

А.О. АБОЯН

ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДА РЕНТГЕНОВСКИХ МУАРОВЫХ КАРТИН ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Обсуждается вопрос зависимости периода рентгеновских муаровых картин от длины волны. Показано, что период муаровых картин в вакууме зависит от длины волны посредством $\cos\theta$ и не зависит от длины волны внутри кристалла. С увеличением длины волны при данной разности межплоскостных расстояний период муаровых картин в вакууме уменьшается.

Ключевые слова: рентгеновский муар, период муаровых картин, внутрикристалльные и вакуумные муаровые картины, трехкратный трехкристальный интерферометр, интерферометрические топограммы.

Введение. Как известно [1, 2], муаровые явления - мощное средство для проведения прецизионных измерений с большим разрешением.

В оптике муаровое явление имеет важное применение в исследованиях деформаций и напряжений [3 –8].

Оптические (геометрические или механические) муары обычно создают с помощью двух сеток - сетки модели или образца и эталонной сетки [4]. Если периоды этих сеток одинаковые, то для получения муаровых картин необходимо поворачивать их друг относительно друга в своих плоскостях. Если их периоды отличаются друг от друга, то муаровые картины получаются и тогда, когда они ориентированы одинаково (линии сеток параллельны). В последнем случае при повороте одной сетки относительно другой получаются смешанные муаровые картины.

В области рентгеновского диапазона длин волн искусственные сетки для образования муаровых картин неэффективны, поэтому полученные на практике рентгеновские муаровые картины имеют только интерференционный характер.

Ширина угловой области вульф-брэгговских отражений электронов почти на два порядка больше рентгеновских отражений [9, 10], поэтому муаровое явление осуществляется легче при дифракции электронов, чем при дифракции рентгеновских лучей. Видимо, это обусловлено тем, что в экспериментах по дифракции электронов муаровые картины обнаружены раньше, чем в рентгеновских экспериментах. Естественно и то, что теория электронного муара [11-13] разработана раньше, чем теория рентгеновского муара.

Несмотря на то, что муаровый метод электронографических и рентгенографических исследований несовершенств кристаллов является сравнительно новым пополнением в арсенале неразрушающих методов диагностики несовершенств монокристаллов, в настоящее время в этой области выполнены многочисленные как теоретические, так и экспериментальные работы [14 - 27]. В этих и других работах,

проведенных за последние три десятилетия, достигнуты большие успехи и получены результаты, имеющие важное научное и практическое значение. Однако, не умаляя непереоценимого значения прогресса в области применения рентгеновского муарового метода, необходимо отметить некоторые неудовлетворительные стороны этих исследований:

1. Наблюдаемые муаровые картины являются изображениями внутрикристалльных картин. Часто эти картины (внутрикристалльные и вакуумные – наблюдаемые) резко отличаются друг от друга, между тем в вышеперечисленных работах детально исследованы только внутрикристалльные картины.

2. Как теоретически, так и экспериментально нечетко определена и зависимость картин периодов муаровых картин от длины волны.

Экспериментальная часть. Для исследования зависимости структур рентгеноинтерферометрического изображения поля деформации дислокационной линии от длины волны нами были получены интерферометрические топограммы как MoK_{α} – , так и AgK_{α} – излучением, подтверждающие, что с уменьшением длины волны рентгеновского излучения период увеличивается, а видимость муаровых картин уменьшается.



а) б) в)

Рис. 1. Топографические интерферограммы, полученные MoK_{α} – излучением (отражение $2\bar{2}0$, $\bar{2}02$ и $0\bar{2}2$)



а) б) в)

Рис. 2. Топографические интерферограммы, полученные AgK_{α} – излучением (отражение $2\bar{2}0$, $\bar{2}02$ и $0\bar{2}2$)

На рис. 1а–в и 2а–в показаны интерферометрические топограммы, полученные от трехкратного трехкристального интерферометра MoK_{α} – и AgK_{α} – излучением. На рис. 2а–в четко видно увеличение периодов муаровых картин с уменьшением длины волны.

Теоретическая часть. Обычно считают, что период рентгеновских муаровых картин не зависит от длины волны [1, 28]. Видимо, это заимствовано из оптики, где в основном рассматриваются геометрические (механические) муаровые картины, периоды которых действительно не зависят от длины волны [4].

