

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН

Г. Р. ДРМЕЯН, Ф. О. ЭИРАМДЖЯН

Работа посвящена изучению природы возникновения муаровой картины, полученной от рентгеновского интерферометра. Экспериментально показано, что известное выражение для вычисления периода муаровой картины не всегда применимо для вычисления периода рентгеноинтерферометрического муара. Вычислены изменения периода муара вследствие температурного градиента на кристаллическом блоке интерферометра.

Введение

Известно [1—3], что при бомбардировке монокристаллов ионами аргона, неона, азота и углерода большой энергии (80 Кэв—3 Мэв) в них возникают радиационные нарушения, сводящиеся, в частности, к изменению межплоскостных расстояний. Как замечено авторами указанных работ, для участков кристалла, в которые внедрены ионы, имеет место объемное расширение. В [4] показано, что дилатационный муар обнаруживается в случае, когда одна из работающих частей кремниевого рентгеновского интерферометра бомбардируется ионами аргона. В [5] указывается, что подобный эффект, т. е. образование дилатации (изменение межплоскостных расстояний), возникает и при создании на кристаллической пластинке температурного градиента, который также ведет к структурным нарушениям кристалла. В связи с этим интересно исследовать влияние внешнего воздействия (температурного градиента) на степень возникающих при этом структурных несовершенств с помощью изменения периода дилатационных муаровых картин, получающихся при использовании рентгеновского интерферометра, состоящего из трех кристаллических пластинок типа использованных в [5].

Известно [6], что интерференционные картины, полученные от рентгеновских интерферометров, очень чувствительны к структурным нарушениям (дефектам) монокристаллов. Измеряя периоды интерференционных картин, можно с высокой точностью вычислить относительные деформации (дилатации) порядка 10^{-8} и малые повороты (ротации) порядка 10^{-3} секунд кристаллических решеток облучаемых участков интерферометра с помощью выражений [7].

$$\Delta d/d = d/\Lambda_{\parallel}, \quad (1)$$

$$\varphi = d/\Lambda_{\perp}, \quad (2)$$

где d — период решетки, φ — угол между дифракционными решетками, Λ_{\parallel} и Λ_{\perp} — периоды соответственно параллельного (дилатационного) муара и муара вращения (ротационного). Эти выражения используются для изучения поля деформаций, возникающих вокруг роторной дислокации в кремниевом интерферометре [9], для определения показателя преломле-

ния различных веществ [10], абсолютных значений структурных факторов с очень высокой точностью [11], а также векторов Бюргера [12] и т. д.

Однако выражения (1) и (2) верны только для двухкристалльной системы [8] (при наложении двух кристаллов), т. е. когда рентгеновская волна последовательно дифрагирует в двух кристаллах, различающихся или периодами, или ориентацией (рис. 1). Но природа возникновения муаро-

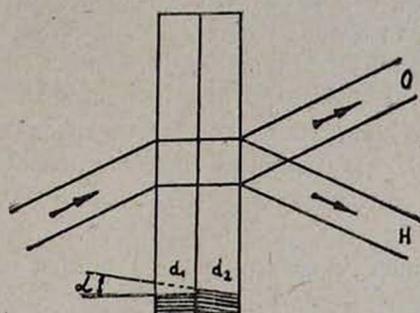


Рис. 1. Двухкристалльная система и ход рентгеновских лучей.

вой картины от рентгеновского интерферометра иная. Во-первых, в интерферометре облучаются не две области, а четыре (рис. 2), и, во-вторых, у входной поверхности последнего блока (блока-анализатора *A*) происходит наложение когерентных волн (явление интерференции). Следовательно, используя формулы (1) и (2) для вычисления относительных деформаций и поворотов кристаллических решеток, мы получаем их усредненные значения.

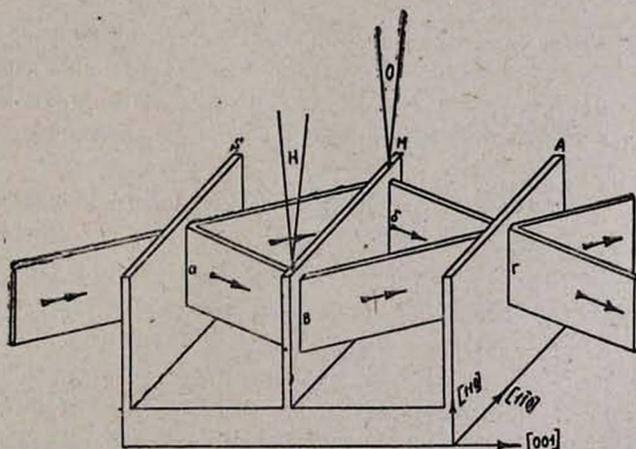


Рис. 2. Рентгеновский интерферометр по Лауэ. Ход рентгеновских лучей и расположение нагревателей.

