

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ LLL ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ С КЛИНОВИДНЫМ ЗЕРКАЛЬНЫМ БЛОКОМ И С ЖЕСТКИМИ ОСНОВАНИЯМИ

Т.О. ЭЙРАМДЖЯН*, Т.С. МНАЦАКАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: tigeuro@ysu.am

(Поступила в редакцию 17 июля 2024 г.)

Экспериментально исследованы рентгеновский LLL интерферометр с клиновидным зеркальным блоком и интерферометр с жесткими основаниями. Полученные интерференционные картины показывают, что муаровые полосы в интерферометре с клиновидным блоком налагаются на маятниковые полосы, а период маятниковых полос не меняется при прохождении пучка через блок-анализатор. Эйконоальная теория образования интерференционных полос для интерферометра с клиновидным зеркальным блоком позволяет сделать выводы, совпадающие с полученными экспериментальными результатами. Все рентгеновские интерферометры имеют предварительный муар, связанный с деформациями, возникающими в процессе их изготовления. Между тем, использование интерферометра для исследования деформаций и других физических явлений предполагает использование интерферометра без предварительного муара. Таким является новый тип рентгеновского интерферометра – жесткий LLL интерферометр, имеющий как базу, так и «потолок».

1. Введение

Рентгеновский LLL интерферометр, предложенный в работах [1–5], состоит из трех кристаллических блоков, вырезанных из кристалла с почти идеальной структурой (рис.1а). Пучок рентгеновских лучей падает на кристалл-расщепитель (S) под углом Брэгга и расщепляется на два пучка – проходящий и дифрагированный, которые затем падают на второй, так называемый зеркальный блок (М), образуя два пучка на поверхности третьего кристалла-анализатора (А). На выходной поверхности анализатора образуются два пучка, в которых формируются интерференционные линии, называемые муаром, так как во всех блоках имеются деформации. Предложенный в работе [6] интерферометр Харта–Милна состоит из клиновидного тонкого кристалла и толстого поглощающего кристалла. В этой системе получают маятниковые полосы или полосы равной толщины. В работах [6, 7] был предложен рентгеновский LLL интерферометр с клиновидным зеркальным блоком. Полученные в таком интерферометре секционные топограммы показывают, что маятниковые полосы налагаются на муаровую картину.

В настоящей работе развитая в [8] теория применяется для объяснения результатов наложения маятниковых полос на муаровую картину в LLL интерферометре с клиновидным зеркальным блоком [9]. В эксперименте исследуются не только секционные картины, полученные в LLL интерферометре с клиновидным зеркальным блоком, но и сканированные картины. Теория объясняет результаты наложения маятниковых полос на муар.

В рентгеновских интерферометрах появляется предварительный муар, связанный с возникающими в процессе их изготовления деформациями [10, 11]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование рентгеновского LLL интерферометра с клиновидным зеркальным блоком и жесткого интерферометра.

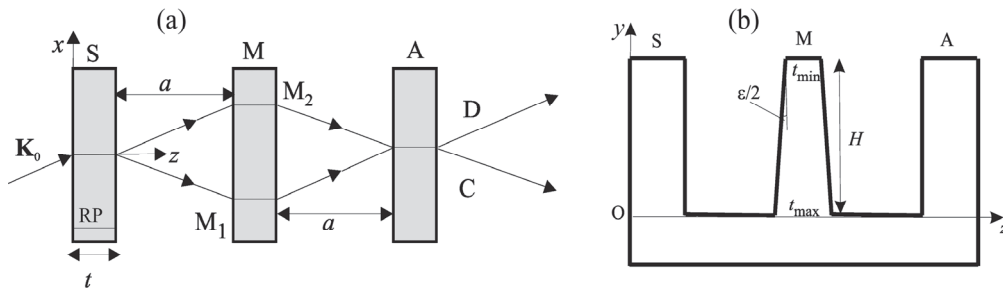


Рис.1. Схема (а) LLL интерферометра и (б) интерферометра с клинообразным блоком: K_0 – волновой вектор падающей волны, S – расщепитель, M – зеркало, A – анализатор, a – расстояние между блоками, C и D – выходящие из интерферометра лучи. (б) Рентгеновский интерферометр с клиновидным зеркальным блоком, клин имеет максимальную толщину у основания $t_{\max} = 0.8$ мм, минимальную толщину у вершины $t_{\min} = 0.2$ мм и высоту $H = 16.2$ мм, угол преломления клинообразного зеркального блока $\epsilon = (t_{\max} - t_{\min})/H$.

