

РЕНТГЕНОВСКИЙ ТРЕХ-КРИСТАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С РУЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Г.Р. ДРМЕЯН, К.Г. ТРУНИ*, Т.Р. МУРАДЯН, А.В. ШАХВЕРДЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: ktrouni@hotmail.com

(Поступила в редакцию 18 октября 2022 г.)

Сконструирован рентгеновский трехблочный интерферометр с тонкой шейкой между блоком-анализатором и зеркальным блоком. Взаимное расположение этих блоков изменяется с помощью тонкого рычага с грузом на конце, что позволяет осуществить вращение блока-анализатора при неподвижных блоках расщепителя и зеркального блока. Секционные топограммы интерференционных картин при различных вращающих моментах показывают, что на зарегистрированных муаровых картинах преобладает ротационный муар. С увеличением механического вращающего момента период муаровых полос увеличивается, а при определенном значении момента картина исчезает и интерференционное поле становится однородным, а это означает, что интерферометр становится «идеальным». Дальнейшее увеличение вращающего момента приводит к появлению ротационного муара с изменением знака угла наклона интерференционных полос. Дана теоретическая интерпретация всем наблюдаемым явлениям.

1. Введение

Рентгеновская интерферометрия является одним из высокочувствительных методов обнаружения различного типа нарушений структуры кристаллической решётки, определения коэффициентов преломления аморфных и кристаллических материалов, измерения малых перемещений ($\sim 10^{-10}$ м) и поворотов ($\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} угловых секунд). Возникающая из-за относительных дилатаций и поворотов кристаллических блоков интерферометра муаровая картина, как правило, сопровождается интерференционную картину рентгеновских интерферометров [1].

Высокая чувствительность рентгено-интерферометрического муара позволяет зарегистрировать дифракционные изображения дислокаций в виде избыточных полос муара [2,3], а также дальнейшее деформационное поле смещения дислокаций.

Однако интерференционная картина в рентгеновских интерферометрах возникает и в том случае, когда в блоках интерферометра отсутствуют относительные дилатации и повороты. В рентгеновской интерферометрии расщепление волнового фронта осуществляется брэгговской дифракцией рентгеновского

пучка на кристаллическом блоке-расщепителе и таким образом представляет собой двухлучевую схему интерферометрии. Возникающая интерференционная картина рентгеновских интерферометров определяется пространственным распределением фаз волн последовательно дифрагировавших на кристаллических блоках. Это распределение, в свою очередь, определяется многими факторами, такими как характеристики исходного рентгеновского пучка, структурные искажения внутри отдельных блоков, дилатации и повороты кристаллических пластин относительно друг друга, отклонения от «идеальности геометрии» интерферометра [4–6], деформация волновых фронтов интерферирующих пучков при их распространении в вакууме, приводящая к существенному перераспределению фаз в этих пучках [7]. Детальный анализ этих явлений требует строгого учёта всех факторов, влияющих на характер распределения интерференционного волнового поля.

Рассмотренная нами схема рентгеновского интерферометра (рис.1) является аналогом двухлучевой интерферометрии [6]. Благодаря дифракционному стягиванию рентгеновских волновых пакетов при распространении в вакууме в двух интерферирующих пучках образуются два фокусных пятна, смещённых друг относительно друга в плоскости дифракции. Как известно, фокусируются волновые пакеты, соответствующие слабопоглощающимся модам волнового поля. Аномально слабое интерференционное поглощение в кристаллических блоках интерферометра даёт возможность при рассмотрении интерференционных явлений пренебречь вкладом сильнопоглощающейся (не фокусирующейся) моды и связанными с ней интерференционными явлениями. Последнее позволяет выделить из сложного интерференционного поля более простую картину.

Следует отметить, что как муаровые полосы, так и картины дефокусировки довольно часто являются мешающими факторами [8, 9] в некоторых важных применениях рентгеновских интерферометров. В частности, в тех, которые посвящены исследованиям рентгено-интерференционных изображений различных объектов и веществ, введенных в интерферометр. В особенности это относится к

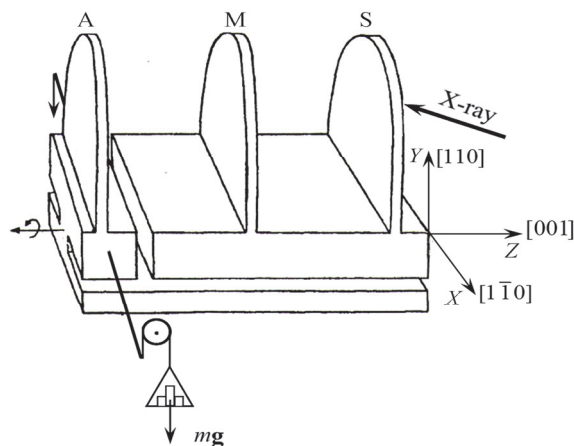


Рис.1. Трех-кристальный рентгеновский интерферометр с шейкой между блоками M (зеркало) и A (анализатор).

