

ТЕСТИРОВАНИЕ ЖЕСТКОГО ЧЕТЫРЕХБЛОЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПРИ ЛАУЭВСКОЙ ГЕОМЕТРИИ ДИФРАКЦИИ

Т.О. ЭЙРАМДЖЯН*, Т.С. МНАЦАКАНЯН, Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: tigeyro@ysu.am

(Поступила в редакцию 09 августа 2025 г.)

Предложен жесткий четырехблочный рентгеновский интерферометр при лауэвской геометрии дифракции. Дополнительный (по сравнению с трехблочным) блок интерферометра обеспечивает одновременное получение трех интерферограмм от разных частей интерферометра. Жесткость конструкции интерферометра обеспечивает отсутствие неконтролируемого предварительного муара (по крайней мере на центральной интерферограмме), тем самым повышая точность измерений.

1. Введение

Одним из основных методов отображения фазового контраста жесткого рентгеновского излучения является интерферометрический метод, основанный на трехблочном интерферометре при лауэвской геометрии дифракции (ЛЛЛ-интерферометр) [1, 2]. Исследуемый фазовый объект (обычно из легких элементов), для которого поглощение используемого излучения, в отличие от смещения фазы, пренебрежимо мало, размещается во втором межблочном пространстве интерферометра между зеркалом и анализатором на пути одного из интерферирующих пучков [3, 4] (рис.1). Фазовый сдвиг проходящего сквозь тестируемый

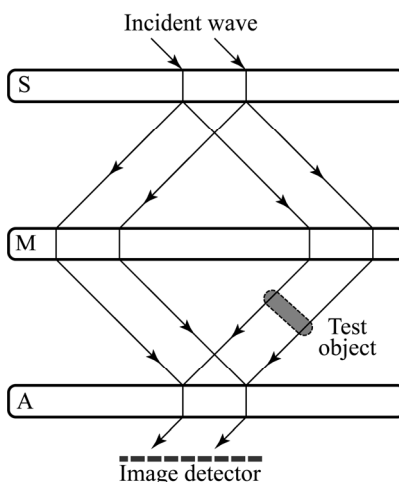


Рис.1. Схема отображения фазового контраста с помощью ЛЛЛ-интерферометра.

объект излучения регистрируется на пленке, помещенной за анализатором. Еще в 70-ых годах прошлого столетия таким методом были измерены показатели преломления различных веществ (полиметилметакрилата (оргстекло), кремния и алюминия) для характеристического излучения $\text{CuK}\alpha$ [5]. В этих измерениях тестируемый образец имел форму плоскопараллельной пластины или клина. Для неоднородных объектов или объектов сложной формы восстановление распределения фазы с помощью распределения на интерферограмме интенсивности проводится специальными алгоритмами [6, 7].

В представленной работе предложена новая модификация ЛЛЛ-интерферометра и проведено его тестирование.

2. Жесткий четырехблочный интерферометр

Предложенный жесткий вариант интерферометра, в отличие от стандартного трехблочного [1, 2] и четырехблочного [8, 9], помимо основания имеет также «потолок», жестко скрепляющий блоки интерферометра [10]. Схема четырехблочного жесткого рентгеновского интерферометра и ход лучей в нем представлены на рис.2. Интерферометр изготовлен из бездислокационного монокристалла кремния с отражающими плоскостями (220), перпендикулярными как к большим поверхностям блоков, так и к поверхности основания. Толщины отдельных блоков $t = 0.6$ мм, расстояния между соседними блоками 19.2 мм для первого и второго блоков и 9.6 мм для остальных. Общая длина интерферометра 40.8 мм, высота блоков 10.5 мм и ширина 35 мм. Геометрия интерферометра выбрана с учетом возможности функционирования в широком диапазоне длин волн излучений ($\text{CrK}\alpha$, $\text{FeK}\alpha$, $\text{CoK}\alpha$, $\text{NiK}\alpha$ и $\text{CuK}\alpha$), для которых выполняется условие аномального слабого прохождения $\mu t \gg 1$, где μ – коэффициент линейного поглощения рентгеновского излучения. В случае рассматриваемого интерферометра для излучения $\text{CuK}\alpha$ значение μt равно 8.6.

