

УДК 535.412

РЕНТГЕНОВСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР В РЕЖИМЕ ДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВЫХ ФРЕНЕЛЕВСКИХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН

Л.А. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

e-mail: levon.har@gmail.com

(Поступила в редакцию 11 декабря 2015 г.)

Рассмотрен рентгеновский интерферометр, состоящий из трех френелевских зонных пластин с общей оптической осью. Интерферометр работает в режиме деления амплитуды и не накладывает жесткие требования к когерентным характеристикам исходного излучения. Он является модификацией ранее рассмотренного аналогичного интерферометра с тем основным различием, что трудоемкие в изготовлении многоуровневые зонные пластины заменены обычными – двухуровневыми. Методом численного моделирования рассмотрены продольно- и поперечно-дефокусированные разновидности интерферометра.

1. Введение

В настоящее время одним из основных методов фокусировки жесткого рентгеновского излучения является использование френелевских зонных пластин (ФЗП) [1–3]. Основным недостатком такого подхода является наличие разных порядков фокусировки [4]. Это уменьшает эффективность фокусировки, а также заставляет использовать различные устройства (устройство отбора порядка, ножей и диафрагм) для блокировки нежелательных порядков дифракции. С другой стороны, эта же особенность позволяет использовать ФЗП в рентгеновской интерферометрии в качестве делителей и анализаторов. Такой подход очень важен, так как позволяет получать увеличенное изображение интерференционной картины.

В настоящее время уже реализованы рентгеновские интерферометры, состоящие из двух ФЗП, расположенных как на общей подложке [5], так и смещенных друг относительно друга вдоль оптической оси [6,7]. Показана также их пригодность для отображения фазового контраста слабопоглощающих объектов. Указанные интерферометры работают в режиме деления волнового фронта и предъявляют жесткие требования к когерентным характеристикам используемого излучения. Поэтому они используют синхротронные источники жесткого рентгеновского излучения третьего поколения.

Нами уже был рассмотрен рентгеновский интерферометр из трех ФЗП с общей оптической осью, работающий в режиме деления амплитуды [8]. Показана

возможность его применения для отображения фазового контраста [9]. Для подавления нежелательных каналов дифракции в этом интерферометре используются не обычные – двухуровневые, а многоуровневые зонные пластины [10], изготовление которых – трудоемкая задача.

В настоящей работе рассматривается модификация этого интерферометра с целью замены вышеуказанных многоуровневых ФЗП на обычные – двухуровневые. При этом эффективность фокусировки последних может быть существенно ниже теоретического предела эффективности двухуровневых ФЗП. Подавление влияния нежелательных каналов дифракции на интерференционную картину осуществляется двумя ножами, расположенными на первой и третьей ФЗП, и достаточным удалением детектора интерференционной картины от интерферометра. Рассмотрены также продольно- и поперечно-дефокусированные разновидности предложенного интерферометра.

2. Схема и принцип работы интерферометра

Рассмотрим интерферометр, состоящий из трех ФЗП с общей главной оптической осью и удаленных друг от друга на $2F$, где F – фокусное расстояние ФЗП. Исходная плоская волна жесткого рентгеновского излучения падает на первую ФЗП параллельно главной оптической оси, как показано на рис.1. Обозначим через (i, j, k) волновой пакет, дифрагированный в i, j и k порядки соответственно на первой, второй и третьей ФЗП. С учетом только 0, +1 и –1 порядков дифракций в интерферометре образуются 27 каналов распространения. Предполагается регистрировать интерференцию между каналами $(0,1,1)$ и $(1,1,0)$. Для исключения влияния остальных каналов на интерференционную картину используются два ножа, расположенных на первой и третьей ФЗП. Построением хода лучей в рамках геометрической оптики можно показать, что остальные 25 каналов не будут пересекаться регистрируемой интерференционной картиной, если расстояние от третьей ФЗП до детектора удовлетворяет условию