2. Эксперимент

Исследования проводились на интерферометре с клиновидным зеркальным блоком, который отличается от обычного (рис.1б). Интерферометр изготовлен из бездислокационного кремния для излучения $MoK\alpha_1$ с симметричным отражением по Лауэ (220). Толщины блоков расщепителя и анализатора равны $t = 3.4$ мм, имеет место условие бормановского прохождения, т.е. $\mu t \approx 5$, где $\mu = 1.42 \text{ мм}^{-1}$ – коэффициент линейного поглощения в блоках, через которые проходит только слабопоглощаемая мода дисперсионной поверхности. Угол преломления $\epsilon \approx 2.1^\circ$. Для клиновидного блока, согласно оценкам, $\mu t_{\min} \approx 0.3$, $\mu t_{\max} = 1.14$, так что через клиновидный блок проходят обе ветви дисперсионной поверхности. В рентгеновском LLL интерферометре, все блоки которого одинаковы (рис.1а), получается обычная муаровая картина. Далее зеркальный блок с помощью ручной и химической обработок приводится к клиновидной форме, без изменения точной геометрии интерферометра.

В эксперименте использован лабораторный источник рентгеновских лучей для структурного анализа с размером точечного фокуса 0.4 мм, длиной коллиматора рентгеновской камеры 0.4 м, шириной падающего пучка на первый блок интерферометра 0.3 мм, в режиме: анодное напряжение – 40 кВ, анодный ток –

20 мА. Рентгенограммы получены на рентгеновских пленках, помещенных как после клиновидного блока, так и после блока-анализатора в пучках С и D, содержащих муар (рис. 1b).

Если закрыть один из пучков после клиновидного зеркального блока (рис. 2), то блок-расщепитель будет служить как монохроматор, а зеркальный блок и анализатор будут работать как двухблочный интерферометр Харта–Милна [6]. Соответствующие секционные интерференционные картины в дважды дифрагированном пучке после зеркального блока и в трижды дифрагированном пучке после третьего блока показаны на рис. 3а, б.

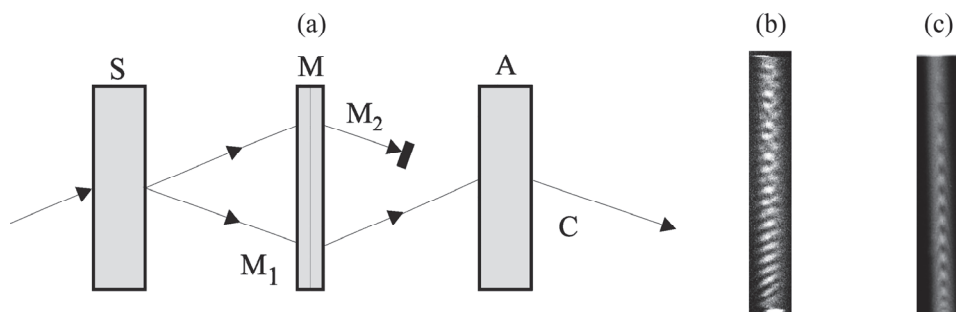


Рис. 2. (а) Ход лучей в интерферометре с закрытым пучком, (б) интерференционная картина, полученная в дважды дифрагированном пучке и (с) – полученная при закрытом пучке, выходящем из участка M_2 .

При закрытом пучке M_2 после клиновидного зеркального блока, в дважды дифрагированном пучке получают интерференционные линии от клиновидного образца в частично монохроматизированном пучке (рис. 3а) и секционные муаровые полосы, наложенные на маятниковые полосы в трижды дифрагированном пучке. То же будет наблюдаться и в другом пучке D, вышедшем из анализатора. Заметим, что интерференционная картина на рис. 2с без наложения пучков, существенно отличается от интерференционной картины на рис. 3б с наложенными пучками. Так как муаровые полосы на секционных топограммах на рис. 3а, б охватывают узкую область и почти параллельны маятниковым полосам,

