

А.О. АБОЯН, С.Г. АГБАЛЯН

ПРИЗНАКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ МУАРОВЫХ КАРТИН В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Разработана методика графического исследования условий возникновения рентгеновских муаровых картин и их наблюдения в кристаллических системах. Определены признаки возникновения муаровых картин при первичных плоских волнах. Показано, что для получения муаровых картин необходимо облучать отражающие плоскости последнего кристалла системы с обеих сторон в угловой области отражения под углами, отличающимися от точного угла Брэгга.

Ключевые слова: муар, двухкристальный и трехкристальный интерферометры, несовершенство кристаллов, ротационные и дилатационные искажения, отражающие плоскости, кинематическое и динамическое рассеяние, угол Брэгга.

1. Введение. Метод рентгеновского дифракционного муара является единственным прецизионным методом, позволяющим проводить прямые экспериментальные исследования структуры полей смещений, деформаций и напряжений дислокационных ансамблей, определения плотности дислокаций, величины и направления их векторов Бюргера, плотности радиационных дефектов в монокристаллах. Рентгеновские двухкристальные и многокристальные интерференционные системы дают возможность определить относительные отклонения межплоскостных расстояний с точностью до 10^{-8} , а повороты - с точностью 10^{-7} рад [1-3].

В [4] методом рентгеновских дифракционных муаровых картин исследованы поперечные деформации, создаваемые имплантированными в кремнии ионами аргона с энергией 200 кэВ. Исходя из интерферометрических топограмм, определены относительные деформации и интегральные напряжения в зависимости от дозы облучения.

С момента получения из системы кристаллов первых электронных и рентгеновских муаровых картин и до настоящего времени предполагалось, что причиной их образования является отличие между кристаллами данной системы или в межплоскостных расстояниях, или в направлениях отражающих плоскостей, или и в тех и в других одновременно [2,5]. Видимо, это предположение заимствовано из оптики [6], где обычно муаровые картины создают с помощью двух сеток - сетки модели и эталонной сетки.

Однако, оказывается, рентгеновские муаровые картины образуются в случае, когда кристаллы не имеют вышеуказанных отличий. С другой стороны, нередки и случаи, когда эти отличия не приводят к образованию муаровых картин. В [7,8] даже предполагается, что причинами возникновения муаровых картин являются только ротационные и дилатационные искажения отражающих плоскостей.

Целью настоящей работы является детальное исследование вопросов возникновения и наблюдения рентгеновских муаровых картин, что является

весьма важной задачей рентгеновской диагностики несовершенств кристаллов и кристаллических систем.

2. Возникновение муаровых картин. Для однозначного толкования муаровых картин необходимо сначала рассмотреть условия их возникновения и наблюдения. При этом удобно применять графический метод исследования рас-положения волновых векторов в обратном пространстве.

При наложении друг на друга двух плоских монохроматических волн с амплитудами

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \exp i(\vec{K}_1 \vec{r} + \varphi_1), \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \exp i(\vec{K}_2 \vec{r} + \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 - начальные фазы, когда они σ - поляризованы и начальные амплитуды одинаковые ($\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02} = \vec{E}_0$), интенсивность суммарного поля принимает следующий вид:

$$I = 4E_0^2 \cos^2 \left(\frac{\vec{K}_2 - \vec{K}_1}{2} \vec{r} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right),$$

т.е. получается периодическое распределение интенсивности. Как видно из последнего, период этого распределения зависит от разности не начальных фаз налагающихся волн, а только волновых векторов. При равных абсолютных значениях волновых векторов период распределения зависит только от величины угла между этими векторами. Наблюдаемость этого распределения интенсивности (наблюдаемость полос) также зависит от угла между волновыми векторами: при больших углах период распределения мал, и практически полосы ненаблюдаемы, а при очень малых углах этот период получается больше сечения рентгеновского пучка, и полосы оказываются вне поля зрения. Поэтому для изучения ситуации возникновения и наблюдения муаровых картин в основном мы должны исследовать угол между волновыми векторами интерферирующих волн. Приведем один из полученных результатов и его доказательство, на котором будут основываться все наши

