

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОТОБРАЖЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТА В УСТРОЙСТВЕ, ОСНОВАННОМ НА ТРЕХБЛОЧНОМ ЛАУЭВСКОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

e-mail: levhar@ysu.am

(Поступила в редакцию 10 апреля 2024 г.)

Рассматривается возможность повышения разрешающей способности отображения рентгеновского фазового контраста с использованием трехблочного лауэвского интерферометра. Для устранения одного из недостатков указанной схемы – искажения интерференционной картины при дифракции предметной волны на анализаторе интерферометра – предлагается анализатор заменить двумя кристаллическими блоками равной толщины, которые являются дифракционной линзой, подавляющей указанные искажения. Методом численного моделирования показано, что низкая когерентность исходного излучения повышает качество отображения фазового контраста предлагаемым методом.

1. Введение

В последнее время развиваются различные методы отображения фазового контраста жесткого рентгеновского излучения (см. [1, 2] и ссылки в них). Эффективность таких методов основана на том, что чувствительность фазового контраста при исследовании внутренней структуры объектов из легких элементов (в частности, мягких биологических тканей) с помощью жесткого рентгеновского излучения на три порядка превосходит чувствительность контраста поглощения [3]. Одним из первых и наиболее распространенных методов отображения фазового контраста является интерферометрический метод на основе трехблочного лауэвского интерферометра (так называемого LLL-интерферометра) [4, 5]. При такой схеме регистрируется интерференционная картина, образованная за третьим блоком интерферометра между пучками: (а) волна, проходящая в первом и отраженная от второго и третьего блоков интерферометра, и (b) волна, отраженная от первого и второго, и проходящая в третьем блоке. Исследуемый фазовый объект размещается между вторым и третьим блоками интерферометра, на пути одного из указанных пучков – предметной волны (см. рис.1). Введенное тестовым объектом фазовое смещение предметной волны приводит к перераспределению регистрируемых интерференционных полос, что, в свою очередь, служит основанием для восстановления пространственного распределения фазового смещения (см. алгоритмы, приведенные в [6, 7]).

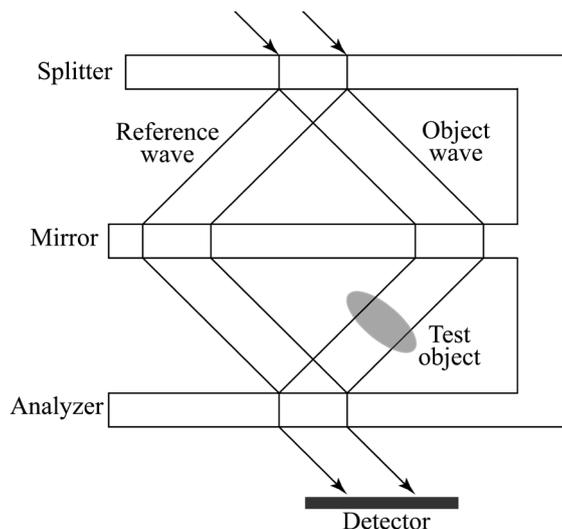


Рис.1. Устройство отображения фазового контраста на основе LLL-интерферометра.

Среди основных преимуществ такого устройства следует отметить высокую стабильность и простоту настройки, что достигается благодаря монолитности всего интерферометра. Интерферометр работает в режиме деления амплитуды, что существенно снижает требования к когерентным характеристикам исходного излучения. Благодаря этому такие устройства работают с использованием лабораторных источников жесткого рентгеновского излучения и были реализованы задолго до появления синхротронных источников жесткого рентгеновского излучения [4].

