

УДК 66.017
PACS 61.05.cp

Анализ дифракции белого рентгеновского излучения на кристаллах методом Эвальда при определении линейных параметров кристаллической решётки

А.Я. Кочубей, И. А. Тренинков

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ВИАМ)
105005, Москва, ул. Радио, д. 17
E-mail: trigorya@gmail.com

Показана возможность применения коротковолновой границы белого рентгеновского излучения для экспериментального определения линейных параметров кристаллической решётки. Рассмотрены два варианта рентгеновской съёмки, позволяющей зафиксировать дифракционный эффект, лежащий в основе определения линейных параметров: съёмка при изменении напряжения на рентгеновской трубке и постоянном угле дифракции, а также съёмка при изменении угла дифракции и постоянном напряжении на трубке. Для обоих вариантов съёмки получены расчётные формулы, позволяющие экспериментально определить линейные параметры решётки. С применением рассмотренных типов рентгеновской съёмки и полученных расчётных формул определены межплоскостные расстояния в кристаллах некоторых простых веществ.

Ключевые слова: непрерывный рентгеновский спектр; белое рентгеновское излучение; период решётки; кристаллическая структура; построение Эвальда

Поступила в редакцию 25.12.2019; принята к опубликованию 30.01.2020

White X-ray radiation diffraction in crystals analysis by Ewald method in determining crystal lattice linear parameters

A. Ya. Kochubey, I. A. Treninkov

Federal state unitary enterprise “All-Russian scientific research institute of aviation materials”
Radio st. 17, 105005, Moscow
E-mail: trigorya@gmail.com

The possibility of using the short-wave boundary of white X-ray radiation for the experimental determination of the linear parameters of the crystal lattice is shown. Two variants of X-ray exposure are considered, which allows to fix the diffraction effect underlying the determination of linear parameters: shooting when the voltage on the X-ray tube and the constant angle of diffraction, as well as exposure when the diffraction angle and the constant voltage on the tube change. For both variants of the exposure, calculation formulas are obtained that allow experimentally determining the linear parameters of the lattice. With the application of the considered types of exposure and the

resulting calculation formulas determined the interplanar distances in the crystals of some simple substances.

Keywords: continuous roentgen spectrum; white X-radiation; lattice spacing; crystal structure; Ewald structure

Received 25.12.2019; accepted 30.01.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-43-51

1. Введение

Развитие авиационной и космической техники требует создания новейших материалов со сложным комплексом свойств [1–3]. Решение таких задач возможно при разработке соответствующих методов структурных исследований, включающих методы рентгеноструктурного анализа [4–7]. В работах [8–11] показана эффективность применения белого рентгеновского излучения с целью изучения симметрии кристаллической решётки, типа элементарной ячейки и угловых параметров решётки. В частности, показано, что угловые параметры решётки α , β , γ могут быть непосредственно измерены по прямым полюсным фигурам (ППФ), экспериментально построенным при облучении кристалла непрерывным рентгеновским спектром.

Применение белого рентгеновского излучения представляет научный и практический интерес при определении линейных параметров кристаллической решётки – периодов a , b , c и межплоскостных расстояний d_{hkl} . Линейные параметры решётки могут быть вычислены с применением уравнения Вульфа-Брэгга [12–14], в котором в качестве длины волны λ применяется коротковолновая граница λ_{\min} белого рентгеновского излучения.

2. Применение коротковолновой границы при определении линейных параметров решётки

Коротковолновая граница непрерывного (белого) спектра рентгеновской трубки (включающего также линии характеристического излучения материала анода) является резкой (рис. 1), что позволяет надёжно зафиксировать дифракционный эффект (рост интенсивности), связанный с пересечением узла обратной решётки внешней границей области отражений. Такое пересечение возможно реализовать двумя способами:

1. При неизменном (фиксированном) угле θ непрерывно (плавно) изменять длину волны коротковолновой границы белого спектра путём непрерывного (плавного) изменения напряжения на рентгеновской трубке (рис. 2, а). Чем выше напряжение на рентгеновской трубке, т.е. чем меньше λ_{\min} , тем уже интервал длин волн $[\lambda_{\min}, 1,5 \lambda_{\min}]$ и круче график зависимости $I(\lambda)$ на этом интервале (рис. 2, б).

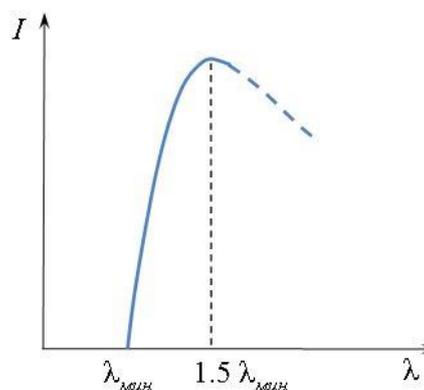


Рис. 1. График функции $I(\lambda)$ упирается в шкалу длин волн λ в точке $\lambda = \lambda_{\min}$

2. При неизменном (фиксированном) значении коротковолновой границы белого спектра путём непрерывного (плавного) изменения брэгговского угла θ в процессе $(\theta-2\theta)$ -сканирования (рис. 3).