$$f > \max(5/3, R/d - 1)F, \quad (1)$$

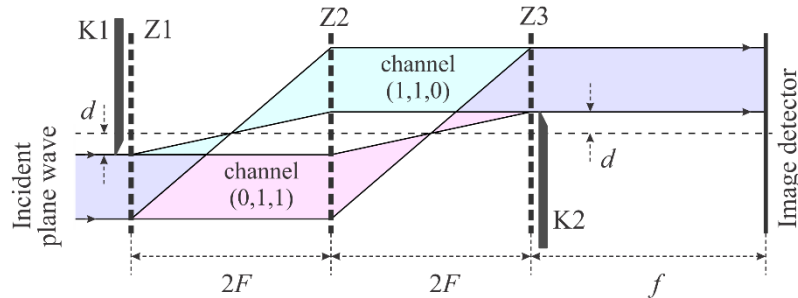


Рис.1. Схематическая картина интерферометра. Z1, Z2, Z3 – соответственно делитель, зеркало и анализатор, K1 и K2 – ножи.

где R – радиусы ФЗП и d – расстояние краев ножей от оптической оси.

Как видно из приведенного на рис.1 хода лучей интерферирующих пучков, первый блок интерферометра (первая ФЗП) действует как делитель, второй – как зеркала и третий – анализатор. Интерферометр работает в режиме деления амплитуды и с равными длинами траекторий в обоих каналах распространения. Это снижает требования к пространственной и временной когерентности используемого излучения.

Представленный интерферометр можно рассматривать как аналог ставшего уже классическим трехблочного рентгеновского интерферометра с лауевской геометрией дифракции (ЛЛЛ-интерферометр) [11,12]. Если работа последнего основана на существовании разных порядков брэгговской дифракции жесткого рентгеновского излучения в кристаллах, то в предложенном интерферометре используются различные порядки дифракции на ФЗП. Отметим, что ЛЛЛ-интерферометр был экспериментально реализован еще в 60-ых годах прошлого столетия, когда основными источниками жесткого рентгеновского излучения были лабораторные рентгеновские трубки.

3. Продольная дефокусировка интерферометра

Если анализатор сместить вдоль оптической оси на расстояние $\Delta f \ll F$, то канал дифракции (0,1,1) от плоской волны преобразится в сходящийся или расходящийся пучок в зависимости от направления смещения. В результате фазовое распределение канала (0,1,1) на детекторе представится в виде

$$\exp\left(\mp \frac{\pi}{\lambda p} r^2\right), \quad (2)$$

где r – расстояние рассматриваемой точки от оптической оси, $p = L \mp f$, $L = F(F \pm \Delta f)/\Delta f$ – расстояние от анализатора до точки фокусировки (мнимого источника) при смещении анализатора вправо (влево). В приведенных выражениях верхний знак соответствует смещению анализатора вправо, нижний – влево. Интерференция этой волны с плоской волной канала распространения (1,1,0) приведет к образованию интерференционной картины на детекторе в виде концентрических полуколец с центром на оптической оси и радиусами

$$r_n = \sqrt{2\lambda p n} \quad (n = 1, 2, \dots), \quad (3)$$

что представляет френелевскую зонную структуру.

Схематическая картина хода лучей дефокусированного интерферометра при смещении анализатора влево приведена на рис.2а. На рис.2б приведена численно смоделированная интерференционная картина. Моделирование распространения рентгеновских лучей в интерферометре проведено на основе интегрирования уравнения Гельмгольца методом двумерного Фурье-преобразования [13]. При этом ФЗП считается плоским объектом с соответствующим комплекс-