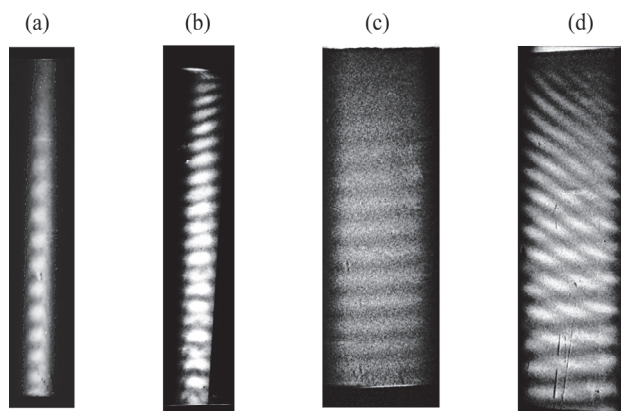


Рис. 3. (а, с) Интерференционная картина в дважды дифрагированном пучке и (б, d) в трижды дифрагированном пучке, когда пучки не закрыты (а, б) и после сканирования (с, d).

то на этих рисунках их наложение выявляется с трудом. Для четкого наблюдения интерференционного наложения муаровых полос на маятниковые было проведено сканирование, вследствие чего область наблюдения на рентгенограмме увеличивалась.

На рис.3с показана сканированная интерференционная картина в дважды дифрагированном пучке после клиновидного зеркального блока, а на рис.3d – сканированная интерференционная картина после третьего блока в трижды дифрагированном пучке. На рис.3d четко видно интерференционное наложение маятниковых и муаровых полос.

3. Теория

Ниже кратко описан вывод основных формул эйкональной теории LLL интерферометра со слабыми деформациями в предположении, что зеркальный блок интерферометра клиновидный, так что через него проходят обе ветви дисперсионной поверхности σ -поляризации. Два других блока интерферометра удовлетворяют условию бормановского прохождения $\mu t \gg 1$, и через них проходят только слабопоглощаемые моды σ -поляризации. Предполагается, что деформации существуют во всех блоках интерферометра и удовлетворяют условию эйконального приближения [8, 9]

$$\left| \frac{\partial^2 \mathbf{h}\mathbf{u}}{\partial s_0 \partial s_h} \right| \ll |\sigma^2|, \quad (1)$$

где $\mathbf{h}$ – вектор дифракции для данного отражения, s_0 и s_h – координаты вдоль направлений проходящей и дифрагированной волн, $\mathbf{u}$ – вектор смещения атомов в блоках интерферометра из своих равновесных положений в идеальном кристалле, $\sigma^2 = k^2 \chi_h \chi_{\bar{h}} / 4$, χ_h и $\chi_{\bar{h}}$ – Фурье-коэффициенты поляризуемости кристалла для отражений $\mathbf{h}$ и $\bar{\mathbf{h}}$, соответственно, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Кроме условия эйконального приближения предполагается также выполнение условия слабости деформаций во всех блоках интерферометра [8, 9]:

$$|\alpha| \ll |\chi_h|, \quad (2)$$

где $\alpha = -(2/k) \partial \mathbf{h}\mathbf{u} / \partial s_h$ – локальный параметр отклонения от точного условия Брэгга. Физический смысл условия (2) заключается в том, что деформации не выводят пучки в интерферометре за пределы области отражения. На основе развитой теории, в работе [11] для интерферометра с тремя плоскопараллельными блоками получено выражение для интенсивности в интерферирующих пучках интерферометра:

$$I = \frac{E_0^{(i,e)2}}{32} \exp \left[-\frac{3\mu t}{\cos \theta} \left(1 - \frac{\chi_{hi}}{\chi_{oi}} \right) \right] (1 + \cos \beta), \quad (3)$$

где χ_{oi} и χ_{hi} – нулевая и $\mathbf{h}$ – Фурье-коэффициенты мнимых частей поляризуемости блоков интерферометра, $\mu = k\chi_{oi}$ – коэффициент поглощения блоков интерферометра, β – разность фаз интерферирующих пучков на выходе из третьего блока. Верхние индексы i и e обозначают входную и выходную поверхности блока. При описании коэффициента интерференционного поглощения было принято, что кристалл, как обычно, является центросимметричным.