В обоих случаях требуемая система кристаллических плоскостей предварительно должна быть выведена в отражающее положение, т.е. соответствующий узловой ряд обратной решётки должен быть совмещён с вектором отражения.

При съёмке в белом излучении сканирование узлового ряда осуществляется таким образом, что после пересечения одного узла коротковолновой границей и её продвижении к следующему узлу узлового ряда обратной решётки, пересечённые ранее узлы продолжают оставаться в области регистрации AB , т.е. счётчик продолжает регистрировать интенсивность их отражений. Поэтому сканирование узлового ряда с применением белого излучения является интегральным (т.е. суммирующим по узлам), а не дифференциальным (т.е. раздельным по узлам), как это имеет место, например, при $(\theta-2\theta)$ -сканировании узлового ряда с применением монохроматического излучения (рис. 4).

Дифракционный эффект, связанный с пересечением узлов обратной решётки внешней (коротковолновой) границей области отражений, может быть использован на практике с целью определения линейных параметров (межплоскостных расстояний и периодов) кристаллических решёток. Для регистрации такого эффекта требуется дифрактограмма, т.е. экспериментально построенная зависимость интенсивности рентгеновских отражений (фиксируемых точечным счётчиком) от из-

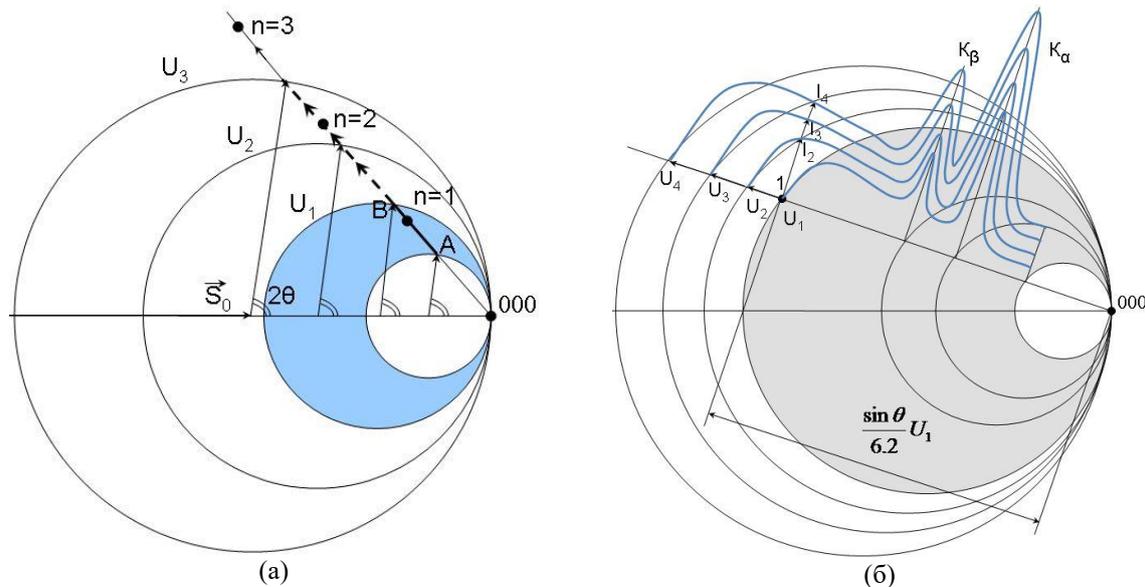


Рис. 2. Влияние напряжения U на рентгеновской трубке: а – увеличение диаметра внешней сферы Эвальда, ограничивающей область отражений, $U_3 > U_2 > U_1$, $n = 1, n = 2$ и т.д. – номера узлового ряда обратной решётки; б – изменение спектра белого излучения при изменении напряжения на рентгеновской трубке

меняемого параметра: либо напряжения на рентгеновской трубке (1-й способ), либо брэгговского угла θ (2-й способ).

ласти отражений белого рентгеновского излучения.