задачам по восстановлению изображения с помощью фазового контраста [10–14], а также к задачам по определению характеристик временной когерентности различных излучений [14].

2. Теоретический анализ

Согласно теории динамической дифракции рентгеновских пространственно-неоднородных волновых пакетов лучей [15,16], волновые функции дифрагированных полей, состоящих из проходящих и отраженных волн, могут быть представлены в виде суммы блоховских волн [14]:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \Psi_0(\mathbf{r})e^{-2\pi i \mathbf{k}_0 \mathbf{r}} + \Psi_h(\mathbf{r})e^{-2\pi i (\mathbf{k}_0 + \mathbf{h}) \mathbf{r}}, \quad (1)$$

где амплитудные функции $\Psi_0(\mathbf{r})$ и $\Psi_h(\mathbf{r})$ являются макроскопическими функциями координат с характерной длиной неоднородности – экстинкционной длины, в противоположность экспоненциальным фазовым функциям, которые являются микроскопическими функциями координат с характерной длиной пространственной неоднородности длины волны исходной рентгеновской волны. $\mathbf{k}_0$ и $\mathbf{k}_h$ – волновые векторы соответствующих волн и связаны условием Брэгга в обратной решетке:

$$\mathbf{k}_h = \mathbf{k}_0 + \mathbf{h}, \quad (2)$$

где $\mathbf{h}$ – вектор дифракции.

При последовательной дифракции этих волн в пластинках интерферометра фазовые функции в (1) приобретают дополнительный фазовый скачок равный

$$\Delta\alpha = 2\pi(\mathbf{h}' - \mathbf{h})\mathbf{r}, \quad (3)$$

где $\mathbf{h}'$ и $\mathbf{h}$ – векторы дифракции для пластин с разориентировкой и без нее, соответственно. Исходя из вышеизложенного, для кристаллической системы с тремя пластинами при последовательной дифракции пучков в пластинах для векторов дифракции интерферирующих пар на выходе интерферометра будем иметь для проходящей пары:

$$(0, \mathbf{h}_M, -\mathbf{h}_A), \quad (4a)$$

а для отраженной пары:

$$(\mathbf{h}_S, -\mathbf{h}_M, \mathbf{h}_A), \quad (4b)$$

где индексы S, M, A относятся к расщепителю, зеркальному блоку и анализатору, соответственно. Из (4a,b) следует, что период муаровых полос будет одинаковым для обеих пар интерферирующих пучков и определится как

$$\Lambda = \frac{1}{|2\mathbf{h}_M - \mathbf{h}_A - \mathbf{h}_S|} = \frac{1}{|\Delta\mathbf{h}|}. \quad (5)$$

Заметим также, что муаровые полосы перпендикулярны $\Delta\mathbf{h}$, при этом для дилатационного муара $\Delta\mathbf{h} \parallel \mathbf{h}$, а для ротационного (поворотного) $\Delta\mathbf{h} \perp \mathbf{h}$. Следовательно, для дилатационного муара полосы будут перпендикулярны $\mathbf{h}$, а для поворотного муара параллельны $\mathbf{h}$.

В качестве примера рассмотрим общий случай, когда во всех блоках присутствуют как дилатации, так и повороты:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_S &= \frac{\mathbf{n}_{\parallel}}{d_0 + \Delta d_S} + \frac{\mathbf{n}_{\perp} \varphi_S}{d_0} + \mathbf{h}, \quad \mathbf{h}_M = \frac{\mathbf{n}_{\parallel}}{d_0 + \Delta d_M} + \frac{\mathbf{n}_{\perp} \varphi_M}{d_0} + \mathbf{h}, \\ \mathbf{h}_A &= \frac{\mathbf{n}_{\parallel}}{d_0 + \Delta d_A} + \frac{\mathbf{n}_{\perp} (\varphi_A + \Delta \varphi)}{d_0} + \mathbf{h}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Δd_S , Δd_M , Δd_A – дилатации межплоскостных расстояний, φ_S , φ_M , φ_A – углы поворота вектора дифракции, соответственно, $\Delta \varphi$ – дополнительный угол поворота вектора дифракции блока A под воздействием механического момента (рис.1), $\mathbf{n}_{\parallel}$ и $\mathbf{n}_{\perp}$ – единичные векторы с $\mathbf{n}_{\parallel} \parallel \mathbf{h}$, $\mathbf{n}_{\perp} \perp \mathbf{h}$. В соответствии с (3), периоды дилатационного и поворотного муара будут равны:

$$\Lambda_d = \frac{d^2}{\Delta d_S - 2\Delta d_M + \Delta d_A}, \quad \Lambda_{\varphi} = \frac{d}{\varphi_S - 2\varphi_M + \varphi_A + \Delta \varphi}$$

