амплитуда второй волны косинусоидально модулирована, и период модуляции обратно пропорционален величине  $|\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2|$ .

Формула (2) показывает, что видимость V модуляции определяется выражением

$$Y = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2E_{01}E_{02}}{(E_{01} - E_{02})^2 + 2E_{01}E_{02}}$$
(3)

Отсюда видно, что видимость принимает максимальное значение (равное единице) только при равных амплитудах ( $E_{01} = E_{02}$ ) интерферируюших волн. Выражение (3) показывает также, что с увеличением разности амплитуд ( $E_{01} = E_{02}$ ) видимость быстро падает. Из (2) также видно, что период модуляции не зависит от разности начальных фаз ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ): изменение разности начальных фаз смещает полосы, но не меняет расстояния между ними.

Исследования указанных факторов связаны со следующими трудностями:

 а) налагаемые пучки должны быть не только однородными, но и когерентными, поэтому такие исследования, видимо, можно проводить только с помошью идеальных интерферометров.

б) строго говоря, создание идеальных интерферометров практически невозможно. Можно создать интерферометры почти идеальной геометрии с почти идеальными кристаллами, но избежать муаровых картин, обусловленных ничтожными разностями межплоскостных расстояний отражающих плоскостей и их ничтожными поворотами друг относительно друга, практически невозможно.

Исследование зависимости видимости интерференционных картин от разностей интенсивностей интерферирующих волн особенно важно для практических применений полиинтерферометров, в которых иногда работают интерферометры с пучками разных интенсивностей.

# Экспериментальное исследование зависимости видимости рентгеноинтерференционных полос от разности амплитуд интерферирующих волн

Для экспериментального исследования зависимости видимости интерференционных полос от различных факторов удобно пользовться двух и трехкратными четырехкристальными интерферометрами. Топограммы и интерферограммы, полученные от одного семейства отражающих плоскостей, не дают полной картины несовершенств исследуемого кристалла. Поэтому для более полного описания деформированного состояния кристаллов необходимо получить дефектограмму от одного и того же кристалла с помощью хотя бы двух или трех семейств плоскостей, отличающихся ориентациями. Итак, возникает необходимость разработки рентгеновской дифракционной полной стереометрической топографии несоверщенств кристаллов. В работе [4] предложен новый ренгеноинтерферометрический способ, более полно описывающий поля деформации кристаллов. Цель достигается с помощью кратных интерферометров.

Под кратностью интерферометра мы подразумеваем число симметрично эквивалентных семейств плоскостей, удобно расположенных для ЛЛЛЛ отражений, как это показано на рис.1а и 16.





Рис.1. Кратные интерферометры: а – двухкратный четырехкристальный интерферометр, б – трехкратный четырехкристальный интерферометр.

Для двухкратного интерферометра (два симметрично-эквивалентных семейства отражающих плоскостей) удобно пользоваться семействами (110) и (110). Как показывает формула

$$\cos \alpha = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\left(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2\right)^{\frac{1}{2}}} , \qquad (4)$$

при кубической сингонии угол  $\alpha$  между плоскостями (110) и (1 $\overline{10}$ ) равен 90°, как показано на рис. Ia.

Для трехкратного интерферометра (три симметрично-эквивалентных семейства отражающих плоскостей) удобно пользоваться семействами  $(1\bar{1}0)$ ;  $(0\bar{1}1)$ ;  $(\bar{1}01)$ . Как видно из (4), угол  $\alpha$  между семействами  $(1\bar{1}0)$  и  $(0\bar{1}1)$ , а также между  $(0\bar{1}1)$  и  $(\bar{1}01)$  симметрично-эквивалентных плоскостей равен  $60^{\circ}$  (см. рис.16).

Нетрудно убедиться, что такой выбор отражающих плоскостей в идеальных кристаллах обеспечивает одинаковость всех факторов интегральных интенсивностей этих семейств кубической сингонии. При одном и том же падающем пучке и указанных ориентациях семейств их интегральные интенсивности могут отличаться только из-за наличия дефектов различно ориентированных относительно отражающих плоскостей этих семейств.