В качестве недостатков метода отметим малое пространство для размещения тестового образца (порядка или меньше одного см). Для смягчения этого недостатка предложен интерферометр с модифицированной геометрией [8], а также немонolitный интерферометр на двух монокристаллах [9]. Устойчивость немонolitного интерферометра обеспечивается сложной системой управления с обратной связью. Другим недостатком схемы является низкая разрешающая способность (~ 30 мкм), которая обусловлена «размытием» предметной волны при дифракции на третьем блоке интерферометра (анализаторе). Причиной этого является особенность брэгговской дифракции, согласно которой малое угловое смещение падающего на кристалл излучения от точного брэгговского направления приводит к смещению кристаллического пучка на угол, превосходящий исходное смещение на 4–5 порядков. В результате, малое угловое расхождение предметной волны, обусловленное рефракцией на тестовом объекте, приводит к большому угловому смещению лучей в анализаторе, следовательно, к размыванию интерференционной картины до размеров $2t \tan\theta_B$, где θ_B – угол Брэгга и t – толщина кристаллических блоков (в том числе и анализатора). Один из способов борьбы с этим – использование трехблочного брэгговского интерферометра, в котором волна отражается от поверхности анализатора, не проникая вглубь пластины [10]. Другой способ – уменьшение толщины анализатора до значений 40–100 мкм с целью улучшения разрешающей способности до ~ 10 мкм [11, 12]. Недостатком последнего метода является трудность изготовления такого устройства и его низкая точность.

Еще в 70-х годах прошлого столетия было показано, что двухблочная кристаллическая система с параллельными блоками равной толщины, ориентированной согласно лауэвской геометрии дифракции (LL-система), является своего рода дифракционной линзой [13]. Падающая на него δ -образная волна, претерпевая последовательную дифракцию на обоих блоках интерферометра, вновь фокусируется на выходной поверхности второго блока, что экспериментально было доказано в работе [14]. В результате, LL-система способна передавать рентгеновское изображение от входной поверхности системы на выходную. Это также было продемонстрировано экспериментально в работе [15]. На основании дифракционной фокусировки рентгеновских лучей в LL-системе был предложен и экспериментально реализован компактный рентгеновский спектрометр [16]. В работе [17] явление дифракционной фокусировки исследовано более подробно. В частности, исследована зависимость характеристик фокусировки от различных отклонений реальной экспериментальной установки от идеальной: разность толщин блоков системы, смещение падающего пучка от точного брэгговского направления, ширина падающего пучка и т.д. В работе [18] предлагается использовать LL-систему для подавления дифракционного размытия предметной волны в анализаторе LLL-интерферометра, и, тем самым, увеличить разрешающую способность интерферометра в задачах отображения фазового контраста.

В работе [19] методом численного моделирования рассмотрена целесообразность использования LL-системы для вышеуказанной передачи рентгеновского изображения. В частности, показано, что низкая когерентность исходного излучения приводит к подавлению интерференционных искажений, и, тем самым, к повышению качества и однозначности получаемого изображения.

Целью представленной работы является исследование возможности повышения разрешающей способности вышепредставленного устройства для отображения фазового контраста на основе LLL-интерферометра путем использования в ней LL-системы.

2. Схема устройства и численное моделирование

В предполагаемом устройстве отображения фазового контраста третий блок LLL-интерферометра (анализатор) заменяется вышеупомянутой двухблочной LL-системой (так называемый LLL+L-интерферометр). Целью такой модификации является подавление дифракционного размытия части предметной волны, вызванной дифракцией на третьем блоке, благодаря последующей дифракции на четвертом. Схематическая картина и ход лучей в таком устройстве представлены на рис.2. Проведено численное моделирование такого устройства. В качестве тестовых фазовых объектов рассмотрены: проволока с прямоугольным сечением, направленная перпендикулярно плоскости рассеяния, и одномерная сетка из таких проволок. Предполагается, что фазовый сдвиг пересекающих проволоку лучей предметной волны составляет $-\pi$ рад. Фазовый объект расположен на подложке, приводящей к фазовому сдвигу $-\pi$ рад. Проведено численное моделирование отображения фазового контраста как по традиционной схеме на основании LLL-интерферометре, так и для модифицированной, основанной на LLL+L-интерферометре. В качестве исходного излучения выбрана как плоская монохроматическая волна, падающая под точным брэгговским направлением (когерентное излучение), так и излучение от лабораторной рентгеновской трубки с

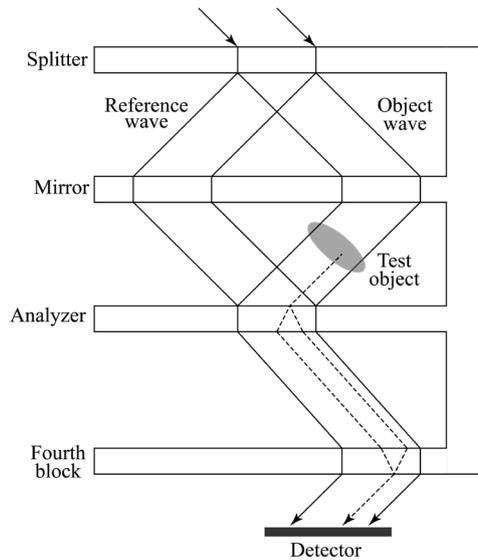


Рис.2. Модифицированное устройство отображения фазового контраста, основанного на добавлении четвертого блока к LLL-интерферометру (LLL+L интерферометр).

