

УДК 539.22.082.79

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВОРОТА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ОТДЕЛЬНОГО БЛОКА ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В БЛОК-КРИСТАЛЛЕ

© 2020 г. Г. Р. Дрмеян*

Институт прикладных проблем физики НАН РА, Ереван, 0014 Армения

**e-mail: drm-henrik@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.08.2019 г.

После доработки 14.09.2019 г.

Принята к публикации 14.09.2019 г.

Исследовано влияние малых поворотов одного из блоков Лауэ-интерферометра на муаровую картину в зависимости от вращающего момента, прикладываемого вокруг нормали к большой поверхности блока-анализатора. Вычислены компоненты напряжений. Показано, что при увеличении вращающего момента период муаровых полос сначала уменьшается, и когда вращающий момент достигает определенного значения, их наклон изменяется в противоположном направлении, а периоды с дальнейшим ростом вращающего момента увеличиваются.

Ключевые слова: Лауэ-интерферометр, муаровая картина, вращающий момент, блок-анализатор, компонент напряжения.

DOI: 10.31857/S1028096020040068

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–5], что картины, полученные от рентгеновских интерферометров, очень чувствительны к структурным нарушениям (дефектам) монокристаллов. Также на интерференционную картину сильно влияет геометрия интерферометра. В частности, Бонзом и Каатом [6, 7] экспериментально и в ходе теоретических расчетов доказано влияние дефокусировки трехблочного Лауэ-интерферометра на вид интерференционной картины. Измеряя периоды интерференционных картин, можно с высокой точностью вычислить относительные деформации (дилатации) порядка 10^{-8} и малые повороты (ротации) кристаллических решеток порядка 10^{-3} угл. с.

Создание различных вариантов рентгеновских интерферометров и расшифровка полученных интерференционных (муаровых) картин позволили решить целый ряд актуальных задач, в частности, исследовать структурные дефекты в монокристаллах [8–11]. Преимущество интерферометрического метода заключается в том, что на рентгеновской муаровой картине отображаются не только структурные дефекты, но и поля напряжений вдали от дефектов. Метод рентгеновского дифракционного муара является единственным прецизионным методом, позволяющим проводить прямые экспериментальные исследования

структуры полей напряжений, возникающих в кристаллических блоках рентгеновского интерферометра, подвергнутых различным внешним механическим воздействиям. В связи с этим интересно исследовать влияние поворотов отдельных блоков интерферометра на интерференционную картину, полученную от него, так как по изменению муаровых полос можно судить о перераспределении полей напряжений, что и явилось целью настоящей работы. Цель достигается с помощью детального исследования муаровых картин в зависимости от величины приложенного момента (поворота) на блоке интерферометра, а также изучения перераспределения напряжений, возникающих в блоке интерферометра при его малом повороте.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Известно [12, 13], что муаровые узоры возникают при наложении двух кристаллов, различающихся параметром или ориентацией. Если кристалл рассматривать как дифракционную решетку, штрихи которой параллельны кристаллографическим плоскостям, находящимся в отражающих положениях относительно рентгеновского излучения, то при наложении двух кристаллов с не-

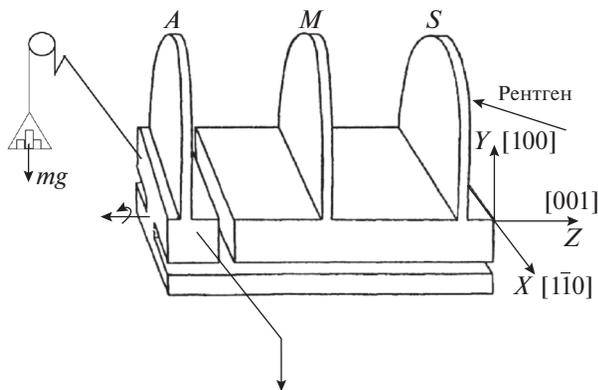


Рис. 1. Трехкристальный рентгеновский интерферометр с шейкой между блоками “зеркало–анализатор” выбранной кристаллографической ориентации: *A* – блок-анализатор; *M* – зеркальный блок; *S* – расщепительный блок.