Рентгеновские муаровые картины и их периоды зависят от длины волны не только потому, что с изменением длины волны изменяются облучаемые участки второго кристалла интерферометра, но и потому, что это изменение приводит к изменению направлений муаровых полос, как мы увидим это ниже. Рассмотрим зависимость периодов наблюдаемых муаровых картин от длины волны на примере двухкристаль-

ного интерферометра, у которого величины межплоскостных расстояний отражающих плоскостей первого и второго кристаллов отличаются друг от друга. Исследования проведем для двух волн: $\lambda_1 > \lambda_2$; $k_1 = 1/\lambda_1 < k_2 = 1/\lambda_2$. Пусть $d_1 > d_2$ – межплоскостные расстояния отражающих плоскостей первого и второго кристаллов соответственно; θ_{11} и θ_{12} – углы Брэгга первого и второго кристаллов для волны λ_1 ($\theta_{11} < \theta_{12}$); θ_{21} и θ_{22} – углы Брэгга первого и второго кристаллов для волны λ_2 ($\theta_{21} < \theta_{22}$). Первые индексы в обозначениях углов показывают номер волны, а вторые – номер кристалла.

Пусть две плоские монохроматические волны с волновыми векторами $\mathbf{K}_1$ и $\mathbf{K}_2$ падают на первый кристалл под точными углами Брэгга θ_{11} и θ_{21} соответственно. Допустим, кристаллы интерферометра толстые, и в них первые поля полностью поглощаются. Тогда из первого кристалла под углом θ_{11} выходят волны с волновыми векторами $\mathbf{K}_{02}^{t1}$ и $\mathbf{K}_{h2}^{t1}$, модули которых равны $1/\lambda_1$, а под углом θ_{21} выходят волны с волновыми векторами $\mathbf{K}_{02}^{t2}$ и $\mathbf{K}_{h2}^{t2}$, модули которых равны $1/\lambda_2$.

Все эти четыре волны падают на второй кристалл под углами, отличающимися от его брэгговских углов θ_{12} и θ_{22} . Расположение волновых векторов над и под вторым кристаллом интерферометра показано на рис. 3.

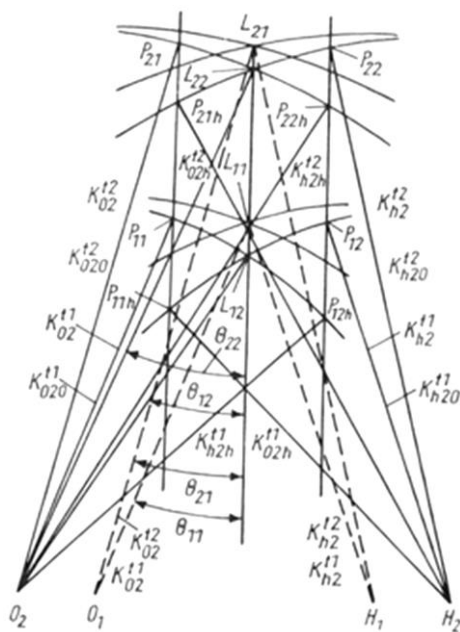


Рис. 3. Расположение волновых векторов над и под вторым кристаллом: L_{11} и L_{12} – точки Лауэ первого и второго кристаллов для волны λ_1 ; L_{21} и L_{22} – точки Лауэ первого и второго кристаллов для волны λ_2 ; P_{11} и P_{12} – точки падения, а P_{11h} и P_{12h} – точки отражения второго кристалла для волны λ_1 ; P_{21} и P_{22} – точки падения, а P_{21h} и P_{22h} – точки отражения второго кристалла для волны λ_2 ; O_1H_1 и O_2H_2 – векторы обратной решетки первого и второго кристаллов

Из второго кристалла выходят волны $\mathbf{K}_{020}^{t1}$, $\mathbf{K}_{02h}^{t1}$, $\mathbf{K}_{h20}^{t1}$ и $\mathbf{K}_{h2h}^{t1}$, возбужденные первой волной, и волны $\mathbf{K}_{020}^{t2}$, $\mathbf{K}_{02h}^{t2}$, $\mathbf{K}_{h20}^{t2}$ и $\mathbf{K}_{h2h}^{t2}$, возбужденные второй волной.