Экспериментально было показано [13], что в образование муаровой картины разные компоненты (блоки) интерферометра дают различные

вклады. Если интерферометр изготовлен из абсолютно идеального кристалла, т. е. из монокристалла без внутренних напряжений (кристаллические решетки имеют одинаковые периоды и параллельны друг другу), то муаровые узоры не получаются, так как по всему сечению налагающихся пучков имеется одна и та же постоянная разность фаз. Теперь предположим, что три облученные области (a , b и v) имеют один и тот же период решетки d_0 , а четвертый (z) — период d (рис. 2). Тогда муаровые узоры получаются. При нагревании области z период муаровой картины изменяется (если $d < d_0$, то период муара увеличивается, а если $d > d_0$, то период муара уменьшается). Очевидно, что изменение муаровых картин (вследствие температурного градиента, приложенного на блок рентгеновского интерферометра) обусловлено лишь перераспределением внутренних напряжений в этом блоке. А если облучаемые (рабочие) области имеют разные периоды, то оценить механизм возникновения муара почти невозможно. До настоящего времени однозначно не объяснена природа возникновения рентгеновских интерференционных картин, полученных от рентгеновского интерферометра.

Целью настоящей работы является детальное исследование муаровых картин в зависимости от величины температурного градиента на зеркальном блоке интерферометра, а также использование рентгеновского интерферометра для изучения перераспределения напряжений, возникающих в зеркальном блоке интерферометра при его нагревании. При этом хотя муаровые топограммы являются своеобразными двумерными проекциями структурных нарушений блоков, они позволяют исследовать их (деформации) по всей глубине данного блока.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводились на рентгенодифракционной камере КРС со сканирующим устройством (возвратно-поступательное движение). Использовалась рентгеновская трубка с медным анодом марки БСВ-11 и режимом работы 30 кВ и 20 мА, питающаяся от рентгеновской установки УРС-2.

Интерферометр был изготовлен из бездислокационного монокристалла кремния, ориентации которого показаны на рис. 2. Сначала сканированием снималась топограмма (муаровая картина) от всей рабочей части интерферометра (задаваемой пределом возвратно-поступательного движения интерферометра относительно неподвижного падающего пучка рентгеновского излучения), которая изображена на рис. 3. Затем снимались топограммы при нагревании зеркального блока интерферометра поочередно в точках O и H . Соответствующие топограммы приведены на рис. 4а и б. Как видно из этих топограмм, при увеличении тока нагревателя вид муаровых картин (расположение полос) почти не меняется, а периоды изменяются.

Нами исследованы изменения параллельного (дилатационного) муара в зависимости от температурного градиента, приложенного к облучаемым участкам зеркального блока интерферометра. Наши экспериментальные исследования показывают, что все интерферометры дают муаровые кар-

тины, а это доказывает, что между облучаемыми областями интерферометра всегда имеются и повороты, и разбросы межплоскостных расстояний. Следовательно, очень трудно оценить влияние внешнего фактора (облучения, температурного градиента, механического напряжения и т. д.) на

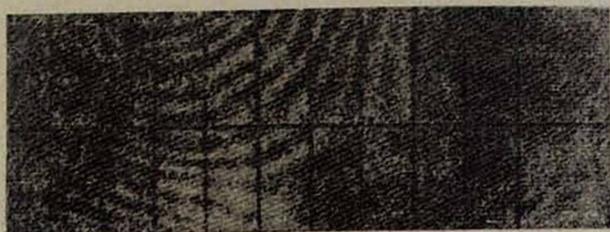


Рис. 3. Исходная муаровая картина, полученная от интерферометра по Лауэ (× 4).