большой разницей в ориентации для периода муаровых узоров получим:

$$\Lambda_R = \frac{d}{\varphi}, \tag{1}$$

где d – межплоскостное расстояние в отражающих кристаллах (период решетки), φ – угол между отражающими плоскостями этих двух кристаллов, Λ_R – период ротационного муара. Как видно из (1), при достаточно малых φ период муаровых картин поворота Λ_R будет намного больше, чем период решетки d , т.е. происходит сильное увеличение разрешения рентгеновской дифракционной картины.

Так как муаровые картины представляют собой интерференционные узоры, вызванные полем деформации при нарушении кристаллической решетки, то они дают возможность их анализировать. Рентгеновские рефлексы реагируют на структурные дефекты только в том случае, если деформационные сдвиги атомов, вызванные этими дефектами, перпендикулярны атомным плоскостям, от которых отражается рентгеновское излучение [14–16]. Этот факт позволяет исследовать влияние поворота кристаллической решетки отдельного блока интерферометра на перераспределение полей деформации в блок-кристалле.

Для теоретического исследования рассмотрим трехблочный интерферометр по Лауэ, в котором части основания, соединяющие блоки “зеркало–анализатор”, сделаны в виде шейки (рис. 1), что позволяет вращать только блок-анализатор. Если вызывает интерес картина муара, образованная поворотами отдельных блоков, то будем пренебрегать всеми другими отклонениями от идеальности, а для упрощения теоретических расчетов ширину и толщину шейки сделаем одинаковыми, т.е. поперечное сечение шейки будет квадрат-

ным. Рассмотрим кручение шейки, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением. При кручении шейки (прямоугольного стержня) под действием приложенного вращательного момента угол закручивания стержня определяется следующим выражением:

$$\varphi = \frac{2L}{\pi R^4 G} M, \tag{2}$$

где L – длина стержня (шейки), R – радиус окружности, описывающей квадрат со сторонами a , G – модуль сдвига, M – вращательный момент.

Так как поперечное сечение шейки квадратное, $R = a\sqrt{2}/2$, следовательно, из (2) получим:

$$\varphi = \frac{8}{\pi a^4 G} L M. \tag{3}$$

Известно [17], что

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \tag{4}$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона. Учитывая (4), из выражения (3) получим:

$$M = \frac{\pi}{16} \frac{a^4 E}{L(1 + \nu)} \varphi. \tag{5}$$

Имея в виду (1), из выражения (5) получим:

$$M = \frac{\pi}{16} \frac{a^4 E}{L(1 + \nu)} \frac{d}{\Lambda_R}. \tag{6}$$

Как видно из (6), период ротационной муаровой картины обратно пропорционален вращающему моменту. Обозначив постоянный для данного стержня (шейки) множитель при M буквой K , соотношению (3) можно придать вид: $\varphi = KM$, где модуль кручения

$$K = \frac{8}{\pi a^4 G} L. \tag{7}$$

В [18] были определены интегральные напряжения в ионно-имплантированных кристаллах кремния:

$$\sigma_x = \frac{E_x \beta D}{1 - \nu_x}, \quad \sigma_y = \frac{E_y \beta D}{1 - \nu_y},$$

где β – решеточный коэффициент расширения, E_x, E_y – компоненты модуля Юнга, ν_x, ν_y – компоненты коэффициента Пуассона, D – доза облучения. Упругая анизотропия учтена путем введения трех компонент модуля Юнга (E_x, E_y, E_z) и трех компонент коэффициента Пуассона (ν_x, ν_y, ν_z). Предполагается состояние плоского напряжения, т.е. $\sigma_z = 0$.