Для ясности на рис. 4а показано только расположение волновых векторов волн, возбужденных первой волной λ_1 , а на рис. 4б – только расположение волновых векторов, направленных в точку O_2 обратной решетки. На этих рисунках N – общая нормаль к поверхности входа и выхода кристаллов интерферометра.

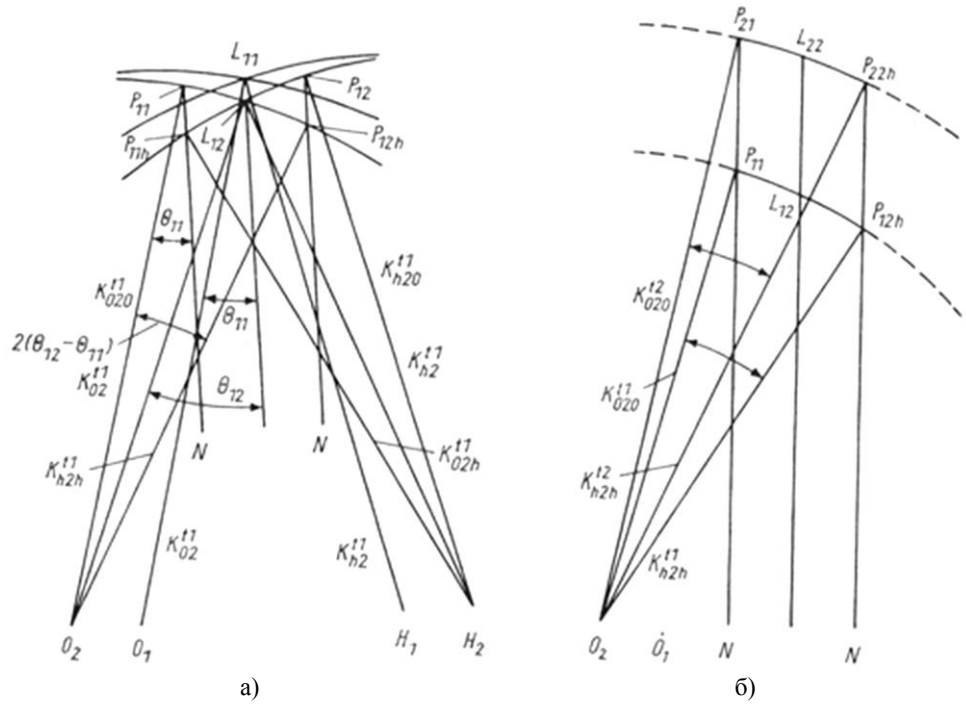


Рис. 4. Расположение волновых векторов волн: а - возбужденных только волной λ_1 ; б - направленных в точку O_2 обратной решетки

С помощью рис. 3 и 4 нетрудно убедиться в справедливости следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \angle P_{11}O_2P_{12h} &= 2(\theta_{12} - \theta_{11}) = \angle P_{11h}H_2P_{12}, \\ \angle P_{21}O_2P_{22h} &= 2(\theta_{22} - \theta_{21}) = \angle P_{21h}H_2P_{22}. \end{aligned} \quad (1)$$

Как видно из этих рисунков, для периодов муаровых полос можно написать следующие выражения:

- для волны λ_1 :

$$\Delta_{10} = \Delta_{1h} = \frac{1}{|P_{11}P_{12h}|} = \frac{1}{|P_{11h}P_{12}|} = \frac{1}{|\mathbf{K}_{020}^{t1} - \mathbf{K}_{h2h}^{t1}|} = \frac{1}{|\mathbf{K}_{h20}^{t1} - \mathbf{K}_{02h}^{t1}|}; \quad (2)$$

- для волны λ_2 :

$$\Delta_{20} = \Delta_{2h} = \frac{1}{|\vec{P}_{21}\vec{P}_{22h}|} = \frac{1}{|\vec{P}_{21h}\vec{P}_{22}|} = \frac{1}{|\vec{K}_{020}^{t2} - \vec{K}_{h2h}^{t2}|} = \frac{1}{|\vec{K}_{h20}^{t2} - \vec{K}_{02h}^{t2}|}. \quad (3)$$