а полный период

$$\Lambda = \sqrt{\Lambda_d^2 + \Lambda_{\varphi}^2}. \quad (8)$$

При последовательной дифракции пучка квазиамплитуды отраженного и проходящего пучка в данной пластине определяются сверткой соответствующей квазиамплитуды исходного пучка и функций влияния точечных источников [16, 17], которые в свою очередь определяются функцией Грина для соответствующих уравнений с частными производными гиперболического типа. Последовательное применение этой формулы определяет пространственное распределение амплитуды (интенсивности) дифрагированных волн в каждой пластине. Очевидно, что с точки зрения оптических принципов формирования муаровых картин в трех-кристальной системе с достаточно толстыми пластинами бормановское поглощение не имеет существенной роли. Оно лишь исключает одну из волновых мод из процесса формирования интерференционного поля, тем самым исключая наложение других интерференционных эффектов с муаром, как например, маятниковый эффект. В результате интерференционное поле обуславливается фазовыми скачками, приведенными в (3) и (4а).

Так, если периоды решеток одинаковы, т.е. $d_S = d_M = d_A$, но отличаются ориентировкой, то получается чисто ротационный муар с периодом

$$\Lambda_R = \frac{d}{\varphi_S - 2\varphi_M + (\varphi_A + \Delta \varphi)}. \quad (9)$$

3. Экспериментальная часть

Для регистрации картин, вызванных поворотом блока-анализатора Лауэ-интерферометра, из высокосовершенного монокристалла кремния был изготовлен специальный трех-кристальный интерферометр (рис.1). Такая конструкция интерферометра впервые была использована в [1] с целью получения изображений дислокаций и определения индексов вектора Бюргерса.

Толщина каждого блока интерферометра приблизительно равна 0.8 мм, ширина 18 мм, высота 14 мм, межблочные расстояния 14 мм, длина шейки 6.4 мм, длина стороны квадратного сечения шейки 3.2 мм, длина рычага 27 мм. Использовано излучение CuK_{α} ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). Части основания, соединяющие блоки зеркало и 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 был прикреплен тонкий рычаг (рис.1). Вращающие моменты изменялись от 0 до 12.32×10^{-4} Н м с интервалом 1.76×10^{-4} Н м. Секционные топограммы муаровых картин приведены на рис.2.

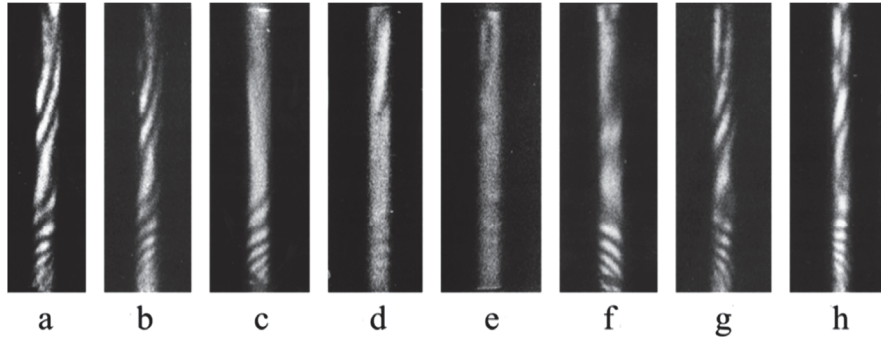


Рис.2. Секционные топограммы муаровых полос для различных значений вращающих моментов: (a) 0, (b) 1.76×10^{-4} , (c) 3.52×10^{-4} , (d) 5.28×10^{-4} , (e) 7.04×10^{-4} , (f) 8.80×10^{-4} , (g) 10.56×10^{-4} , (h) 12.32×10^{-4} (Н м).