Для интерферометра с клиновидным зеркальным блоком интенсивность в двух вышедших пучках дается известным выражением [7], из которого следует, что маятниковые полосы, интенсивность которых после зеркального блока пропорциональна фактору $|\sin \pi t(y)/\Lambda|^2$, налагаются на муаровую картину, интенсивность которой пропорциональна $1 + \cos \beta$. Таким образом, период маятниковых полос после зеркального клиновидного блока

$$L = \Lambda \frac{H}{t_{\max} - t_{\min}} = \frac{\Lambda}{\varepsilon} \quad (4)$$

(см. также подпись к рис. 1b). В рассматриваемом случае $L \approx 1$ мм. Согласно формуле (4), тот же период маятниковых полос должен наблюдаться и после анализатора в пучках С и D без их смещения. Для проверки этих двух выводов теории были использованы сканированные картины (рис. 3с, d). Согласно рис. 3d, муаровые полосы, действительно, налагаются на маятниковые полосы, причем более ярко выражены пересечения максимумов этих двух систем полос, а маятниковые полосы не претерпевают никакого смещения. Для проверки вывода теории о постоянстве периода маятниковых полос при прохождении пучка через анализатор, были измерены периоды маятниковых полос после зеркального блока (рис. 3с) и после блока-анализатора (рис. 3d), для которых были получены приблизительно одинаковые значения $L \approx 1$ мм, что согласуется с теоретически полученным значением.

4. Жесткий интерферометр

Жесткий интерферометр, в отличие от стандартного LLL интерферометра (рис. 1а), помимо основания, имеет еще и потолок, который скрепляет между собой монолитные блоки жесткого интерферометра [10], что обеспечивает нулевую разность фаз между интерферирующими пучками, когда на их пути нет образца и не вносятся деформации в блоки. Схема трехблочного жесткого рентгеновского интерферометра показана на рис. 4а.

Тестирование жесткого интерферометра проводилось с использованием рентгеновского излучения $\text{MoK}\alpha_1$ и для (220) симметричного отражения Лауэ с

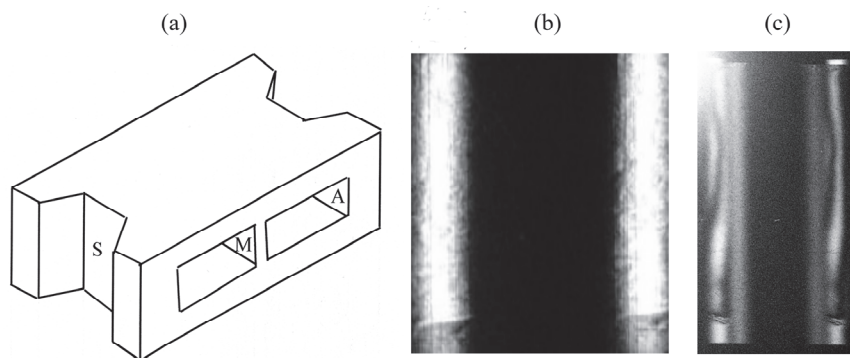


Рис.4. (а) Схема жесткого интерферометра: блок S – расщепитель, блок M – зеркало, блок A – анализатор. Рентгенограммы, полученные: (b) в случае незакрепленного к кристаллодержателю интерферометра и (с) в случае скрепления интерферометра с кристаллодержателем тонким слоем клея.

использованием бездислокационного кристалла кремния. Толщины блоков равны 2 мм. Для каждого блока $mt \approx 5$. Интерферометр LLL дает предварительный муар. Эксперименты с жестким интерферометром надежно свидетельствуют об отсутствии предварительного неконтролируемого муара (рис.4b, c). Распределение интенсивности, полученное с помощью жесткого рентгеновского интерферометра, практически однородно. Следует отметить, что в опытах жесткий интерферометр размещался на кристаллодержателе свободно, без крепления. Это существенно, поскольку жесткий интерферометр очень чувствителен даже к незначительным механическим воздействиям, которые могут возникнуть при креплении на кристаллодержателе. В качестве примера на (рис.4c) показан полученный с помощью жесткого интерферометра муар в случае прикрепления интерферометра к кристаллодержателю тонким слоем клея. Муаровые полосы на рентгенограмме жесткого интерферометра, вызванные слоем клея, который создает незначительные деформации в интерферометре, насколько нам известно, получены впервые. Когда в одно из плеч интерферометра помещается клин, получается управляемый муар. Благодаря такой конструкции жесткий интерферометр не дает неконтролируемого муара. Экспериментально показано, что жесткий интерферометр должен свободно располагаться на кристаллодержателе, поскольку интерферометр очень чувствителен к незначительным механическим воздействиям. Поэтому условия юстировки для жесткого интерферометра гораздо более жесткие, чем для обычного. С помощью клина, помещенного в одно из плеч жесткого интерферометра, получают также полосы постоянной толщины. Основной вывод заключается в том, что такой интерферометр может быть успешно использован для точных экспериментальных исследований. Достоинством жесткого интерферометра является управляемость муаровых полос, т.е. отсутствие предварительного муара.