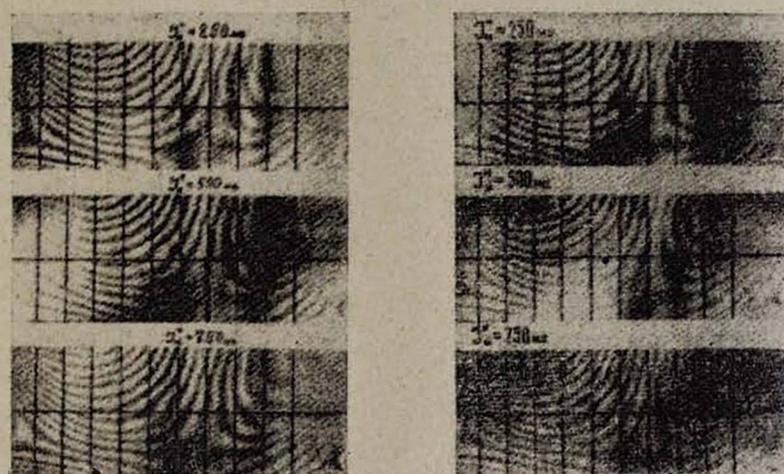


Рис. 4. а) Муаровые картины, полученные при нагревании интерферометра в области *O* (× 4); нагревается левая верхняя точка.
 б) Муаровые картины, полученные при нагревании интерферометра в области *H* (× 4); нагревается правая верхняя точка.

изменение муаровой картины. Известно, что причиной перераспределения напряжений в кристаллах может быть и его неравномерное нагревание. Известно также [5], что при нагревании пластинки в ней возникают напряжения, которые определяются выражением

$$\sigma = \frac{\alpha E T}{1 - \nu}, \quad (3)$$

где σ —внутреннее напряжение, T —температура, $\alpha = 2,64 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ — коэффициент линейного расширения кремния [14], E —модуль Юнга, $\nu = 0,262$ — коэффициент Пуассона. Имея в виду, что относительная де-

формация кристаллической решетки в направлении [110] приводит к изменению периода дилатационного муара, и учитывая (1), получаем

$$\sigma/E = \Delta d/d = d/\Delta l, \quad (4)$$

где Δd — абсолютное изменение периода отражающих плоскостей.

Из (3) и (4) находим

$$T = \frac{d(1-\nu)}{\alpha \Delta l}. \quad (5)$$

Как видно из (5), период дилатационной муаровой картины обратно пропорционален температуре.

Для объяснения влияния термического напряжения на изменение муаровой картины будем считать, что исходный муар (полученный без нагревания блоков интерферометра) обусловлен некоторой разностью температур между облучаемыми областями блоков интерферометра, т. е. предположим, что интерферометр изготовлен из идеального монокристалла, не дающего муара, а муар получается вследствие термического напряжения.

Для вычисления изменения периодов муара все топограммы разделены на две части (см. рис. 3, 4а, б) и определены периоды муаровых картин на границе раздела этих частей. По оси ординат (рис. 5) отложены значе-

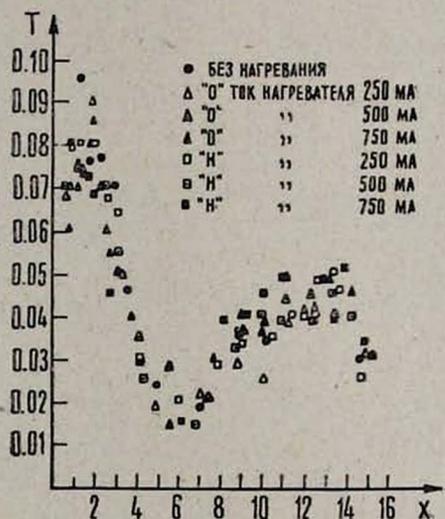


Рис. 5.

ния температур, а по оси абсцисс — расстояния (x) муара от левого края топограммы (от левого края зеркального блока). Как видно из графика, только для области $x = (0 \div 1,8 \text{ мм})$ имеется определенная закономерность изменения температуры в зависимости от тока нагревателя, причем с увеличением тока нагревателя температура в этой области уменьшается. Это является доказательством того, что муар в области $x = (0 \div 1,8 \text{ мм})$ зависит от разности периодов межплоскостных расстояний либо между облучаемыми участками зеркала и расщепителя, либо зеркала и анализатора, при-