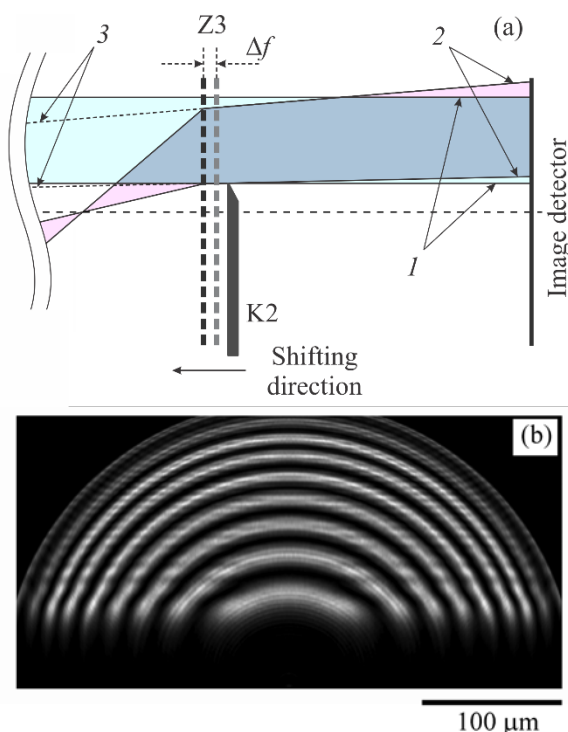


Рис.2. Продольно-дефокусированный интерферометр при смещении анализатора влево: (а) ход лучей, (б) численно смоделированная интерференционная картина. 1 – канал дифракции (1,1,0), 2 – канал дифракции (0,1,1), 3 – продолжение лучей канала (0,1,1), пересекающихся на мнимом источнике. Величина смещения анализатора $\Delta f = 5$ см.

ным коэффициентом прохождения, являющимся функцией двух пространственных координат. Такой упрощенный подход оправдан из-за слишком малого углового расхождения рентгеновских лучей в интерферометре и малого отличия показателя преломления от единицы [14,15]. При моделировании использованы следующие значения основных параметров. Длина волны рентгеновского излучения $\lambda = 0.1$ нм, фокусное расстояние ФЗП $F = 1$ м, число френелевских зон $n = 380$. Соответственно, внешний радиус ФЗП составляет $r_n = 195$ мкм, ширина последней зоны $\Delta r_n = 257$ нм. Глубина рельефа кремневых ФЗП была выбрана $h = 6.32$ мкм, что приводит к эффективности фокусировки первого порядка 13.8% (без учета поглощения на подложке ФЗП). Расстояние краев ножей от оптической оси составляет $d = 0.2r_n = 39$ мкм, расстояние анализатор – детектор $f = 4$ м, смещение анализатора от положения, соответствующего не дефокусированному интерферометру, составляет $\Delta f = 5$ см.

Кроме концентрических полуколец на интерференционной картине заметны горизонтальные линии, которые, вероятнее всего, являются результатом дифракции рентгеновских лучей на краях ножей.

4. Поперечная дефокусировка интерферометра

Если анализатор сместить перпендикулярно оптической оси на расстояние $\tau \ll r_n$, то канал дифракции (0,1,1), являющийся отображением точки фокусировки S, наклонится в сторону смещения на угол $\varphi = \tau/F$. В результате на детекторе образуется интерференционная картина в виде параллельных полос, перпендикулярных направлению смещения, с периодом $T = \lambda F / \tau = r_1^2 / \tau$, где $r_1 = \sqrt{\lambda F}$ – радиус первой френелевской зоны ФЗП.

На рис.3а,b приведены схема хода лучей и численно смоделированная интерференционная картина, соответственно, поперечно-дефокусированного интерферометра. Автор надеется, что полученную интерференционную картину можно использовать в задачах отображения фазового контраста в качестве базовых интерференционных полос для восстановления разности фаз интерферирующих пучков по методу Фурье-преобразования [16].