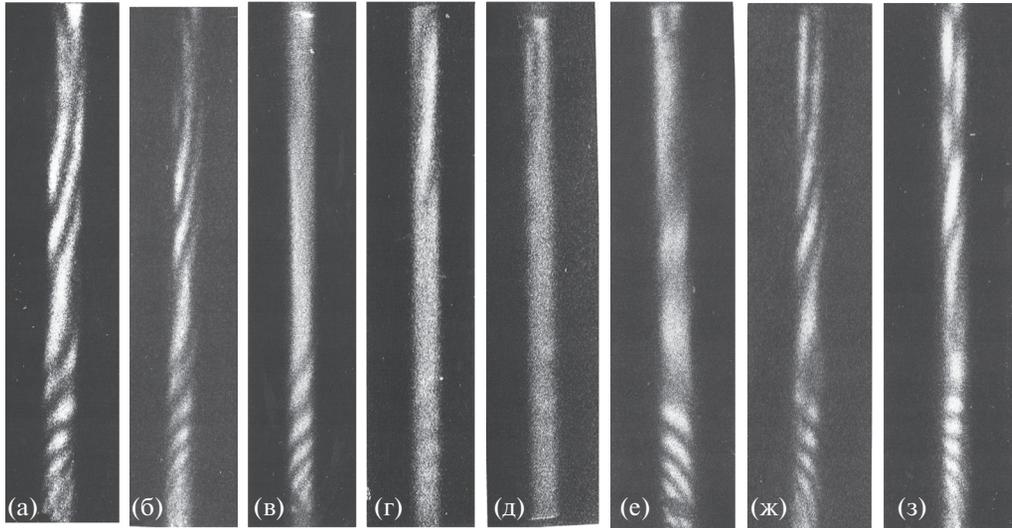


Рис. 2. Секционная муаровая картина до приложения вращательного момента (а) и при различных значениях вращающего момента: б – 1.76×10^{-4} ; в – 3.52×10^{-4} ; г – 5.28×10^{-4} ; д – 7.04×10^{-4} ; е – 8.80×10^{-4} ; ж – 10.56×10^{-4} ; з – 12.32×10^{-4} Н · м.

При анализе напряжений, вызванных кручением, предлагаем заменить βD на KM . Тогда для интегральных напряжений получим выражения:

$$\sigma_x = \frac{E_x KM}{1 - \nu_x}, \quad \sigma_y = \frac{E_y KM}{1 - \nu_y}. \quad (8)$$

Учитывая (4), из (7) получим:

$$K = \frac{16L(1 + \nu)}{\pi a^4 E}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), для интегральных напряжений получим:

$$\sigma_x = \frac{16L(1 + \nu_x)}{\pi a^4 (1 - \nu_x)} M, \quad \sigma_y = \frac{16L(1 + \nu_y)}{\pi a^4 (1 - \nu_y)} M. \quad (10)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения напряжений, вызванных поворотом блока-анализатора Лауэ-интерферометра, из высокосовершенного монокристалла кремния был изготовлен специальный трехкристальный интерферометр (рис. 1). Толщина каждого блока интерферометра приблизительно равна 0.8 мм, ширина 22 мм, высота 18 мм, межблочные расстояния 14 мм, длина шейки $L = 12$ мм, длина стороны квадратного сечения шейки $a = 3.2$ мм, длина рычага 18 мм. Использовано излучение CuK_α . Части основания, соединяющие блоки “зеркало–анализатор”, были сделаны в виде шейки, что позволяло вращать только блок-анализатор. Весь интерферометр был закреплен на столике гониометра так, чтобы при повороте блока-анализатора остальная часть интерферометра

оставалась неподвижной и недеформированной. Для осуществления вращения блока-анализатора были прикреплены тонкие рычаги (рис. 1). Вращающие моменты изменяли от нуля до 12.32×10^{-4} Н · м с интервалом 1.76×10^{-4} Н · м и измеряли соответствующие периоды муаровых полос.

Вначале (до приложения вращательного момента) снимали секционную муаровую картину от интерферометра для отражения $\bar{2}20$ (рис. 2а). После получения исходной картины блок-анализатор интерферометра вращали и снимали серию секционных муаровых картин при различных значениях вращающего момента (рис. 2б–2з). Следует подчеркнуть, что муаровая картина, полученная от интерферометра, почти полностью ротационная (рис. 2а), т.е. реализуются повороты только между теми отражающими плоскостями, которые находятся в облучаемых областях. Этот факт дает возможность однозначно оценить влияние внешнего фактора (вращающего момента).