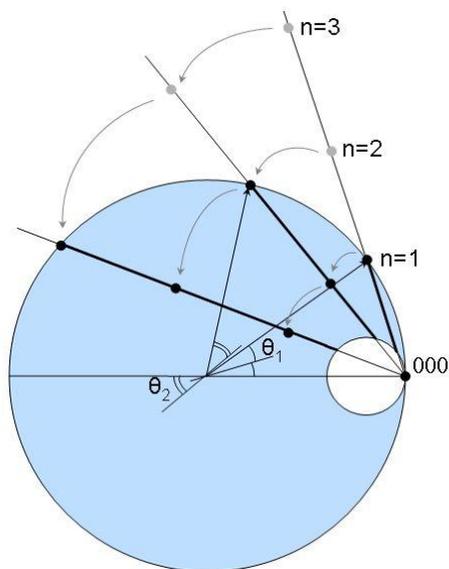


Рис. 3. При увеличении брэгговского угла ($\theta_2 > \theta_1$) в процессе $(\theta-2\theta)$ -сканирования узлы $n = 1, n = 2$ и т.д. последовательно пересекаются с внешней границей области отражений

3. Способ 1

Измерение межплоскостных расстояний кристаллов путём изменения коротковолновой границы непрерывного спектра, что физически означает сканирование узлового ряда обратной решётки в процессе непрерывного увеличения радиуса внешней ограничивающей сферы Эвальда $R = \lambda_{\min}^{-1}$ об-

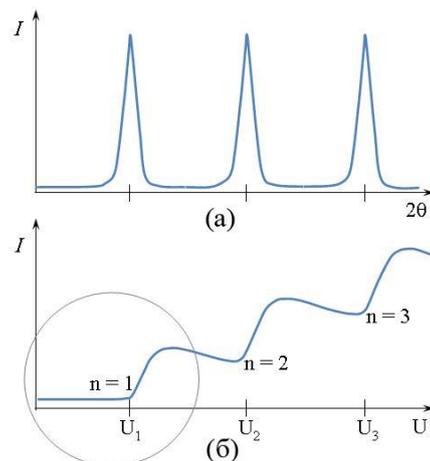


Рис. 4. Дифракционный спектр $I(\lambda)$ при сканировании узлового ряда обратной решётки: а – с применением монохроматического спектра при $(\theta-2\theta)$ -сканировании; б – с применением белого спектра без учёта характеристической составляющей материала анода рентгеновской трубки

При фиксированном угловом положении (точечного) счётчика 2θ и ориентированном заданным образом кристалле, когда соответствующий узловой ряд $n(hkl)$ (где n – последовательность натуральных чисел, учитывающая законы погашения) обратной решётки выведен на отрезок регистрации AB области отражений, непрерывное увеличение напряжения U на рентгеновской трубке приводит к непрерывному уменьшению величины

коротковолновой границы λ_{\min} белого излучения согласно формуле

$$\lambda_{\min} = \frac{12.4}{U}, \quad (1)$$

где λ_{\min} – коротковолновая граница белого спектра, Å , U – напряжение на рентгеновской трубке, кВ. Далее везде по тексту следует иметь в виду, что число 12.4 имеет размерность «ангстрем×киловольт».

Согласно построению Эвальда координата точки B пересечения сканируемого узлового ряда обратной решётки внешней сферой отражений равна модулю вектора рассеяния волны λ_{\min} :

$$B = \frac{2 \sin \theta}{\lambda_{\min}} = \frac{2U \sin \theta}{12.4} = \frac{U \sin \theta}{6.2}, \quad (2)$$

т.е. зависит от напряжения на трубке линейно и непрерывно перемещается вдоль узлов ряда при увеличении напряжения U . Координата точки A пересечения сканируемого узлового ряда внутренней границей (сферой) области отражений равна

$$A = \frac{2 \sin \theta}{\lambda_{\max}}, \quad (3)$$

т.е. в отличие от точки B , постоянна в процессе сканирования, так как по условию съёмки $\theta = \text{const}$, а λ_{\max} определяется поглощающими свойствами материала окна рентгеновской трубки. Таким образом, непрерывное увеличение напряжения на рентгеновской трубке при неизменном θ приводит к непрерывному увеличению длины отрезка регистрации AB и к последовательному увеличению количества узлов узлового ряда обратной решётки на отрезке регистрации. Поэтому рост интенсивности, регистрируемый счётчиком, при плавном увеличении напряжения на аноде должен иметь ступенчатый характер, где каждая ступень соответствует определённому узлу узлового ряда обратной решётки. То есть согласно формуле Вульфа–Брэгга, на экспериментально построенной зависимости $I(U)$ точки перегиба или локальные минимумы будут возникать периодически при напряжениях на трубке, равных

$$U_n = n \frac{6.2}{d \sin \theta}, \quad (4)$$

где n – последовательность натуральных чисел, учитывающая законы погасания.

В зависимости от величины периода узлового ряда обратной решётки минимумы могут переходить в точки перегиба.