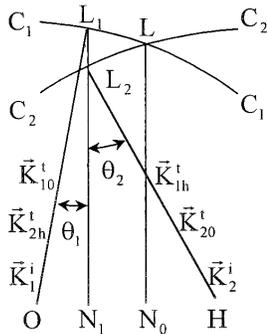


Рис. 1. Случай, когда сумма углов падения равна $\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_B$

дальнейшие исследования. Этот результат может быть сформулирован следующим образом: в плосковолновом приближении для получения рентгеновских муаровых картин необходимо отражающие плоскости кристалла облучать с двух сторон под такими углами скольжения (в пределах угловой области отражения), сумма которых отличается от двойного угла Брэгга. При равенстве этой суммы удвоенному углу Брэгга муаровые картины не возникают. Доказательство этого утверждения можно разбить на две части. Во-первых, убедимся в том, что если сумма углов падения равна двойному углу Брэгга ($\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_B$, рис.1), то муаровые картины не образуются.

Действительно, сумма углов θ_1 и θ_2 может равняться $2\theta_B$ только в случаях, когда или $\theta_1 = \theta_2 = \theta_B$, или насколько один из них больше угла Брэгга, другой настолько же меньше (рис.1). На рис.1 \vec{K}_1^i и \vec{K}_2^i - волновые векторы падающих волн; L_1 - двойная точка, являющаяся точкой падения для волны K_1^i и точкой отражения для волны K_2^i ; L_2 - также двойная точка, являющаяся точкой падения для волны K_2^i и точкой отражения для волны K_1^i . При $\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_B$ точки L_1 и L_2 расположены на одной и той же нормали, поэтому волновые векторы \vec{K}_{10}^t и \vec{K}_{2h}^t волн, распространяющихся в направлении точки О обратной решетки, строго параллельны. По этой же причине строго параллельны и векторы \vec{K}_{20}^t и \vec{K}_{1h}^t волн, распространяющихся в направлении точки Н обратной решетки за кристаллом. Следовательно, в рассматриваемом случае не возникнут муаровые картины. Следует добавить, что в случае, когда волны падают точно под углом Брэгга, точки L_1 и L_2 совпадают с точкой Лауэ L, и опять муаровые картины не образуются.

Теперь покажем, что если сумма углов падения отличается от удвоенного угла Брэгга, то возникают муаровые картины. Расположение волновых векторов в этом случае показано на рис.2.

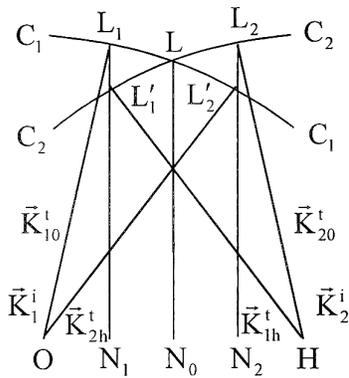


Рис. 2. Случай, когда сумма углов падения не равна $\theta_1 + \theta_2 \neq 2\theta_B$

Теперь точки падения L_1 и L_2 расположены не на одной нормали, следовательно, они не двойные. Проведем из этих точек нормали N_1 и N_2 и получим точки отражения L'_1 и L'_2 , соединением которых с точками Н и О обратной решетки получим волновые векторы \vec{K}_{1h}^t и \vec{K}_{2h}^t отраженных волн. Таким образом, в рассматриваемом случае волны K_{10}^t и K_{20}^t , дифрагированные в направлениях падения, не совпадают с волнами K_{2h}^t и K_{1h}^t , дифрагированными

в направлениях отражения. Следовательно, при выполнении условия $\theta_1 + \theta_2 \neq 2\theta_B$ за кристаллом возникают муаровые полосы, период которых определяется выражениями

$$\Delta_0 = 1/|\vec{K}_{10}^t - \vec{K}_{2h}^t|; \quad \Delta_h = 1/|\vec{K}_{20}^t - \vec{K}_{1h}^t|.$$