Так как ось X в рассматриваемом случае параллельна направлению $[\bar{1}10]$, ось Y – $[100]$, а ось Z – $[001]$ (рис. 1), согласно [19] $E_x = 1.689 \times 10^{11}$ Н/м², $\nu_x = 0.262$, $E_y = 1.689 \times 10^{11}$ Н/м², $\nu_y = 0.0624$, $E_z = 1.310 \times 10^{11}$ Н/м², $\nu_z = 0.279$. Как видно из приведенных численных значений, $E_x = E_y$. Это объясняется специальной конструкцией интерферометра: кристаллографические направления $[\bar{1}10]$ и $[100]$ взаимно перпендикулярны, вдоль них модули Юнга равны друг друга, а коэффициенты Пуассона разные. С помощью выражения (9) сначала был оценен параметр K , затем с помощью выражений (1) и (10) вычислены углы между от-

Таблица 1. Угол φ между отражающими плоскостями и компоненты интегральных напряжений σ при различных значениях вращающего момента M

№	$M, 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$	$\varphi, \text{ угл. с}$	$\sigma_x, 10^5 \text{ Н/м}^2$	$\sigma_y, 10^5 \text{ Н/м}^2$
1	1.76	0.027	1.75	0.50
2	3.52	0.045	3.51	2.32
3	5.28	0.085	5.26	3.48
4	7.04	0.11	7.02	4.65
5	8.80	0.16	8.77	5.81
6	10.56	0.24	10.52	6.97
7	12.32	0.36	12.32	8.13

ражающими плоскостями в результате измерения соответствующих периодов ротационного муара и компоненты интегральных напряжений при различных значениях вращающего момента. Результаты приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из экспериментальных данных (рис. 2б–2з), применение различных вращающих моментов относительно блока-анализатора приводит к разному изменению периода муаровых полос. При увеличении вращающего момента период муаровых полос сначала уменьшается, и когда вращающий момент достигает определенного значения, зависящего от параметров эксперимента (ширины, толщины, длины шейки), наклон муаровых полос изменяется в противоположном направлении, а их периоды с дальнейшим увеличением вращающего момента уменьшаются (рис. 2е–2з).

Теперь коротко представим теоретическое обоснование вышеизложенных экспериментальных результатов. Известно [20], что при упругой деформации кристалла происходят искажения первого и второго рода (согласно классификации Н.Н. Давиденкова). В этих случаях относительные смещения атомов в элементарной ячейке составляют небольшую долю наименьшего межатомного расстояния (порядка $1/1000$ и, вероятно, не более $1/100$). Эти перемещения совершаются в пределах локальных потенциальных минимумов, отвечающих равновесным положениям атомов кристалла, т.е. до перехода через потенциальные барьеры, разделяющие положения ближайших соседей. Очевидно, что в представленных экспериментах происходят искажения первого и второго рода. Искажения первого рода охватывают объем всего образца, в этом случае деформация однородная и сопровождается изменением межплоскостных расстояний d на Δd . Рентгенографически искажения первого рода обнаруживаются по смещению линий, определяемому по измене-

нию угла отражения $\Delta\theta$. Искажения второго рода охватывают области, содержащие большое число элементарных ячеек в кристалле. Рентгенографически они обнаруживаются по размытию линий, так как смещения интерференционных пятен, соответствующих отдельным однородно деформированным участкам кристаллов, равны $\pm\Delta\theta$. Эти смещения направлены в разные стороны вследствие наличия растянутых и сжатых участков, которым соответствуют изменения межплоскостных расстояний $\pm\Delta d$, что объясняет размытие муаровых полос на рис. 2г, 2д.