Для двух соседних точек перегиба (локального минимума) графика $I(U)$, соответствующих двум соседним узлам обратной решётки с номерами n и $(n+1)$, справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} n\lambda_n = 2d \sin \theta, \\ (n+1)\lambda_{n+1} = 2d \sin \theta, \end{cases} \quad (5)$$

где $\lambda_{n,n+1} = \frac{12.4}{U_{n,n+1}}$.

$$\begin{cases} \frac{12.4n}{U_n} = 2d \sin \theta \\ \frac{12.4(n+1)}{U_{n+1}} = 2d \sin \theta \end{cases} \Rightarrow \frac{n}{U_n} = \frac{n+1}{U_{n+1}} \Rightarrow$$

$$n = \frac{U_n}{U_{n+1} - U_n}, \quad (6)$$

$$\frac{U_n}{U_{n+1} - U_n} \frac{12.4}{U_n} = 2d \sin \theta \Rightarrow d = \frac{6.2}{(U_{n+1} - U_n) \sin \theta}. \quad (7)$$

Из полученной формулы (7) следует, что при таком способе определения межплоскостного расстояния нет необходимости знать величину n (порядковый номер узла узлового ряда обратной решётки), т.е. расчёты можно осуществить для любых двух соседних узлов. Формула справедлива для всех систем плоскостей примитивной решётки, а также для тех систем плоскостей сложных решёток, для которых нет систематических погасаний. Например, для системы плоскостей $\{111\}$ гранцентрированной кубической решётки формула верна, а для систем плоскостей $\{100\}$ и $\{110\}$ этой же решётки необходимо учитывать погасания. Так, в полученной формуле следует заменить $(n+1)$ на $(n+2)$ и числитель дроби умножить на 2, тогда формула для межплоскостного расстояния d примет вид:

$$d_{100;110} = \frac{12.4}{(U_{n+2} - U_n) \sin \theta}, \quad (8)$$

где U_{n+2} и U_n – напряжения на рентгеновской трубке, соответствующие двум любым соседним точкам перегиба на графике экспериментальной зависимости $I(U)$.

Межплоскостное расстояние можно вычислить и на первой точке перегиба. Соответствующую формулу для вычисления можно вывести как следствие полученной формулы, учитывая, что $U_0 = 0$, а также непосредственно из формулы Вульфа–Брэгга, учитывая, что $\lambda = 12.4/U$.

В соответствии с вышесказанным проведены измерения межплоскостных расстояний d_{100} , d_{110} и d_{111} в кристалле никеля. На основании экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 5, составлена таблица расчётов межплоскостных расстояний по выведенным формулам. Из расчётов следует, что полученные значения близки к табличным, но ошибка 5 % для d_{110} означает, что для

практического применения этого метода требуется дифрактометр с меньшим шагом изменения напряжения U на рентгеновской трубке (оптимально – с непрерывным изменением) для повышения точности измерений. Экспериментальные зависимости получены с применением рентгеновского дифрактометра D/Max-2500, который при включении высокого напряжения, автоматически устанавливает минимальное напряжение 20 кВ. В проведённой работе напряжение на аноде увеличивали, начиная с 20 кВ, с шагом 1 кВ, через каждые 10 с.

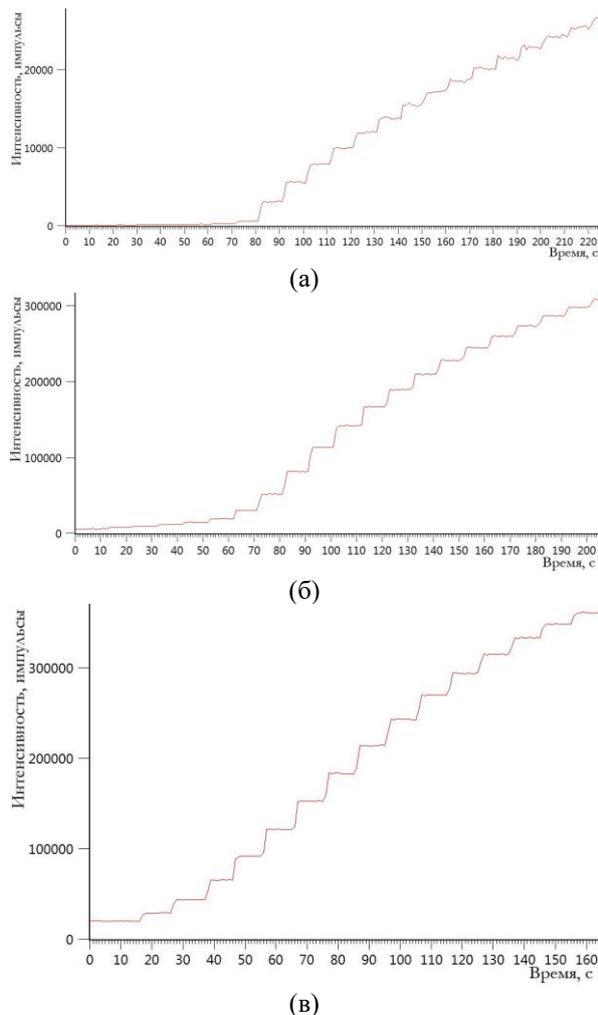


Рис. 5. Пересечение первого узла (незапрещённого законом погасаний) узлового ряда обратной решётки кристалла никеля при увеличении напряжения на рентгеновской трубке: а – узловой ряд 100; б – узловой ряд 110; в – узловой ряд 111. На всех графиках ось абсцисс – это ось времени, в течение которого вручную осуществляли увеличение напряжения. Напряжение на трубке, при котором начинался рост интенсивности, визуально регистрировали на управляющей панели дифрактометра и заносили в таблицу. Графики соответствуют области внутри круга (рис. 4)