3. Случай, когда повороты отражающих плоскостей и разности межплоскостных расстояний не приводят к возникновению муаровых картин. Когда в двухкристальном интерферометре кристаллы толстые и первые поля полностью поглощаются, то в этой системе повороты отражающих плоскостей вокруг оси ОУ (оси, перпендикулярной к плоскости рассеяния) не создают муаровых картин. Действительно, если первый кристалл находится в положении симметричного отражения и отражающие плоскости второго кристалла повернуты вокруг оси ОУ на угол $\Delta\theta$ относительно отражающих плоскостей первого кристалла, то углы Брэгга во втором кристалле слева и справа принимают значения $\theta_B + \Delta\theta$ и $\theta_B - \Delta\theta$, соответствующие вращению вокруг оси ОУ по часовой стрелке (рис.3). Тогда сумма этих углов равна удвоенному углу Брэгга, поэтому как внутри, так и вне второго кристалла муаровые распределения не возникают.

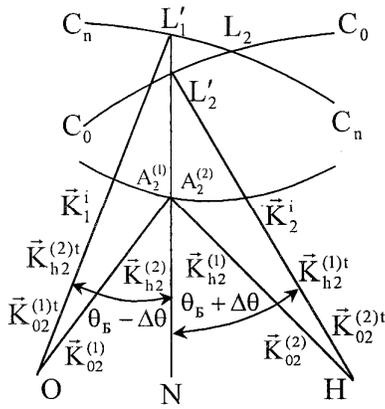


Рис. 3. Расположение волновых векторов, когда отражающие плоскости второго кристалла повернуты вокруг оси ОУ на угол $\Delta\theta$

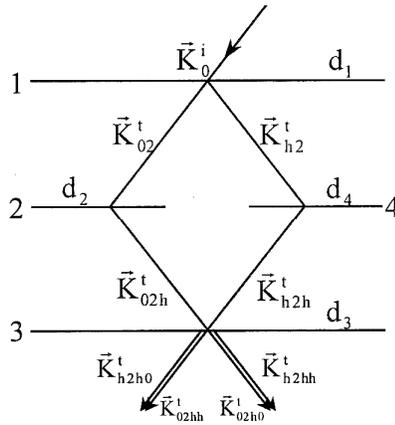


Рис. 4. Трехкристальный интерферометр, зеркальный блок которого состоит из двух частей (2 и 4)

Опишем случай, когда разности межплоскостных расстояний не приводят к возникновению муаровых картин. Рассмотрим четырехкристальный, вернее, трехкристальный интерферометр, второй кристалл которого состоит из двух частей (рис.4). Межплоскостные расстояния этих кристаллов обозначим через d_1, d_2, d_3 и d_4 соответственно, брэгговские углы этих кристаллов - через $\theta_{B1}, \theta_{B2}, \theta_{B3}$ и θ_{B4} соответственно. Допустим, межплоскостные расстояния такие,

что их брэгговские углы удовлетворяют следующим соотношениям: $\theta_{B1} = \theta_{B3} = \theta_B$; $\theta_{B2} = \theta_B + \Delta\theta$; $\theta_{B4} = \theta_B - \Delta\theta$. Если первичная волна K_0^i падает на первый кристалл точно под углом Брэгга θ_B , то волны K_{02}^t и K_{h2}^t , выходящие из первого кристалла, падают на отражающие плоскости второго и четвертого кристаллов под углами скольжения $\theta_{B1} = \theta_B$, т.е. под углами, отличающимися от углов Брэгга этих кристаллов. Имея в виду последнее, а также учитывая, что сумма углов падения и отражения остается равной двукратному углу Брэгга, для углов падения волновых векторов \vec{K}_{02h}^t и \vec{K}_{h2h}^t находим: $\theta_1 = \theta_B + \Delta\theta$; $\theta_2 = \theta_B - \Delta\theta$; $\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_B$. Как видно, отражающие плоскости третьего кристалла облучаются с двух сторон под такими углами падения, сумма которых равна удвоенному углу Брэгга отражающих плоскостей этого кристалла. Следовательно, хотя межплоскостные расстояния кристаллов интерферометра отличаются друг от друга, муаровые картины не возникают.