Учитывая (1) и малость разностей $\theta_{12} - \theta_{11}$ и $\theta_{22} - \theta_{21}$, эти выражения для периодов перепишем в следующем виде:

$$\Delta_{10} = \Delta_{1h} = \frac{1}{2k_1(\theta_{12} - \theta_{11})} = \frac{\lambda_1}{2(\theta_{12} - \theta_{11})}, \quad (4)$$

$$\Delta_{20} = \Delta_{2h} = \frac{1}{2k_2(\theta_{22} - \theta_{21})} = \frac{\lambda_2}{2(\theta_{22} - \theta_{21})}.$$

Пользуясь условиями Брэгга для отражающих плоскостей первого и второго кристаллов для λ_1 и λ_2 , выражения (4) приведем к виду

$$\Delta_{10} = \Delta_{1h} = \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2} \cos \theta_{11} = \Delta_0 \cos \theta_{11}, \quad (5)$$

$$\Delta_{20} = \Delta_{2h} = \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2} \cos \theta_{21} = \Delta_0 \cos \theta_{21},$$

где $\Delta_0 = \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2}$ - период муаровых полос во втором кристалле.

Из (5) видно, что:

а) период муаровых полос в вакууме зависит от длины волны посредством $\cos \theta$;

б) период муаровых картин Δ_0 внутри кристалла не зависит от длины волны;

в) так как $\lambda_1 > \lambda_2$ и $\theta_{11} > \theta_{21}$, то $\cos \theta_{11} < \cos \theta_{21}$, следовательно, с увеличением длины волны при данной разности межплоскостных расстояний период муаровых картин в вакууме уменьшается.

Все сказанное наглядно можно показать графически. Действительно, с помощью рис. 4б можно убедиться в том, что

$$|\vec{P}_{11}\vec{P}_{12h}| = |\vec{P}_{11h}\vec{P}_{12h}| > |\vec{P}_{21}\vec{P}_{22h}| = |\vec{P}_{11}\vec{P}_{12h}|. \quad (6)$$

Тогда из (2), (3) и (6) получим

$$\Delta_{10} = \Delta_{1h} < \Delta_{20} = \Delta_{2h}.$$

Так как дуги $P_{21}L_{22}P_{22h}$ и $P_{11}L_{12}P_{12h}$ и соответствующие им хорды $P_{21}P_{22h}$ и $P_{11}P_{12h}$ ограничены двумя нормальными, расположенными в одну сторону диаметра концентрических окружностей, то ясно, что в таких случаях будет больше та хорда, соответствующий радиус которой меньше.

Выводы. Теоретически и экспериментально доказано, что период муаровых полос в вакууме зависит от длины волны посредством $\cos\theta$ и не зависит от длины волны внутри кристалла. С уменьшением длины волны рентгеновского излучения период муаровых картин в вакууме увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинскер З.Г. Рентгеновская кристаллооптика. - М.: Наука, 1982.- 389 с.
2. Шубников А.В. Растровая модель обыкновенных и групповых волн // Природа. – 1965.- Вып. 11. – С. 61 – 67.
3. Oster G., Wasserman M., Zwerling C. // J. Opt. Soc. Amer. -1964.- V. 54.- P.169 -175.
4. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара. – М.: Мир, 1974. – 359 с.
5. Теокарис П. Муаровые полосы при исследовании деформаций.- М.: Мир, 1972. – 335 с.
6. Сухарев И.П., Ушаков Б.Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.
7. Шнейдерович Р.М., Левин О.А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
8. Валуев Н.А. Растровая оптика. - М.: Гостехиздат, 1949. – 382 с.
9. Новицкий В.В., Андреева Е.Н. Исследование изгиба пластинок методом муара // Расчет пространственных конструкций.- М.: Изд-во литературы по строительству, 1964. - Вып. 9. – С. 199- 142.
10. Пинскер З.Г. Современные представления о природе дифракционного муара. - Проблема современной кристаллографии / Под ред. Б.К. Вайнштейна. – М.: Наука, 1975. - 172 с.
11. Пинскер З.Г. Дифракция электронов. – М.: Наука, 1949. - 405 с.
12. Jevers R. // Phil. Mag. - 1962. - V.7. - P. 1681-1720.
13. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. – М.: Наука, 1968.- 440 с.
14. Bonse U., Hart M. // Z. Physik. - 1965. - V. 190. - P. 455- 467.
15. Bonse U., Hart M. // Acta Cryst. -1968. - A24. - P. 240 -245.
16. Laue M.V. Rontgenstrahl – Interferenzen // Akademische Verlagsgesellschaft. - Frankfurt am Main, 1960.- 476 p.
17. Bauspiess W., Bonse U. // Phys. Lett.- 1976. - 56A. - P. 244 -246.
18. Bonse U., Kaat E. // Z. Physik. – 1971. - V. 243.- P. 14 -15.
19. Graeff W., Bonse U. // Z. Physik. – 1977.- V. 27.- P. 19 -22.
20. Kischko U., Bonse U. // J. Appl. Cryst. – 1985. - V.18. - P. 326 -333.
21. Bonse U., Wroblewski T. Novel Measuring Strategies in Neutron Interferometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. -1985. -A235. - P. 557 -560.