размером источника 400 мкм (имеется ввиду размер поперечной проекции в плоскости рассеяния), с учетом естественной ширины спектральной линии характеристического излучения. Расстояние лабораторного источника от интер-

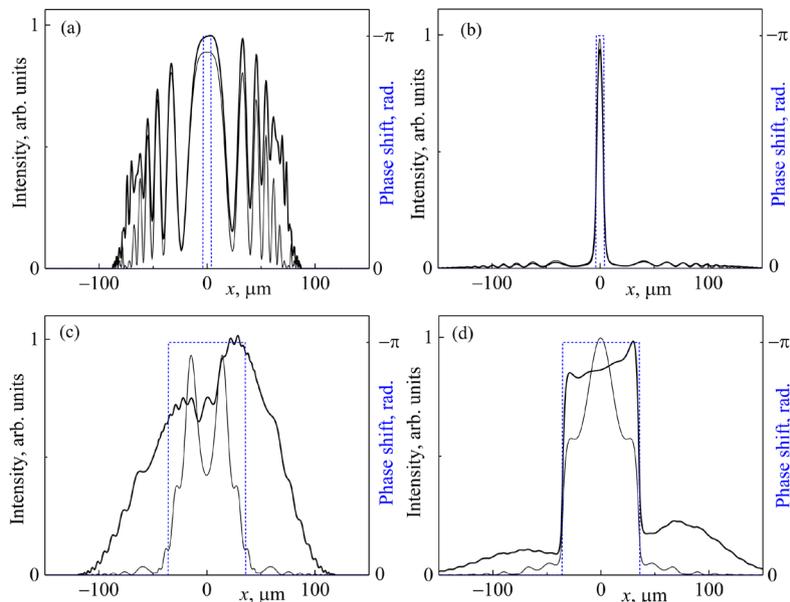


Рис.3. Рассчитанное распределение интенсивности на детекторе в зависимости от координаты x , направленной вдоль линии пересечения детектора с плоскостью рассеяния, для фазового объекта в виде одиночной проволоки, направленной перпендикулярно к плоскости рассеяния. Ширина проволок составляет (a,b) 7 мкм и (c,d) 70 мкм для (a,c) трехблочного и (b,d) четырехблочного интерферометров. Толстые сплошные линии соответствуют некогерентному, тонкие – когерентному излучению, и пунктиром показаны сдвиги фаз, обусловленные тестовыми объектами (без учета фазового сдвига подложки в $-\pi$ рад).

ферометра выбрано 1 м, так что излучение в этом случае вполне можно считать некогерентным. Рассматривается отражение Si(220) характеристического излучения $\text{MoK}\alpha_1$. Толщина кристаллических пластин выбрана $t = 12.25 \Lambda = 446.8 \text{ мкм}$, где $\Lambda = 36.48 \text{ мкм}$ – экстинкционная длина брэгговской дифракции. Результаты расчетов представлены на рис.3 (для фазовых объектов в виде одиночной проволоки) и на рис.4 (для фазовых объектов в виде одномерной сетки из таких проволок). На рисунках (a) и (c) представлены расчеты отображения фазового контраста на основе трехблочного интерферометра, а на (b) и (d) – четырехблочного. Толстыми сплошными линиями представлены расчеты для некогерентного излучения, тонкими линиями – когерентного излучения.