Так как период муаровых полос определяется по формуле $\Lambda_R = d/\Delta\varphi$, где $\Delta\varphi$ – угол сходимости интерферирующих пучков, d – постоянная решетки, период полос тем больше, чем меньше $\Delta\varphi$. Действительно, если блок-анализатор повернут относительно остальных частей интерферометра на малый угол $\Delta\varphi$, то этот поворот приводит к смещению отраженного пучка на угол

$$\beta = 2\Delta\varphi \sin \theta_B = \frac{\lambda\Delta\varphi}{d},$$

где θ_B – угол Брэгга. Так как при данном значении момента вращения изменения межплоскостных расстояний Δd разные (для верхней части блока (далеко от оси вращения) они больше, чем для нижней части (ближе к оси вращения)), изменение угла отражения Брэгга $\Delta\theta_B$ в верхней части блока больше, что и объясняет почти полное исчезновение муаровых полос в верхних частях секционных картин (рис. 2в, 2е). Как видно из экспериментальных данных, когда вращающий момент M достигает значения $8.8 \times 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$, наклон муаровых полос меняется в обратную сторону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований, можно констатировать следующее. Период ротационной муаровой картины обратно пропорционален вращающему моменту, приложенного к блок-анализатору интерферометра. При увеличении вращающего момента период муаровых полос сначала уменьшается, и когда вращающий момент достигает определенного значения, зависящего от параметров эксперимента (ширины, толщины, длины шейки), наклон муаровых полос изменяется в противоположном направлении, а период увеличивается. Рентгеновская интерферометрия может быть использована для изучения поперечных напряжений, вызванных вращающим моментом, приложенным к блоку интерферометра. Результаты настоящей работы положили основу для решения обратной задачи, а именно, восстановления полей механических напряжений в кристал-

лических блоках интерферометра с помощью расшифровки муаровых картин.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта №18Т-1С395.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bonse U., Hart M.* // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 6. P. 155.
2. *Bonse U., Hart M.* // Appl. Phys. Lett. 1965. V. 7. P. 99.
3. *Bonse U., Hart M.* // Z. Phys. 1965. V. 188. P. 154.
4. *Bonse U., Hart M.* // Z. Phys. 1966. V. 190. P. 455.
5. *Bonse U., Graeff W., Materlik G.* // Rev. Phys. Appl. 1976. V. 11. P. 83.
6. *Bonse U., te Kaat E.* // Z. Phys. 1968. V. 214. P. 16.
7. *Bonse U., te Kaat E.* // Z. Phys. 1971. V. 243. P. 14.
8. *Дрмеян Г.Р., Абян А.О., Эйрамджян Ф.О.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 2. С. 57.
9. *Дрмеян Г.Р.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 4. С. 24.
10. *Drmeyan H.R., Melkonyan A.H., Knyazyan Z.H.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 5. P. 1089.
11. *Takeda T., Motose A., Yu Q. et al.* // J. Synchr. Rad. 2000. V. 7. P. 280.
12. *Дитчберн Р.* Физическая оптика. М.: Наука, 1965. 632 с.
13. *Амелинкс С.* Методы прямого наблюдения дислокации. М.: Мир, 1968. 304 с.
14. *Von Laue M.* Rentgenstrahl Interferenzen. Frankfurt: Akademische Verlagsgesellschaft, 1960. 254 p.
15. *James R.W.* The Optical Principles of the Diffraction of X-Rays. London: Bell and Sons Ltd., 1948. 714 p.
16. *James R.W.* // Solid State Phys. 1963. V. 15. P. 53.
17. *Кикоин И.К., Кикоин А.К.* Молекулярная физика. Москва: Физматгиз, 1963. 500 с.
18. *Дрмеян Г.Р.* // Поверхность, рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2005. № 5. С. 65.
19. *Wordman I.I., Evans R.A.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 156.
20. *Жданов Г.С.* Физика твердого тела. М.: Изд-во МГУ, 1962. 497 с.

Study of the Influence of Rotation of the Crystal Lattice of a Separate Interferometer Block on the Redistribution of Deformation Fields in the Block-Crystal

H. R. Drmeyan*

Institute of Applied Problems of Physics, National Academy of Science, Erevan, 0014 Republic of Armenia

**e-mail: drm-henrik@mail.ru*

The effect of small rotations of one of the blocks of the Laue interferometer on the moire pattern is studied, depending on the torque applied around the normal to the large surface of the analyzer block. The stress components are calculated. With increasing torque moment, the period of the moire bands is shown first to decrease, and when the torque moment reaches a certain value, their slope changes in the opposite direction, and periods increase with a further increase in torque.

Keywords: Laue interferometer, moire pattern, torque moment, block analyzer, stress component.