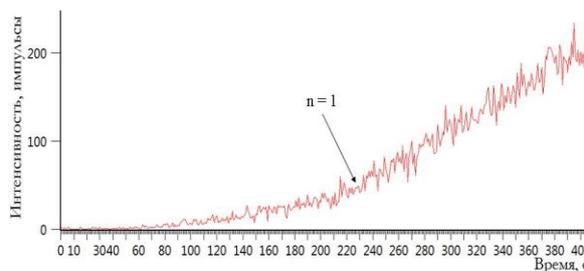


Рис. 6. Пересечение первого узла узлового ряда 611 обратной решётки кристалла молибдена внешней границей области отражений при увеличении напряжения на рентгеновской трубке. Напряжение, соответствующее точке перегиба $n = 1$, визуально зарегистрировали на управляющей панели дифрактометра ($U = 29$ кВ)

На рис. 6 представлена зависимость интенсивности I , регистрируемой при U -сканировании узлового ряда 611 обратной решётки кристалла молибдена от времени τ (с), в течение которого непрерывно вручную с постоянной скоростью $\Delta U/\Delta \tau$ увеличивали напряжение на рентгеновской трубке. Напряжение, соответствующее точке перегиба графика при пересечении первого узла внешней сферы Эвальда, фиксировали по числовому указателю на управляющей панели дифрактометра. При постоянном угле $2\theta = 50^\circ$ оно составило 29 кВ. Подставив эти данные в формулу (4), мы получили значение $d_{611} = 0.506 \text{ \AA}$. Сравнение с табличными (расчётными) данными $d_{611}^{Mo} = 0.511 \text{ \AA}$ показывает, что ошибка составляет 1 %.

Результаты определения межплоскостных расстояний в кристалле никеля

hkl, n	2θ	θ	$\sin\theta$	$U, \text{ кВ}$	$d_{\text{эсп}}$	$d_{\text{табл}}$	$\Delta d, \%$
100, 2	15	7.5	0.1305	27	1.760	1.766	0.3
110, 2	23	11.5	0.1994	26	1.196	1.250	5
111, 1	15	7.5	0.1305	23	2.065	2.038	1.4

4. Способ 2

Измерение межплоскостных расстояний путём изменения брэгговского угла θ в процессе $(\theta-2\theta)$ -сканирования при неизменных границах непрерывного спектра, т.е. при фиксированном напряжении U на рентгеновской трубке.

При $(\theta-2\theta)$ -сканировании ориентированного кристалла отрезок регистрации AB и совмещённый с ним узловой ряд поворачиваются синхронно, т.е. не разъединяются (рис. 7). При этом характеристические линии материала анода рентгеновской трубки перемещаются в обратном пространстве по круговым траекториям с радиусами $1/\lambda_{\text{Ka}}$ и $1/\lambda_{\text{Kb}}$ соответственно и пересекают определённый интервал узлового ряда обратной решётки, формируя

максимумы интенсивности. На рис. 7 показано, как первый узел в результате $(\theta-2\theta)$ -сканирования оказывается вне области регистрации AB , а узлы 3–5 – оказываются в области регистрации

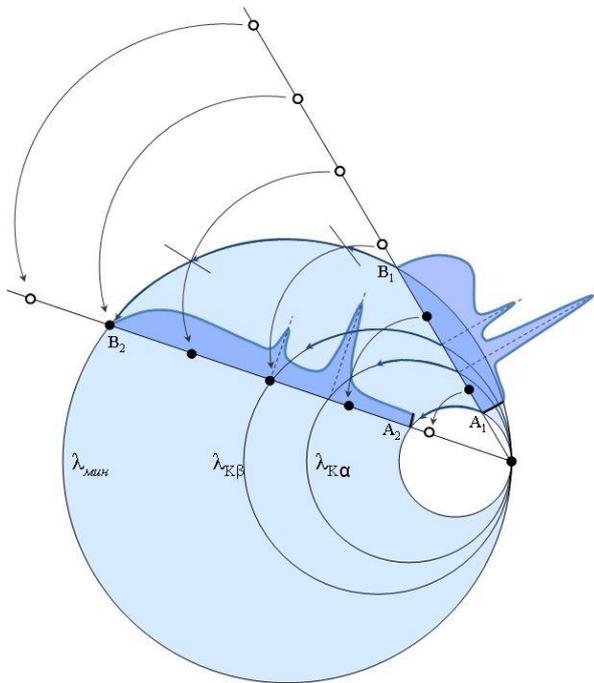


Рис. 7. Отрезок регистрации отражений счётчиком AB и совмещённый с ним узловой ряд обратной решётки при $(\theta-2\theta)$ -сканировании