5. Заключение

Предложен и протестирован рентгеновский LLL интерферометр с клиновидным зеркальным блоком. Экспериментально полученные сканированные картины после зеркального клиновидного блока и после блока – анализатора в пучках, содержащих муар, показывают, что две системы полос – маятниковых и муаровых – налагаются. Развита эйкональная теория образования интерференционных картин в LLL интерферометре с клиновидным зеркальным блоком. Согласно этой теории, две системы полос действительно должны налагаться, маятниковые полосы не должны смещаться, и период маятниковых полос не должен изменяться при прохождении через анализатор. Проведенные измерения указывают на весьма хорошее совпадение эксперимента с теорией. Протестирован жесткий рентгеновский интерферометр для экспериментальных исследований. По сравнению с обычным интерферометром этот тип интерферометра имеет не только основание, но и «потолок». Благодаря такой конструкции жесткий рентгеновский интерферометр не дает неконтролируемого муара, вызванного деформациями блоков, и очень чувствителен к механическим напряжениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **U. Bonse, M. Hart.** Appl. Phys. Lett., **6**, 155 (1965).
2. **U. Bonse, M. Hart.** Appl. Phys. Lett., **7**, 99 (1965).
3. **U. Bonse, M. Hart.** Acta Cryst., **A24**, 240 (1968).
4. **W. Graeff, U. Bonse.** Z. Phys. B, **27**, 19 (1977).
5. **Ф.О. Эйрамджян, К.Г. Труни, П.А. Безирганян.** Изв. АН Арм. ССР, Физика, **8**, 193 (1973).
6. **M. Hart, A.D. Milne.** Phys. stat. solidi, **26**, 185 (1968).
7. **Т.Н. Еурамджян, Т.С. Mnatsakanyan, М.К. Balyan.** Acta Cryst. A, **74**, p.5,595, (2018).
8. **М.К. Балян, К.Т. Габриелян.** Известия НАН РА, **29**, 118 (1994).
9. **М.К. Balyan.** J. Contemporary Physics (Arm. Acad. Sci.). **47**, 241 (2012).
10. **А. Ростомян, М. Месропян, С. Нариманян, А. Григорян.** Патент СССР 1458781 А1.
11. **Т.Н. Еурамджян, М.Н. Mesropyan, Т.С. Mnatsakanyan, М.К. Balyan.** Acta Cryst. A, **76**, 390 (2020).

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF X-RAY LLL INTERFEROMETERS WITH A WEDGE-SHAPED MIRROR BLOCK AND WITH THE HARD BASES

Т.Н. EYRAMJYAN, Т.С. MNATSAKANYAN

Two X-ray LLL interferometers are investigated experimentally and with some theoretical explanations: one with a wedge-shaped mirror block and the other one called hard. The received interference images show that the moire images are also superposed on the pendellösung fringes in the röntgenograms obtained from the interferometers with a wedge-shaped mirror block and do not interact. The period of pendellösung fringes does not change after passing through the analyzer. The theory of the eikonal approximation of interference fringes formation in the interferometer with a wedge-shaped mirror plate gives predictions that coincide with the obtained experimental results. Unlike a typical LLL X-ray interferometer, the hard one has a base and a "ceiling". The hard interferometer does not produce uncontrolled moire thanks to such structure. The latter occurs due to the interferometer plate deformations : the hard interferometer is much more sensitive to mechanical stresses and to various external factors.