После регистрации исходной интерферограммы (до приложения вращательного момента) была зарегистрирована серия секционных интерферограмм при различных значениях вращающего момента (рис.2b–h). Как следует из рис.2a, в начальной муаровой картине от интерферометра преобладает ротационный муар в нижней части и дилатационный – в верхней части рис.2a. Этот факт объясняется тем, что ближе к общему жесткому основанию интерферометра дилатации малы, а относительные повороты значительны. С увеличением вращающего момента ротационная часть становится преобладающей (рис.2b–c), ее период увеличивается, что означает уменьшение суммарного угла поворота в (9). При определенном значении вращающего момента поворотный муар исчезает (рис.2e), а интерференционная картина становится почти однородной, т.к. углы поворотов компенсируют друг друга

$$\varphi_S - 2\varphi_M + (\varphi_A + \Delta\varphi) = 0, \quad (10)$$

а дилатационный муар не наблюдается из-за большого периода (малости относительной дилатации $\Delta d/d$). Дальнейшее увеличение вращающего момента приводит к появлению муаровых полос с обратным наклоном по отношению к горизонтальной оси z (рис.2). Это означает, что суммарный угол поворота отражающих плоскостей меняет знак.

4. Заключение

Сконструирован трехкристальный рентгеновский интерферометр с механической настройкой угла поворота блока-анализатора с жестко закрепленной основой двух других пластин интерферометра. Такая конструкция позволяет осуществлять контролируемые повороты анализатора относительно зеркального блока с точностью до 10^{-2} угловых секунд.

При определенном значении вращающего момента муар исчезает и интерференционное поле становится однородным, т.е. интерферометр становится «идеальным», что очень важно в прикладных задачах, посвященных исследованиям рентгено-интерференционных изображений различных объектов и веществ, введенных в интерферометр. В частности, это относится к задачам по восстановлению изображения объектов с помощью фазового контраста, а также к задачам по определению характеристик временной когерентности различных излучений и других применений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта № 21AG-1C069.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Hart.** *Phil. Mag.*, **26**, 821 (1972).
2. **U. Bonse, M. Hart.** *Zeit. Phys.*, **190**, 455 (1966).
3. **H.R. Drmeyer.** *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **9**(2), 336 (2015).
4. **U. Bonse, E. te Kaat.** *Zeit. Phys.*, **243**, 14 (1971).
5. **G.M. Aladzhadzhyan, P.H. Besirganyan, A.K. Kocharyan, K.G. Trouni.** *Phys. Stat. Sol. (a)*, **58**, 651 (1980).
6. **K.G. Trouni, L.A. Arutyunyan.** *Phys. Stat. Sol. (a)*, **92**, 369 (1985).
7. **K.G. Trouni, V.R. Kocharyan, D.E. Bagdasaryan, A.V. Shahverdyan.** *J. Contemp. Phys.*, **57**, 303 (2022).
8. **T. Eyrarnjyan, T. Mnatsakanyan, M. Balyan.** *Acta Cryst.*, (a), **74**, 595 (2018).
9. **T. Eyrarnjyan, M. Mesropyan, T. Mnatsakanyan, M. Balyan.** *Acta Cryst. (a)*, **76**, 390 (2020).
10. **T. Ishikawa et all.** *Nature Photonics*, **6**, 540 (2012).
11. **A. Yoneyama, A. Momose, K. Hirano, T. Takeda, Y. Itai.** *Rev. Sci. Instr.*, **70**, 4582 (1999).
12. **T. Takeda, A. Momose, Q.Yu.** *J. Synchr. Rad.*, **7**, 280 (2000).
13. **S. Tao, C. He, X. Hao, C. Kuang, X. Liu.** *Review. MDPI. Appl. Sci.*, **11**, 2971 (2021).
14. **T. Osaka, T. Hirano, Y. Morioka.** *IUCrJ*, **4**, 728 (2017).
15. **A. Authier.** *Dynamical Theory of X-ray Diffraction.* New York, Oxford University Press, 2001.
16. **V.L. Indenbom, I.Sh. Slobodezki, K.G. Truni.** *Sov. Phys. JETP*, **39**, 542 (1974).
17. **В.Л. Инденбом, Ф.Н. Чуховский.** *УФН*, **107**, 229 (1972).

X-RAY THREE-CRYSTAL INTERFEROMETER WITH MANUAL CONTROL

H.R. DRMEYAN, K.G. TROUNI, T.R. MURADYAN, A.V. SHAHVERDYAN

An X-ray three-block interferometer with a thin neck between the analyzer block and the mirror block was designed. The mutual arrangement of these blocks is changed with the help of thin levers with weights at the ends, which make it possible to rotate the analyzer block with the splitter blocks (S) and the mirror block fixed. Sectional topograms of interference patterns at different torques show that rotational moiré prevails in the recorded moiré patterns. With an increase in the mechanical torque, the period of the moiré fringes increases, and at a certain value of the moment, the moiré pattern disappears, and the interference field becomes uniform, which means that the interferometer becomes “ideal”. A further increase in the torque leads to the appearance of a rotational moiré with a change in the sign of the slope of the interference fringes. A theoretical interpretation of all observed phenomena is given.