Согласно построению Эвальда [15], координата точки B пересечения сканируемого узлового ряда обратной решётки внешней сферой отражения равна $B = U \sin \theta / 6.2$. Соответственно, координата точки A пересечения сканируемого узлового ряда обратной решётки внутренней границей области отражения равна $A = 2 \sin \theta / \lambda_{\text{макс}}$. Поэтому непрерывное увеличение угла θ в интервале от 0 до 90° приводит к непрерывному увеличению длины отрезка регистрации:

$$AB = \left(\frac{U}{6.2} - \frac{2}{\lambda_{\text{макс}}} \right) \sin \theta. \quad (9)$$

Но в отличие от первого способа, во втором способе точка A подвижна – её координата на узловом ряде увеличивается. Следовательно, при сканировании узлового ряда изменение количества узлов в области регистрации AB связано не только с вхождением в эту область новых узлов с большими номерами, но и с выходом из этой области узлов с малыми номерами. Величина в скобках постоянна, поэтому длина отрезка регистрации AB увеличивается, так как в интервале углов $\theta \in (0, 90^\circ)$ функция $\sin \theta$ является возрастающей. Следовательно, количество узлов обратной решётки на отрезке регистрации в целом увеличивается

(при переходе через некоторые значения углов θ количество узлов на отрезке AB может уменьшаться на единицу). Поэтому, как и в первом способе, изменение интенсивности, регистрируемое счётчиком, имеет ступенчатый характер, где ступень увеличения соответствует появлению (попаданию) нового узла в области регистрации AB , а ступень снижения интенсивности соответствует выходу узла с малым номером из области регистрации (см. рис. 7).

Для двух соседних точек перегиба (локального минимума) графика $I(2\theta)$, соответствующим двум соседним узлам обратной решётки с номерами n и $(n+1)$, справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} n\lambda = 2d \sin \theta_n, \\ (n+1)\lambda = 2d \sin \theta_{n+1}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{12.4}{U},$$

$$\begin{cases} \frac{12.4n}{U} = 2d \sin \theta_n, \\ \frac{12.4(n+1)}{U} = 2d \sin \theta_{n+1}, \end{cases} \Rightarrow \frac{n+1}{n} = \frac{\sin \theta_{n+1}}{\sin \theta_n},$$

$$n = \frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_{n+1} - \sin \theta_n}, \quad (11)$$

$$\frac{\lambda \sin \theta_n}{\sin \theta_{n+1} - \sin \theta_n} = 2d \sin \theta_n \Rightarrow$$

$$2d = \frac{12.4}{U(\sin \theta_{n+1} - \sin \theta_n)},$$

$$d = \frac{6.2}{U(\sin \theta_{n+1} - \sin \theta_n)}. \quad (12)$$

Согласно построению Эвальда для нулевого узла обратной решётки (т.е. для $n = 0$) брэгговский угол равен нулю, т.е. $\sin \theta_0 = 0$. Следовательно, формула (12) приобретает вид

$$d = \frac{6.2}{U(\sin \theta_1 - \sin \theta_0)} = \frac{6.2}{U \sin \theta_1}. \quad (13)$$

На рис. 8, а представлена дифрактограмма $I(2\theta)$ кристалла молибдена, ориентированного для отражений плоскостью (110), полученная методом $(\theta-2\theta)$ -сканирования при напряжении на трубке 40 кВ в интервале углов сканирования первого узла узлового ряда 110 обратной решётки. Из дифрактограммы следует, что $2\theta_1 = 8^\circ$. После подстановки численных значений в формулу (13) получим:

$$\begin{aligned} d &= \frac{6.2}{U \sin \theta_1} = \frac{6.2}{40 \sin 4^\circ} = \\ &= \frac{6.2}{40 \cdot 0.0697} = 2.214 \text{ \AA}. \end{aligned}$$

Согласно табличным данным [16], $d_{110}^{Mo} = 2.220 \text{ \AA}$, т.е. ошибка составляет менее 0.3 %.