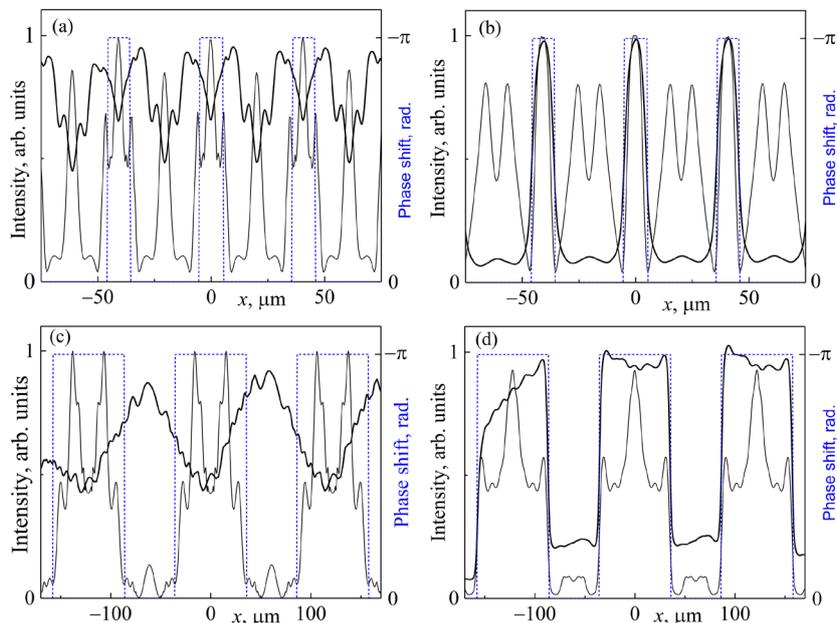


Рис.4. Рассчитанное распределение интенсивности на детекторе в зависимости от координаты x , направленной вдоль линии пересечения детектора с плоскостью рассеяния, для фазового объекта в виде одномерной сетки из проволок с ширинами (a,b) 10 мкм, и (c,d) 70 мкм для (a,c) трехблочного и (b,d) четырехблочного интерферометров. Расстояния между проволоками в сетке составляют (a,b) 30 мкм, и (c,d) 50 мкм. Толстые сплошные линии соответствуют некогерентному, тонкие – когерентному излучению, и пунктиром показаны сдвиги фаз, обусловленные тестовыми объектами (без учета фазового сдвига подложки в $-\pi$ рад).

Как видно из рис.3а, в случае тонкой одиночной проволоки изображение, получаемое трехблочным интерферометром, сильно размыто, и имеет ширину $\Delta \approx 175 \text{ мкм}$, что близко к сумме из ширины проволоки (d) и длины основания треугольника Бормана $2t \tan \theta_B$. Это объясняется тем, что малая ширина проволоки приводит к большому угловому разбросу дифрагированной от него предметной волны, которая при распространении в анализаторе заполняет треугольник Бормана целиком. В случае четырехблочного интерферометра, после дифракции на четвертом блоке изображение сужается до ширины проволоки.

При этом изображение одинаково резкое как для некогерентного, так и когерентного излучения. Это связано с низким уровнем фона при отображении δ -образной волны двухблочной LL-системой [13].

С увеличением толщины проволоки угловое уширение предметной волны, дифрагированной от проволоки, уменьшается, в результате чего изображение при использовании трехблочной системы и когерентного излучения сужается до ширины проволоки (см. рис.3с). Тем не менее интерференционные эффекты искажают изображение, разделяя проволоку на две части.

Интерференционные искажения возникают и при тестовом объекте в виде одномерной сетки при использовании когерентного излучения, причем, как в случае трехблочного, так и четырехблочного интерферометров. В частности, в случае трехблочного интерферометра эти искажения воспринимаются как артефакты в виде тонких проволок, между реальными проволоками. В случае четырехблочного интерферометра с использованием некогерентного излучения искажения сводятся к минимуму, и исчезают артефакты в изображении.