Исходя из геометрии интерферометра и хода лучей в нем, его можно назвать мультиинтерферометром, поскольку он представляет комбинацию трех интерферометров – ABICA, BDHEB и CFJGC, что позволяет увеличивать размер тестируемых объектов. Другое преимущество такого интерферометра, по сравнению с

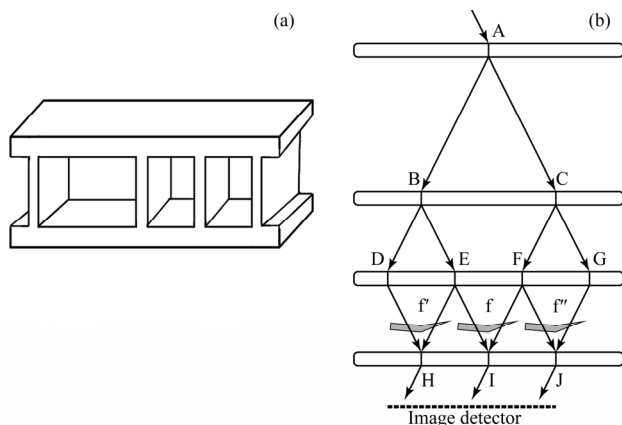


Рис.2. (а) Схема жесткого четырехблочного интерферометра, (б) ход лучей в нем (f , f' и f'' – фазовые объекты).

трехблочным, заключается в том, что объект можно исследовать с помощью трех различных интерферограмм одновременно.

Рассмотрим некоторые отличия рассматриваемого жесткого четырехблочного интерферометра при использовании излучения $\text{CuK}\alpha$ от представленного ранее жесткого трехблочного [10] для излучения $\text{MoK}\alpha$.

Толщины блоков четырехблочного интерферометра в 3.3 раза меньше толщин трехблочного, в результате чего жесткие соединения блоков интерферометра с основанием и потолком по краям ослаблены. Вследствие этого на краях блоков возникают механические напряжения, приводящие к появлению слабых муаровых линии на боковых интерферограммах Н и J в отличие от центральной интерферограммы I (обозначения интерферограмм Н, I, и J представлены на рис.2b).

Возможность получения сразу трех интерферограмм на четырехблочном интерферометре позволяет без сканирования освещать почти весь анализатор. Сканирование – результат механического синхронно-поступательного движения, поэтому независимо от точности сканирования имеет место потеря разрешающей способности интерферометра, что отражается на точности измерений.

3. Тестирование интерферометра

Тестирование интерферометра проведено с использованием лабораторной рентгеновской трубки, размещенной на расстоянии 47.5 см от интерферометра, с характеристическим излучением $\text{CuK}\alpha$ и размером фокуса трубки 400 мкм. Ширина входной щели перед входной поверхностью первого блока интерферометра равна 300 мкм.

Для исследования центральной интерферограммы I на пути одного из интерферирующих пучков, перед анализатором был установлен клин из органического стекла с преломляющим углом 5.3° . Клин соединен с плоскопараллельной пластиной и наклонен на угол θ , где θ – угол Брэгга (объект f на рис.2b). Один из интерферирующих пучков проходит через клин, а другой – через плоскопараллельную пластину. Лучи налагаются на входе анализатора, в результате чего на фотопленке за анализатором регистрируется интерференционная картина. На рис.3 представлена центральная интерферограмма: (a) при отсутствии и (b) при

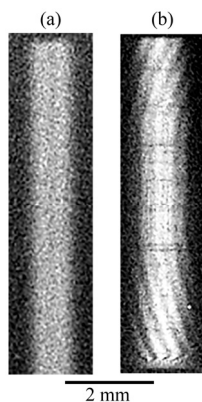


Рис.3. Центральная интерферограмма I (a) при отсутствии и (b) при наличии фазового объекта f.