чем период межплоскостных расстояний зеркального блока меньше периодов межплоскостных расстояний блока расщепителя или блока анализатора. Но для этой области сравнение экспериментальных данных показывает, что по сравнению с исходным муаром (муаром без нагревания интерферометра) температура понижается, когда нагревается зеркальный блок в области H , и, наоборот, температура повышается при нагревании области O . Для области $x = (2,5 \div 3 \text{ мм})$ при нагревании зеркального блока в областях O и H период муара увеличивается (на графике это соответствует уменьшению температуры). В остальных частях графика изменение температуры вследствие нагревания зеркального блока не подчиняется закономерности (5). Например, при нагревании зеркального блока в области O период муара на расстоянии $x = 10 \text{ мм}$ увеличивается при токе нагревателя 250 мА , а при токе 500 мА и 750 мА уменьшается, в то время как при нагревании области H при токах 250 мА , 500 мА и 750 мА период муара уменьшается (на графике это соответствует уменьшению температуры). На расстоянии $x = (13,5 \div 14 \text{ мм})$ повышению тока нагревателя соответствует увеличение периодов муара (уменьшение температуры на графике), а при токе нагревателя 750 мА в области H период муара почти не меняется (без нагревания — $0,0517 \text{ мм}$, с нагреванием — $0,0520 \text{ мм}$).

В ы в о д ы

Наши экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Выражение (5) неприменимо для вычисления температуры в кристаллической пластинке (блоке) интерферометра, так как оно получено с помощью выражения (1), которое верно только для двухкристалльной системы (при наложении двух кристаллов с отличающимися параметрами решеток). Независимо от распределения внутренних структурных искажений в блоках интерферометра применение выражения (5) всегда приводит к некоторой погрешности при определении распределения температуры в блоке интерферометра.

2. Часть муара, которая непрерывно меняется с изменением температуры, может быть использована для вычисления изменения температуры (изменения термического напряжения) в кристаллическом блоке интерферометра.

Армянский пед. институт им. Х. Абовяна
Ереванский государственный университет

Поступила 28.IV.1978

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Bonse, M. Hart, G. H. Schuttke. Phys. Stat. Sol., 33, 361 (1969).
2. G. H. Schuttke, K. Brack. Z. Naturforsch., 28a, 654 (1973).
3. L. Gerward. Z. Physik, 259, 313 (1973).
4. L. Gerward, G. Christiansen, A. Lindgaard Andersen. Phys. Lett., 39A, 63 (1972).
5. С. Тимошенко. Теория упругости, М., 1976.
6. Ф. О. Эйраджян, П. А. Безиргян. Изв. АН АрмССР, Физика, 5, 453 (1970).

7. П. Хирш и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов, М., 1968.
8. A. R. Lang. Nature, 220, 652 (1968).
9. G. Christiansen, L. Gerward, A. Lindegard Andersen. J. Appl. Cryst., 4, 370 (1971).
10. U. Bonse, H. Hellkötter. Z. Physik, 223, 345 (1969).
11. N. Kato, S. Tanemura, Phys. Rev. Lett., 19, 22 (1967).
12. M. Hart. Phil. Mag., 26, 821 (1972).
13. С. А. Аладжаджян, Ф. О. Эйрамджян, П. А. Безириания. Молодой научный сотрудник ЕГУ, № 18, 90 (1973); № 2, 76 (1974).
14. И. В. Салли, Э. С. Фалькевич. Производство полупроводникового кремния, М., 1970.

ՌԵՏԻԳՐԵՆՑԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԵՆՑԻՈՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

2. Ռ. ԿՐՄԵՅԱՆ, Ֆ. Շ. ԷՅՐԱՄԺՅԱՆ

Աշխատանքը նվիրված է ունեղենյան ինտերֆերոմետրից ստացված մուարի պատկերների ուսումնասիրությանը: Փորձնականորեն ցույց է տրված, որ մուարի պատկերների պարբերության հաշվման համար օգտագործվող հայտնի արտահայտությունը ինտերֆերոմետրի բյուրեղական բլոկի վրա կիրառված ջերմային գրադիենտի հետևանքով մուարի պարբերության փոփոխության հաշվման համար կիրառելի չէ:

EXPERIMENTAL STUDY OF X-RAY INTERFERENCE
PATTERNS

H. R. DRMEYAN, F. H. EIRAMDZHYAN

The nature of the formation of moire patterns obtained from X-ray interferometers was studied. It is shown, that the known expression for the calculation of moire pattern period is not always applicable to X-ray interferometer moire patterns. This has been verified by measuring the change in the pattern period due to the emperature gradient in the interferometer crystal block.