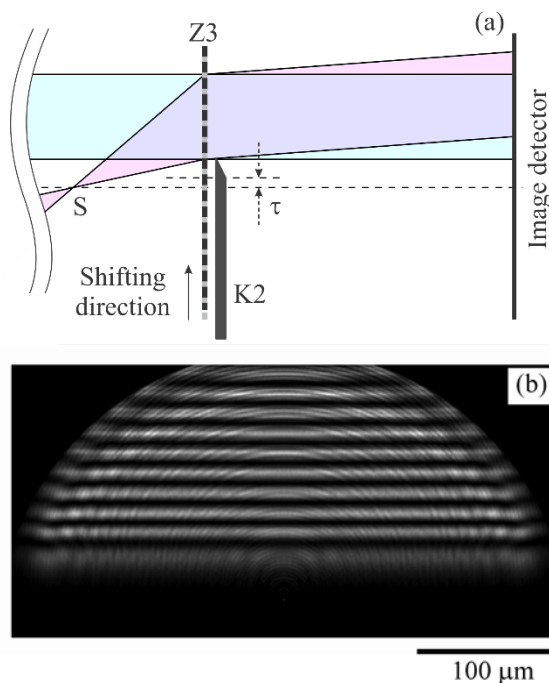


Рис.3. Поперечно-дефокусированный интерферометр: (а) ход лучей, (b) численно смоделированная интерференционная картина. Величина смещения анализатора $\tau = 7$ мкм.

5. Заключение

Предложен трехблочный интерферометр жесткого рентгеновского излучения, состоящий из двухуровневых ФЗП. Первый блок интерферометра действует как делитель, второй и третий – как зеркала и анализатор, соответственно. Интерферометр работает в режиме деления амплитуды и с равными длинами

траекторий в двух каналах распространения. Это снижает требования к пространственной и временной когерентности используемого излучения. Методом 3D моделирования рассмотрены продольно- и поперечно-дефокусированные разновидности этого интерферометра.

Автор надеется, что рассмотренный интерферометр можно использовать в задачах отображения фазового контраста в режиме оптического увеличения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.V. Baez.** J. Opt. Soc. Am., **42**, 756 (1952).
2. **W. Yun, B. Lai, Z. Cai, et. al.** Rev. Sci. Instrum., **70**, 2238 (1999).
3. **B. Lai, W.B. Yun, D. Legnini, Y. Xiao, J. Chrzas, et. al.** Appl. Phys. Lett., **61**, 1877 (1992).
4. **A.G. Michette.** Optical Systems for Soft X-Rays. New York, Plenum Press, 1986.
5. **T. Koyama, A. Saikubo, K. Shimose, K. Hayashi, A. Nakagawa, et al.** IPAP Conf. Ser., Proc. 8th Int. Conf. X-ray Microscopy, **7**, 389 (2006).
6. **T. Wilhein, B. Kaulich, J. Susini.** Opt. Commun., **193**, 19 (2001).
7. **T. Koyama, T. Tsuji, K. Yoshida, H. Takano, Y. Tsusaka, Y. Kagoshima.** Jpn. J. Appl. Phys., **45**, L1159 (2006).
8. **L.A. Haroutunyan, K.G. Trouni, A.V. Kuyumchyan.** AIP Conf. Proc., **1365**, 243 (2011).
9. **Л.А. Арутюнян, К.Г. Труни, Г.М. Оганесян.** Известия НАН Армении, Физика, **46**, 368 (2011).
10. **E. Di Fabrizio, F. Romanato, M. Gentili, et. al.** Nature, **401**, 895 (1999).
11. **U. Bonse, M. Hart.** Appl. Phys. Lett., **6**, 155 (1965).
12. **U. Bonse, M. Hart.** Z. Physik., **188**, 154 (1965).
13. **J.W. Goodman.** Introduction to Fourier Optics. New York, McGraw-Hill, 1996.
14. **V.G. Kohn, I.I. Snigireva, A. Snigirev.** Crystallogr. Reports, **51**, S4 (2006).
15. **В.Г. Кон, М.А. Орлов.** Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **11**, 76 (2010).
16. **M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi.** J. Opt. Soc. Am., **72**, 156 (1982).

AMPLITUDE-DIVISION TYPE X-RAY INTERFEROMETER BASED ON BI-LEVEL FRESNEL ZONE PLATES

L.A. HAROUTUNYAN

X-ray interferometer consisting of three Fresnel zone plates with a common optical axis was considered. Interferometer operates in the amplitude-division regime and does not impose strong requirements to the coherency of initial radiation. The presented interferometer is a modification of already considered one with such main difference, that laborious in fabrication the multilevel Fresnel zone plates replaced by ordinary bi-level ones. The longitudinal and transverse defocussed modifications of interferometer were considered by numerical simulation method.