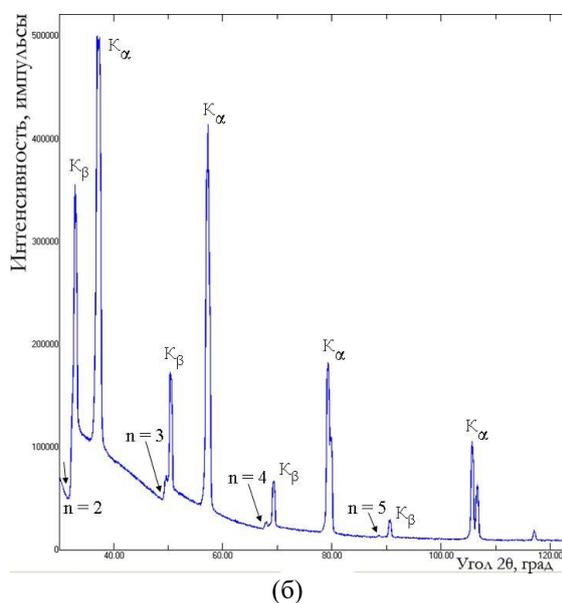
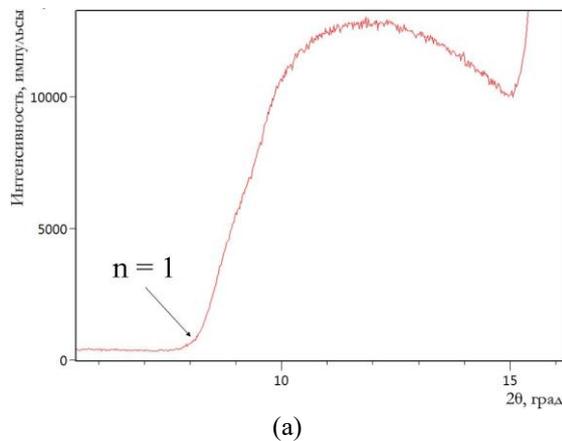


Рис. 8. Дифрактограммы кристалла молибдена: а – пересечение узла $n = 1$ узлового ряда 110 обратной решётки кристалла молибдена при $U = 40 \text{ кВ}$ происходило при $2\theta_1 = 8^\circ$; б – сканирование узлового ряда 110 обратной решётки кристалла молибдена в интервале узлов от $n = 2$ до $n = 5$ при $U = 20 \text{ кВ}$

На рис. 8, б представлена аналогичная дифрактограмма, но полученная при напряжении на трубке 20 кВ в угловом интервале сканирования между 2-м и 5-м узлами узлового ряда 110 обратной решётки. Из дифрактограммы, в частности, следует, что $2\theta_3 = 49.0^\circ$, $2\theta_4 = 67.5^\circ$. На ней присутствуют также характеристические линии материала анода. Они позволяют определить параметры решётки, но в данной работе цель – определение линейных параметров решётки по коротковолновой границе белого спектра.

После подстановки численных значений в формулу (12) получим:

$$d = \frac{6.2}{20(\sin 67.5^\circ - \sin 49.0^\circ)} = \frac{6.2}{20(0.556 - 0.415)} = \frac{6.2}{20 \cdot 0.141} = \frac{6.2}{2.82} = 2.198 \text{ \AA},$$

т.е. ошибка равна 0.5 %

5. Заключение

Формулы (7) и (12) могут быть применены для экспериментальной оценки линейных параметров кристаллической решётки – межплоскостных расстояний и периодов.

Очевидно, что чем выше точность регистрирования углов $\theta_1, \theta_2 \dots$ (либо U_1, U_2, \dots) на дифрактограммах, тем выше точность определения линейных параметров решётки.

Таким образом, для оценки линейных параметров кристаллической решётки помимо широко применяемых методик, в которых используют длины волн $\lambda_{K\alpha}$ или $\lambda_{K\beta}$ характеристического (линейчатого) спектра, возможно применение длины волны $\lambda_{\text{мин}}$ коротковолновой границы белого излучения.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С.2–6.
2. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М: ФГУП «ВИАМ», 2015. 720 с.
4. Зайцев Д. В., Тренингов И. А., Алексеев А. А. Ультрадисперсные пластинчатые выделения в жаропрочных никелевых сплавах // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-49-55.
5. Лукина Е. А., Филонова Е. В., Тренингов И. А. Микроструктура и преимущественные кристаллографические ориентировки жаропрочного никелевого сплава, синтезированного методом СЛС, в зависимости от энергетического воздействия и термообработки // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 1. С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-38-44.
6. Петрушин Н. В., Елютин Е. С., Раевских А. Н., Тренингов И. А. Высокоградиентная направленная кристаллизация интерметаллидного