наличии указанного фазового объекта. Как видно из рисунка, наличие фазового объекта приводит к образованию почти параллельных интерференционных полос с определенным периодом, что свидетельствует об отсутствии деформаций в срединных частях блоков интерферометра, принимающих участие в образовании центральной интерферограммы. Из интерферограммы с клинообразным фазовым объектом можно определить показатель преломления рентгеновских лучей с гораздо большей точностью, чем это было сделано ранее в работе [5], в которой показатель преломления определялся из изменений периода муара при отсутствии и наличии клина путем предварительной фиксации соответствующих координат на рентгенограмме, что, в свою очередь, приводило к определенным погрешностям. При использовании жесткого четырехблочного интерферометра проводится только одно измерение, без необходимости указанной фиксации.

Образование вышеуказанных параллельных интерференционных полос показано на рис.4, где представлен численно моделированный срез центральной интерферограммы плоскостью рассеивания при наличии фазового объекта f (рис.2b). Расчеты проведены численным интегрированием уравнений Такаги [11], методом CSA [12, 13]. В расчетах учтена ограниченная пространственная когерентность и немонахроматичность исходного рентгеновского излучения.

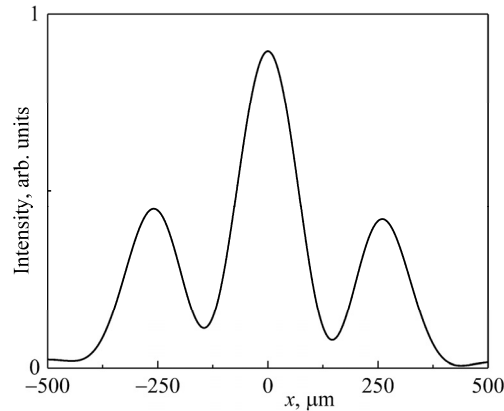


Рис.4. Численно моделированный срез центральной интерферограммы I плоскостью рассеивания. Ось x направлена вдоль линии пересечения плоскости интерферограммы с плоскостью рассеивания.

Сравнение экспериментальной интерферограммы (рис.3b) с результатами численного моделирования показывает: (i) при выбранной ширине входной щели в обоих случаях на интерферограмме наблюдаются три интерференционные полосы; (ii) период интерференционных полос в первом случае составляет 310, а во втором — 260 мкм. По мнению авторов, такое совпадение можно считать удовлетворительным, учитывая значительную погрешность определения периода полос по интерферограмме с тремя полосами, а также точность изготовления клина с настолько малым углом.

На рис.5а представлены боковые интерферограммы (интерферограммы Н и J на рис.2b) при отсутствии фазовых объектов. На них видны полосы, предположительно являющиеся муаром, образованным от вышеупомянутых напряжений на краях третьего блока (области D и G на рис.2b). Для подтверждения этого

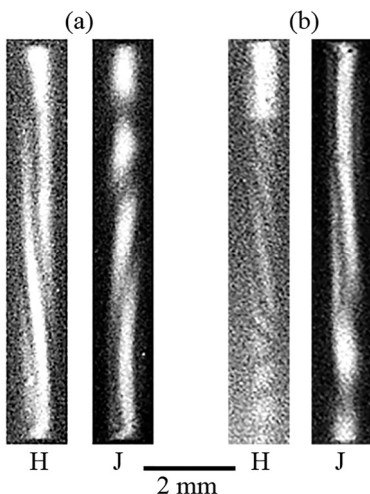


Рис.5. Боковые интерферограммы Н и J (а) при отсутствии и (б) при наличии фазовых объектов f' и f'' (рис.2б).

предположения аналогичные интерферограммы были получены при наличии фазовых объектов f' и f'' . Как видно из полученных интерферограмм (рис.5б), наличие фазовых объектов приводит к перераспределению интенсивности в зарегистрированных интерферограммах, что свидетельствует в пользу предположения о наличии напряжений на боковых краях интерферометра.