4. Случай, когда муаровые картины возникают при одинаковых межплоскостных расстояниях и направлениях отражающих плоскостей. Покажем, что даже при строго одинаковых межплоскостных расстояниях и направлениях отражающих плоскостей могут возникнуть муаровые картины из-за непараллельности поверхностей кристаллов интерферометрической системы. Детально рассмотрим случай, когда поверхность выхода второго кристалла трехкристального интерферометра отклонена относительно остальных поверхностей. Из первого кристалла волны K_{02}^t и K_{h2}^t выходят под углом Брэгга и падают на отражающие плоскости второго кристалла под такими же углами (рис. 5).

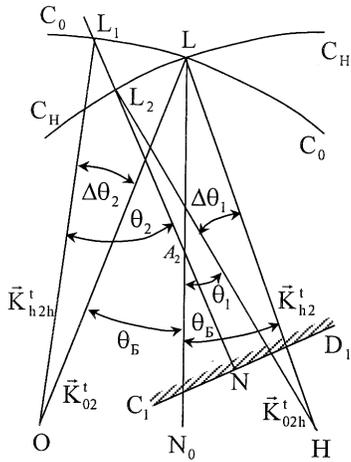


Рис. 5. Расположение волновых векторов в трехкристальном интерферометре между вторым и третьим кристаллами

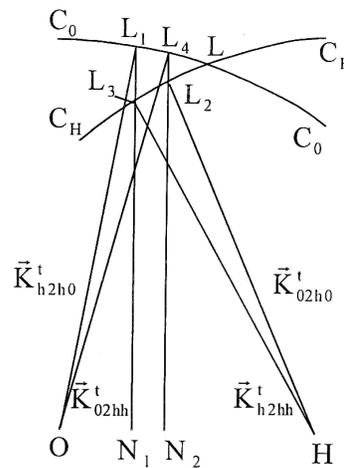


Рис. 6. Волновые векторы за третьим кристаллом

Для нахождения расположения волновых векторов между вторым и третьим кристаллами необходимо через точку распространения A_2 провести нормаль N к поверхности выхода второго кристалла. Соединив точки пересечения L_1 и L_2 этой нормали со сферами C_0C_0 и $C_H C_H$ с точками обратной решетки O и H , найдем волновые векторы \vec{K}_{02h}^t и \vec{K}_{h2h}^t волн, облучающих отражающие плоскости третьего кристалла с двух сторон. Волновой вектор \vec{K}_{02h}^t с отражающими плоскостями составляет угол $\theta_1 = \theta_B + \Delta\theta_1$, а вектор \vec{K}_{h2h}^t с этими плоскостями - угол $\theta_2 = \theta_B - \Delta\theta_2$, следовательно, $\theta_1 + \theta_2 = 2\theta_B + (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \neq 2\theta_B$, т.е. выполняется условие возникновения муаровых картин. В конечном счете, вопрос возникновения муаровых картин решается нахождением направлений волн, выходящих из последнего кристалла интерферометра. Однако, как мы убедились, для решения этого вопроса дос-таточно найти сумму углов скольжения волн, падающих с двух сторон на отражающие плоскости последнего кристалла. Убедимся в том, что два подхода приводят к одним и тем же результатам. Для этого определим направления волновых векторов вне системы. Точки падения поверхности входа третьего кристалла на сферах падения можно найти, если через точки L_1 и L_2 (рис. 5) проведем нормали N_1 и N_2 к этой поверхности (рис. 6). Так как третий кристалл - плоскопараллельная пластина, то нормали N_1 и N_2 будут одновременно и нормальными к поверхности выхода. Поэтому точки пересечения L_3 и L_4 этих нормалей со сферами $C_H C_H$ и $C_0 C_0$ одновременно с точками L_1 и L_2 будут точками падения для поверхности выхода третьего кристалла. Соединив точки L_1, L_2, L_3 и L_4 с точками обратной решетки O и H , найдем волновые векторы $\vec{K}_{02hh}^t, \vec{K}_{h2h0}^t, \vec{K}_{02h0}^t$ и \vec{K}_{h2hh}^t . Как видно из рис. 6, как в направлении падения, так и в направлении отражения возникают муаровые полосы с периодами:

$$\Delta_0 = 1/\left(\left|\vec{K}_{02hh}^t - \vec{K}_{h2h0}^t\right|\right); \Delta_h = 1/\left(\left|\vec{K}_{02h0}^t - \vec{K}_{h2hh}^t\right|\right).$$

5. Зависимость угла отражения от угла падения при геометрии Лауэ. Как известно [9], при геометрии Лауэ в двухволновом приближении динамической теории рассеяния рентгеновских лучей угол скольжения падения максимального отражения совпадает с точным углом Брэгга кинематической теории и углы падения и отражения одинаковые. Интересно исследовать зависимость угла отражения от угла падения при геометрии Лауэ, когда первичная волна падает на отражающие плоскости под углом, отличным от точного угла Брэгга в пределах угловой области отражения. Для простоты рассмотрим случай поглощающего кристалла, в котором первое поле полностью поглощается, а поглощением второго поля можно пренебречь. На рис. 7 показан случай, когда угол падения отличается от точного угла Брэгга, причем угол θ_{01} меньше него. Как видно, в этом случае угол отражения больше угла Брэгга. Аналогичными построениями

можно показать, что если угол падения больше угла Брэгга, то угол отражения меньше него. Интересно отметить (рис. 7), что насколько угол падения меньше угла Брэгга, настолько же угол отражения больше угла Брэгга, и наоборот.

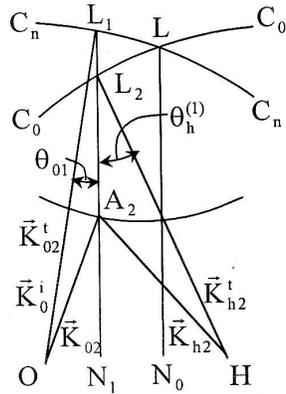


Рис. 7. Случай $\theta_{01} < \theta_B$

В этом легко можно убедиться, имея в виду, что: сферы падения $C_n C_n$ и отражения $C_0 C_0$ имеют одинаковые радиусы K_0^i ; при угле падения, равном углу Брэгга, точка L_1 совпадает с точкой Лауэ L и угол отражения также совпадает с углом Брэгга; увеличение (или уменьшение) углов падения и отражения определяется одной и той же дугой $L_1 L$ указанных сфер. Таким образом, мы приходим к важному выводу: при геометрии Лауэ в угловой области отражения изменение направления падения первичного пучка приводит к такому изменению направления отраженного пучка, при котором сумма углов падения и отражения остается

равной двукратному углу Брэгга: $\theta_{01} + \theta_h^{(1)} = \theta_{02} + \theta_h^{(2)} = 2\theta_B$. Нетрудно убедиться в том, что полученные результаты остаются в силе и для непоглощающих кристаллов.