Преимущества таких интерферометров проявляются в следующих исследованиях:

1. Многоблочность (многокристальность) интерферометра дает возможность с помощью одного и того же семейства отражающих плоскостей при одной и той же ориентировке интерферометра провести исследование в нескольких составных интерферометрах. Как мы увидим ниже, предлагаемые интерферометры не только кратные, но и полиинтерферометры – при его данной ориентировке действуют одновременно несколько интерферометров – три трехблочных и два четырехблочных. Это дает возможность, во-первых, исследовать один и тот же дефект (без изменения его ориентировки) с помощью разных интерферометров, принадлежащих одному и тому же семейству отражающих плоскостей. Во-вторых, с помощью задержки различных дифрагированных пучков можно исследовать зависимость видимости интерференционных картин от разности амплитуд интерферирующих волн.

 Кратность интерферометра дает возможность исследовать зависимость видимости интерференционных картин от ориентации дефектов относительно отражающих плоскостей и, таким образом, составить представление об ориентациях линейных дефектов в пространстве и о распределениях точечных дефектов.

Действительно, поворачивая показанные на рис. la и 16 интерферометры вокруг оси, перпендикулярной к большим поверхностям кристаллов интерферометра, мы можем привести его к отражающим положениям одного из семейств  $(1\overline{1}0)$ ,  $(0\overline{1}1)$  и  $(\overline{1}01)$  симметрично-эквивалентных плоскостей и исследовать зависимость видимости дифракционных изображений дефектов в кристаллах от ориентации семейства отражающих плоскостей.

На рис.2а показан ход лучей в трехкратном четырехблочном интерферометре, расстояния между соседними блоками которого одинаковы. Внимательный осмотр показывает, что в таком полиинтерферометре одновременно могут работать три трехблочных (*BCGEB*), (*CFIGC*), (*EGKHE*) и два четырехблочных (*BCFIGEB*), (*BCGKHEB*) интерферометра, причем наложение дифрагированных волн происходит только в трех точках: *G*, *K* и *I*.

Теперь экспериментально исследуем зависимость видимости интерферометрических картин от разности амплитуд интерферирующих волн. Как видно из рис.2а, наложение дифрагированных волн на поверхности четвертого  $(A_2)$  кристалла происходит только в точках K и I. В точке K налагаются друг на друга пучки HK и GK, а в точке I – пучки GI и FI.



Рис.2. а) ход лучей в трехкратном четырехкристальном интерферометре, б) интерференционные картины без задержки пучков *EG* и *CG* (отражение 220).

Нетрудно убедиться, что интенсивности пучков GK и GI гораздо больше, чем пучков НК и F1, т.е. амплитуды волн, участвующих в интерференции в точках К и 1, отличаются друг от друга, поэтому видимость картин интерферирующих пучков 2, 3, 6 и 7 мала. Действительно, пучок НК питается только отражением пучка EH в третьем  $(A_1)$  кристалле (в точке H), а пучок GK питается отражением пучка EG (в точке G) и прохождением пучка CG (в точке G); далее, пучок GI питается прохождением пучка EG (в точке G) и отражением пучка CG (в точке G), а пучок Fl питается только отражением пучка CF (в точке F). Если иметь в виду еще и то, что кристаллы интерферометра толстые (толщины 2 мм, излучение МоК, в них происходит аномальное прохождение и энергия падаюшего пучка в каждом кристалле почти поровну делится между отраженным и прохожденным пучками), то будет ясно, что интенсивности пучков GK и GI будут почти в два раза больше, чем интенсивности пучков НК и FI. Поэтому, если задержать пучок CG (см. рис.2а), то интенсивности всех пучков HK, GK, GI и FI будут одинаковыми и, следовательно, видимость интерференционных картин 2, 6, 3 и 7 при задержке этого пучка СС сильно увеличивается. На рис.26 показаны интерференционные картины, полученные от точек К и І без задержки пучка CG, а на рис. 3 – при задержке этого пучка.

Как видно из этих рисунков (фотоснимков), задержка пучка *CG* приводит к увеличению видимости рентгеноинтерферометрических картин. Из этих снимков также видно, что картины, полученные от одной и той же интерферометрической точки *К* или *I*, одинаковы, а картины, полученные от разных интерферометрических точек (разных интерферометров), отличаются друг от друга. Это вполне естественно, так как разные интерферометры по-

331

лучают информацию по разным каналам. Здесь интересно и то, что задержка пучка *CG* приводит не только к улучшению контраста картин, но и к изменению муаровых фигур этих картин. Это вполне понятно, так как по каналу (после его задержки) интерферометры не получают как интенсивности, так и информации.



Рис.3. Интерференционные картины при задержке пучка CG.