- сплава на основе Ni3Al системы Ni-Al-Ta, упроченного фазой TaC // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. № 3. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1.
7. Тренинков И. А., Заводов А. В., Петрушин Н. В. Исследование кристаллической структуры и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, после высокотемпературных механических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65
 8. Кочубей А. Я., Тренинков И. А. Применение белого рентгеновского излучения в структурном анализе кристаллических материалов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн., 2018. № 1–2 (29), 04. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (дата обращения: 23.05.2018).
 9. Кочубей А. Я., Тренинков И. А. Применение непрерывного рентгеновского спектра для построения прямых полюсных фигур кристаллов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 3–4. С. 71–74. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (дата обращения: 06.12.2018).
 10. Кочубей А. Я., Тренинков И. А. Анализ дифракции белого рентгеновского излучения на кристаллах методом Эвальда при построении прямых полюсных фигур // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн., 2018. № 5–6. С. 71–77. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (дата обращения: 05.04.2019).
 11. Тренинков И. А., Кочубей А. Я. Анализ прямых полюсных фигур кристаллов, построенных с применением белого рентгеновского излучения // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 4. С. 51–59. DOI: 10.17072/1994-3598-2019-4-51-59
 12. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Новиков А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.
 13. Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1957. 518 с.
 14. Новиков И. И., Розин К. М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 336 с.
 15. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования структур. М: Металлургия, 1977. 247 с.
 16. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ: Практическое руководство по рентгенографии, электронографии и электронной микроскопии металлов, полупроводников и диэлектриков. М.: Металлургия, 1970. 366 с.
- ## References
1. Kablov E. N. Dominant of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metals of Eurasia*, 2017, no. 3, pp. 2–6 (In Russian).
 2. Kablov E. N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of the Russian Federation on implementation of “Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030”. *Aviation materials and technologies*, 2015, no. 1, pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33 (In Russian).
 3. Kablov E. N. Trends and guidelines of innovative development of Russia. M: VIAM. 2015. 720 p. (In Russian).
 4. Zaitsev D. V., Treninkov I. A., Alekseev A. A. Ultradisperse plate separation in heat-resistant Nickel alloys. *Aviation materials and technologies*, 2015. no. 1, pp. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-49-55.
 5. Lukina E. A., Filonova E. V., Treninkov I. A. Microstructure and primary crystallographic orientations of heat-resistant Nickel alloy synthesized by SLS method, depending on energy impact and heat treatment. *Aviation materials and technologies*, 2017, no. 1, pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-38-44 (In Russian).
 6. Petrushin N. V., Elyutin, E. S., Raevsky A. N., Treninkov I. A. high-gradient directional solidification of intermetallic alloys based on Ni3Al system Ni-Al-Ta, a hardened phase TAS. *Proceedings of VIAM* (electronic journal), 2017, no. 3, 01. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1 (In Russian).
 7. Treninkov I. A., Zavody A.V., Petrushin N. V. Investigation of crystal structure and microstructure of heat-resistant Nickel alloy ZHS32-VI synthesized by selective laser fusion after high-temperature mechanical tests. *Aviation materials and technologies*, 2019, no. 1 (54), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-57-65 (In Russian).
 8. Kochubey A. Ya., Treninkov I. A. Usage of white X-ray structural analysis of crystalline materials. *News of materials science. Science and technology* (electronic journal), 2018, no. 1–2 (29), 04. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (In Russian).
 9. Kochubey A. Ya., Treninkov I. A. Application of continuous X-ray spectrum for the construction of direct pole figures of crystals. *News of materials science. Science and technology* (electronic journal), 2018, no. 3–4, pp. 71–74. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (In Russian).

10. Kochubey A. Ya., Treninkov I. A. Analysis of white X-ray diffraction on crystals by Ewald method in the construction of straight pole figures. *News of materials science. Science and technology* (electronic journal), 2018, no. 5–6, pp. 71–77. URL: <http://www.mterialsnews.ru> (In Russian).
11. Treninkov I. A., Kochubey A. Ya. Analysis of direct pole figures of crystals, built using white X-ray radiation. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 4, pp. 51–59. DOI: 10.17072/1994-3598-2019-4-51-59 (In Russian).
12. Umansky Ya. S., Skakov Yu. A., Novikov A. N., Rastorguev L. N. *Crystallography, roentgenography and electron microscopy*. M.: Metallurgy, 1982. 632 p. (In Russian).
13. Blokhin M. A. *Physics of X-rays*. M.: State publishing house of technical-theoretical. lit., 1957. 518 p. (In Russian).
14. Novikov I. I., Rozin K. M. *Crystallography and crystal lattice defects: tutorial*. M.: Metallurgy, 1990. 336 p. (In Russian).
15. Vasiliev D. M. *Diffraction methods for studying structures*. Moscow: Metallurgy, 1977. 247 p. (In Russian).
16. Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N. *Radiographic and electron-optical analysis: a Practical guide to X-ray graphy, electronography and electron micro-scropy of metals, semiconductors and dielectrics*. Moscow: Metallurgy, 1970. 366 p. (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кочубей А.Я., Тренинков И. А. Анализ дифракции белого рентгеновского излучения на кристаллах методом Эвальда при определении линейных параметров кристаллической решётки // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 1. С. 43–51. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-43-51

Please cite this article in English as:

Kochubey A. Ya., Treninkov I. A. White X-ray radiation diffraction in crystals analysis by Ewald method in determining crystal lattice linear parameters. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 1, pp. 43–51. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-43-51