4. Заключение

Исследован жесткий четырехблочный рентгеновский интерферометр при лауэвской геометрии дифракции с использованием характеристического излучения $\text{CuK}\alpha$.

Наличие дополнительного четвертого блока в интерферометре позволяет на выходе интерферометра получить три независимых интерферограммы вместо одной в случае трёхблочного интерферометра. Это позволяет освещать большую часть анализатора без использования схемы со сканированием, что повышает точность измерений.

В отличие от обычного интерферометра, жесткий интерферометр имеет не только основание, но и «потолок». Вследствие этого такой интерферометр обычно не приводит к образованию неконтролируемого муара. Однако в данном интерферометре из-за малой толщины блоков возникают механические напряжения на краях блоков, что приводит к слабому муару на боковых интерферограммах в отличие от центральной.

ЛИТЕРАТУРА

1. U. Bonse, M. Hart. Applied Physics Letters, **6**(8), 155 (1965).
2. U. Bonse, M. Hart. Zeitschrift für Physik, **188**, 154 (1965).
3. A. Momose. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, **352**, 622 (1995).
4. A. Momose. Optics Express, **11**, 2303, (2003).

5. **Փ. Էյրամджյան, Դ. Էյրամджյան, Ս. Безирганян.** Изв. АН Арм. ССР, Физика, **9**, 477 (1974).
6. **M. Takeda, I. Hideki, S. Kobayashi.** J. Opt. Soc. Am., **72**, 156 (1982).
7. **J. Bruning, D. Herriott, J. Gallagher, D. Rosenfeld, A. White, D. Brangaccio.** Applied optics, **13**, 2693 (1974).
8. **Փ. Էյրամджյան, Կ. Դруни, Ս. Безирганян.** Изв. АН Арм. ССР, Физика, **8**, 193 (1973).
9. **P. Besirganyan, F. Eiramshyan, K. Truni.** physica status solidi (a), **20**, 611 (1973).
10. **T. Eyrarmjyan, M. Mesropyan, T. Mnatsakanyan, M. Balyan.** Acta Cryst. A, **76**, 390 (2020).
11. **S. Takagi.** J. Phys. Soc. Japan, **26**, 1239 (1969).
12. **Y. Epelboin.** Materials Science and Engineering, **73**, 1 (1985).
13. **Y. Epelboin, A. Soyer.** Acta Cryst. A, **41**, 67 (1985).

**ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՅԻ ԼԱՈՒԵԻ ԵՐԿՐԱԶԱՓՈՒԹՅԱՄԲ ՔԱՌԱԲԼՈՎ ԿՈՇՏ
ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓԻ ԹԵՍՏԱՎՈՐՈՒՄ**

Տ.Ն. ԷՅՐԱՄԺՅԱՆ, Թ.Ս. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ, Լ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Առաջարկված է դիֆրակցիայի Լաուեի երկրաչափությամբ կոշտ քառաբլոկ ռենտգենյան ինտերֆերաչափ: Լայն տարածում ստացած եռաբլոկ ինտերֆերաչափի համեմատությամբ չորրորդ՝ լրացուցիչ բլոկի առկայությունը հնարավորություն է ստեղծում միաժամանակ ստանալու երեք ինտերֆերագրեր ինտերֆերաչափի տարբեր մասերից: Ինտերֆերաչափի կոշտ կառուցվածքը կենտրոնական ինտերֆերագրում ապահովում է չվերահսկվող նախնական մուարի բացակայությունը, որը մեծացնում է սարքի ճշգրտությունը:

**TESTING OF “HARD” FOUR-BLOCK X-RAY INTERFEROMETER
WITH LAUE GEOMETRY OF DIFFRACTION**

T.H. EYRAMJYAN, T.S. MNATSAKANYAN, L.A. HAROUTUNYAN

A “hard” four-block Laue-case X-ray interferometer is proposed. The additional block, compared to the three-block design, enables simultaneous generation of three interferograms from different parts of the interferometer. The rigidity of the interferometer structure ensures the absence of uncontrolled preliminary moiré (at least in the central interferogram), thereby improving measurement accuracy.