Интересен и случай, когда задерживается не пучок CG, а пучок EG(см. рис.2а). Тогда работают трехкристальный интерферометр *CFIGC* и четырехкристальный интерферометр *BCGKEB*. Как видно из рис.26 и рис.4, задержка пучка *EG* также приводит к увеличению видимости и изменению муаровых картин; конечно, и в этом случае увеличение видимости обусловлено равенством амплитуд интерферирующих волн, а изменение муаровых картин – уменьшением информации, полученной от точек K и I.

Видимость можно увеличить и с помощью монохроматоров, приводящих к равенству амплитуд интерферирующих волн. Действительно, задержка пучка *BC* (рис.2а и 5) приводит к действию трехкристального интерферометра *EGKHE*, а в результате задержки пучка *BE* будет действовать трехкристальный интерферометр *CFIGC* (рис.2а и 6).



Рис.4. Интерференционные картины при задержке пучка EG.



Рис.5. Интерференционные картины при задержке пучка ВС.

Как видно из фотоснимков, видимости пучков 2 и 6 (рис.5) и 3 и 7 (рис.6) гораздо больше, чем видимости этих же пучков, показанные на рис.26, где интерферирующие пучки отличались друг от друга интенсивностями (амплитудами).



Рис.6. Интерференционные картины при задержке пучка ВЕ.

Аналогичные интерференционные картины были получены и от плоскостей  $(0\bar{1}1), (\bar{1}01)$ . Исходя из фотометрических измерений муаровых картин, полученных от всех трех семейств отражающих плоскостей, нами были оценены видимости трех видов интерференционных картин для отражений  $2\bar{2}0, \bar{2}02$  и  $0\bar{2}2$ . Результаты приведены в таблице.

Таблица

Отражение	Видимость без задержки пучков СС и ЕС	Видимость (задержан пучок <i>CG</i> )	Видимость (задержан пучок EG)
220	0.362	0.690	0.71
202	0.354	0.70	0.685
022	0.355	0.693	0.70

Ясно, что увеличение видимости обусловлено равенством амплитуд волн, налагаемых в последнем блоке интерферометра.

Таким образом, в результате наших экспериментальных исследований мы можем констатировать следующее:

 С целью увеличения информативности рентгеноинтерферометрических исследований несовершенств кристаллов были разработаны кратные полиинтерферометры для проведения стереометрических исследований несовершенств кристаллов и видимости рентгеноинтерферометрических картин.

С уменьшением разности интенсивностей (или амплитуд) интерферирующих волн видимость интерференционных картин увеличивается.

 Каждая из волн, фигурирующих в интерферометре, содержит определенную информацию от тех участков кристаллических блоков интерферометра, через которые она проходит. Реальная видимость всегда меньше, чем ее теоретическое значение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. U.Bonse and J.Graeff. Appl. Phys., 22, 93 (1977).

 П.А.Безирганян. Физические основы рентгенографической диагностики несовершенств кристаллов. Изд. Ереванского университета, 1989.

3. А.О.Абоян. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 66, 22 (2000).

4. A.O.Aboyan. Cryst. Res. Technol, 31, 513 (1996).

### ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ԴԻՖՐԱԿՑԻՈՆ ՄՈՒԱՐԻ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՏԵՍԱՆԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱՉՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՔԱՌԱԲՅՈՒՐԵՂ ԵՌԱԿԻ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱՉԱՓՈՎ

#### Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ, Ա.Ա. ԽՉԱՐՋՅԱՆ

փորձնականորեն հետազոտված է քառաբյուրեղ եռակի ինտերֆերաչափից ստացված ռենտգենաինտերֆերաչափական պատկերների տեսանելիությունը կախված ինտերֆերենցող ալիքների լայնույթների (ինտենսիվությունների) տարբերությունից։ Ցույց է տրված, որ ինտերֆերենցող ալիքների լայնույթների տարբերության փոքրացման հետ ինտերֆերենցիոն պատկերների տեսանելիությունը մեծանում է։

# INVESTIGATION OF VISIBILITY OF X-RAY DIFFRACTION MOIRE PATTERNS BY A TRIPLE FOUR-CRYSTAL INTERFEROMETER

#### A.O. ABOYAN, A.A. KHZARDZHYAN

The visibility of X-ray interferometric patterns obtained on a triple four-crystal interferometer is experimentally studied depending on the difference of amplitudes (intensities) of interfering waves. It is shown that the visibility of interference patterns increases with the decrease in the difference of interfering wave amplitudes.