22. Bonse U., Wroblewski T. // Phys. Rev. – 1984. - V. 30. - P. 1214-1217.
23. Раранский Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук И.М. Видность маятниковых и муаровых полос в ЛЛЛ - интерферометре // Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по когерентному взаимодействию излучения с веществом. - М., 1985.- С. 28.
24. Раранский Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук И.М., Струк Я.М. Определение функции локальных разориентаций в искаженных кристаллах методом рентгеновской интерферометрии // Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по когерентному взаимодействию излучения с веществом. - М., 1985. - С. 30.
25. Безирганян П.А., Эйрамджян Ф. О. К вопросу о зависимости муаровых картин от длины волны // Изв. АН АрмССР. Физика. – 1972. – Т.7. - С. 215 - 220.
26. Безирганян П.А., Асланян В.Г. // Кристаллография. -1984. -Т.29. - С. 874-881.
27. Абоян А.О., Агбальян С.Г. Образование рентгеновского муара кристаллических решеток. Рентгеновские интерферометры // Вестник ГПУА. Металлургия, материаловедение, недропользование - 2015. - № 1 . – С. 11 – 29.
28. Bonse U., Graeff W. // J. Appl. Phys. -1977. - V.22. – P. 93-143.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 06.10.2015.

Ա. Հ. ԱՐՈՅԱՆ

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՍՈՒԱՐԻ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՊԱՐԲԵՐՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՈՒՄԸ ԱԼԻՔԻ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅՈՒՆԻՑ

Դիտարկվել է մուարի պատկերների պարբերության՝ ալիքի երկարությունից կախվածության հարցը: Ցույց է տրվել, որ մուարի պատկերների պարբերությունը վակուումում կախված է $\cos\theta$ -ի միջոցով: Մուարի պատկերների պարբերությունը բյուրեղի ներսում ալիքի երկարությունից կախված չէ: Տվյալ միջհարթությունային հեռավորությունների տարբերության դեպքում ալիքի երկարության մեծացմամբ մուարի պատկերների պարբերությունը վակուումում փոքրանում է:

Առանցքային բառեր. ռենտգենյան մուար, մուարի պատկերների պարբերություն, ներբյուրեղային և վակուումային մուարի պատկերներ, եռակի եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափ, ինտերֆերաչափական տեղագրեր:

A.H. ABOYAN

DEPENDENCE OF THE X- RAY MOIRE PATTERN PERIODS ON THE WAVE LENGTH

The dependence of the X - ray Moire pattern periods on the wave length is discussed. It is shown that the period of the Moire patterns in the vacuum depends on the wave length by means of $\cos\theta$. The period of the Moire patterns inside the crystals does not depend on the wave length. When the wave length increases at the given difference of interplane distances, the Moire pattern periods in the vacuum decrease.

Keywords: X – ray Moire, Moire pattern period, intracrystal and vacuum Moire pattern, triple, tri-crystal interferometer, interferometric topograms.