На основании наших исследований приходим к следующим основным выводам:

1. Разработана методика графического исследования условий возникновения и наблюдения рентгеновских муаровых картин в отдельных кристаллах и кристаллических системах.
2. Показано, что насколько угол скольжения падения меньше угла Брэгга, настолько же угол скольжения отражения будет больше угла Брэгга, и наоборот. Дальнейшие исследования показали, что все выводы относительно образования рентгеновских муаровых картин, полученных в работе, являются результатом данного положения.
3. В двухкристальном интерферометре при одинаковых межплоскостных расстояниях и направлениях отражающих плоскостей образование муаровых картин обусловлено наклоном второй поверхности со стороны падения первичного пучка, а в трехкристальном интерферометре - наклонами второй и четвертой поверхностей со стороны падения первичного пучка. Отклонение остальных поверхностей в отдельности не приводит к образованию муаровых картин.
4. Рентгеновские муаровые картины возникают только в случае, когда на отражающие плоскости кристалла (последнего кристалла системы) с двух сторон падают волны в пределах угловой области отражения под такими углами скольжения, сумма которых отличается от удвоенного угла Брэгга.
5. Поворот отражающих плоскостей, облучающихся с двух сторон, вокруг оси, перпендикулярной плоскости рассеяния, не приводит к образованию муаровых картин.

С применением указанной методики проведено обширное исследование в области рентгенодифракционной диагностики несовершенств кристаллов, в частности, показано, что при асимметричных отражениях, когда угол отражения отличается от точного угла Брэгга, даже в идеальной геометрии двухкристального интерферометра получается муаровое распределение интенсивности, которое не исчезает даже тогда, когда второй кристалл - плоскопараллельная пластинка. В случае асимметричного отражения, когда межплоскостные расстояния первого и второго кристаллов отличаются друг от друга, плоскости муарового распределения за вторым кристаллом параллельны отражающим плоскостям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bonze U., Hart M.** // Appl.Phys. Letters. -1965. - Vol. 6. - P. 155-161.
2. **Абоян А.О.** Рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных дефектов в монокристаллах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2000.- Т.66, № 6. - С. 22-24.
3. **Абоян А.О.** Исследование видимости рентгеновских дифракционных муаровых картин трехкратным четырехкристальным интерферометром // Изв. НАН РА. Физика. -2003. - Т.38, № 5. - С. 326-334.
4. **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.
5. **Пинскер З.Г.** Рентгеновская кристаллооптика. -М.: Наука, 1982.-389 с.
6. **Дюрелли А., Паркс В.** Анализ деформации с использованием муара. -М.: Мир, 1974.-359 с.
7. **Authier A., Milne A.D., Sauvage M.** // Phys. Stat.Sol. -1968. - Vol.26. - P. 469-480.
8. **Пинскер З.Г.** Проблемы современной кристаллографии. -М.: Наука, 1975.-350 с.
9. **James R.W.** // Solid State Phys.-1963. - Vol. 15. - P. 53-220.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.07.2004.

**Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ, Ս.Գ. ԱԴԲԱԼՅԱՆ
ԲՅՈՒՆԵՂԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ՌԵԼՏԳԵԼՅԱՆ ՄՈՒԱՐԻ
ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՀԱՅՏԱՆԻՇՆԵՐԸ**

Մշակվել է բյուրեղական համակարգերում ռենտգենյան մուարի պատկերների առաջացման և դիտման պայմանների գրաֆիկական հետազոտությունների մեթոդ: Որոշվել են մուարի պատկերների առաջացման հայտանիշները առաջնային հարթ ալիքների դեպքում: Ցույց է տրված, որ մուարի պատկերներ ստանալու համար անհրաժեշտ է համակարգի վերջին բյուրեղի անդրադարձնող հարթությունները երկու կողմից ճառագայթել անդրադարձման անկյունային տիրույթի Բրեգի ճշգրիտ անկյունից տարբերվող անկյունների տակ:

**A.H. ABOYAN, S.G. AGHBALYAN
INDICATIONS OF ARISING X-RAY MOIRE PATTERNS IN CRYSTALLINE SYSTEMS**

A method for graphical investigation of the condition for arising and observing the X-ray Moire patterns in crystalline systems is developed. Indications for arising Moire patterns at primary plane waves are defined. It is shown that to obtain Moire patterns, it is necessary to radiate the reflecting planes of the last crystalline of the system on two sides at different angles from the Breg's accurate angle of the reflection angular range.