3. Заключение

Методом численного моделирования показана целесообразность применения четырехблочного лауэвского интерферометра для отображения рентгеновского фазового контраста с высоким разрешением. В предлагаемой схеме используется некогерентный источник рентгеновского излучения, что делает устройство компактным, с возможностью использования лабораторных источников излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА и гранта ANSEF 23AN:PS-opt-2992.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Momose.** Jpn. J. Appl. Phys., **44**(9A), 6355 (2005).
2. **V.V. Lider, M.V. Kovalchuk.** Crystallogr. Rep., **58**, 769 (2013).
3. **A. Momose, J. Fukuda.** Med. Phys., **22**(4), 375 (1995).
4. **U. Bonse, M. Hart.** Applied Physics Letters, **6**(8), 155 (1965).
5. **U. Bonse. M. Hart.** Zeitschrift für Physik, **188**, 154 (1965).
6. **M. Takeda, I. Hideki, S. Kobayashi.** J. Opt. Soc. Am., **72**(1), 156 (1982).
7. **J. Bruning, D. Herriott, J. Gallagher, D. Rosenfeld, A. White, D. Brangaccio.** Applied optics, **13**(11), 2693 (1974).
8. **U. Bonse, M. Hart.** Applied Physics Letters, **7**(4), 99 (1965).
9. **A. Yoneyama, T. Takeda, Y. Tsuchiya, et al.,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, **523**(1–2), 217 (2004).
10. **I. Koyama, H. Yoshikawa, A. Momose.** Jpn. J. Appl. Phys., **42** L80 (2003).
11. **A. Momose, I. Koyama, Y. Hamaishi, H. Yoshikawa, T. Takeda, J. Wu, Y. Itai, K. Takai, K. Uesugi, Y. Suzuki.** Japanese Journal of Applied Physics, **38**, 625 (1999).
12. **A. Momose, I. Koyama, Y. Hamaishi, H. Yoshikawa, T. Takeda, J. Wu, Y. Itai, K. Takai, K. Uesugi, Y. Suzuki.** J. Phys. IV France, **104**, 599 (2003).
13. **V. Indenbom, I. Slobodetskii, K. Truni.** Sov. Phys. JETP, **39**(3), 542 (1974).

14. **E. Suvorov, V. Polovinkina.** JETP Lett., **20**(5), 145 (1974).
15. **V. Indenbom, G. Aladzhadzhyan.** Dokl. Akad. Nauk SSSR, **227**(4), 827 (1976) [in Russian].
16. **V. Indenbom, E. Suvorov.** JETP Lett., **23**(9), 441 (1976).
17. **V. Indenbom, E. Suvorov, I. Slobodetskii.** Sov. Phys. JETP, **44**(1), 187 (1976).
18. **A. Egiazaryan, K. Truni, A. Mkrtchyan.** JETP Letters, **68**(9), 711 (1998).
19. **L.A. Haroutunyan.** J. Contemp. Phys., **58**(4), 435 (2023).

ԵՌԱԲԼՈՎ ԼԱՈՒԷ ԻՆՏԵՐՖԵՐՈՍԵՏՏԻ ՎՐԱ ՀԻՄՆՎԱԾ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ
ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԿՈՆՏՐԱՍՏԸ ԱՐՏԱՊԱՏԿԵՐՈՂ ՍԱՐՔԻ
ԼՈՒԾՈՂ ՈՒԺԻ ԲԱՐՁՐԱՅՈՒՄ

Լ.Ա. ՀԱՐՈՒՆԻՅԱՆ

Դիտարկվում է եռաբլոկ Լաուե ինտերֆերոմետրի օգտագործմամբ ռենտգենյան փուլային կոնտրաստի արտապատկերման սարքի լուծող ուժի բարձրացման հնարավորությունը: Նշված սարքի հիմնական թերություններից մեկի՝ ինտերֆերոմետրի անալիզատորի վրա առարկայական ալիքի դիֆրակցիայի հետևանքով ինտերֆերենցիոն շերտերի աղավաղման վերացման նպատակով առաջարկվում է ինտերֆերոմետրի անալիզատորը փոխարինել հավասար հաստություններով երկբլոկ բյուրեղական համակարգով, որը հանդիսանում է նշված աղավաղումները ճնշող դիֆրակտային ոսպնյակ: Թվային մոդելավորման եղանակով ցույց է տրված, որ սկզբնական ալիքի ցածր կոհերենտությունը բերում է առաջարկվող եղանակով փուլային կոնտրաստի արտապատկերման որակի բարձրացման:

INCREASE IN THE RESOLUTION OF HARD X-RAY PHASE-CONTRAST
IMAGING IN A DEVICE BASED ON A TRIPLE LAUE-CASE INTERFEROMETER

L.A. HAROUTUNYAN

The possibility of increasing the resolution of X-ray phase-contrast imaging on a device based on a triple Laue-case interferometer is considered. To address one of the drawbacks of this scheme – the distortion of the interference pattern during the diffraction of the object wave on the interferometer analyzer – it is proposed to replace the analyzer with two crystalline blocks of equal thickness. These blocks act as a diffraction lens, suppressing the mentioned distortions. Numerical simulations demonstrate that the low coherence of the initial radiation increases the quality of phase-contrast imaging using this method.