

УДК 535.412

## РЕНТГЕНОВСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ФРЕНЕЛЕВСКИХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН

Л.А. АРУТЮНЯН<sup>1</sup>, К.Г. ТРУНИ<sup>2</sup>, Г.М. ОГАНЕСЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ереванский государственный университет, Армения

<sup>2</sup>Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван

(Поступила в редакцию 28 июля 2010 г.)

Предложен новый тип рентгеновского интерферометра на основе трех многоступенчатых зонных пластин с общей главной оптической осью. Аналогично широко известному трехблочному интерферометру с лауэвской геометрией дифракции, предложенный интерферометр не налагает жестких требований на пространственную и временную когерентность падающего излучения, что дает основание для его применения к лабораторным источникам рентгеновского излучения. Показано, что в проблемах восстановления фазового контраста данный интерферометр имеет преимущества, связанные с увеличением изображения.

### 1. Введение

В настоящее время одним из основных способов фокусировки жесткого рентгеновского излучения является использование френелевских зонных пластин (ФЗП) [1]. Существенной особенностью ФЗП по сравнению с обычными рефракционными линзами является наличие различных порядков дифракции и, следовательно, малая эффективность фокусировки. Так, для фазовой ФЗП общий поток падающего излучения распределяется следующим образом: по  $4/\pi^2 \approx 40.5\%$  приходится на волновые пакеты, дифрагированные в 1 и  $-1$  порядках, по  $4.5\%$  – на дифрагированные в  $\pm 3$  порядках, по  $1.6\%$  – на  $\pm 5$  порядках и т.д. [2]. При этом  $j$ -й порядок дифракции соответствует линзе с фокусным расстоянием  $F/j$ , где  $F = a^2/\lambda$ ,  $a$  – радиус первой зоны Френеля,  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения. Таким образом, теоретический предел эффективности фокусировки фазовых ФЗП составляет  $40.5\%$ , что практически достигнуто экспериментально [3,4].

В последнее время, с целью увеличения эффективности фокусировки, разработана многоступенчатая зонная пластинка (МСЗП) [5]. В таких зонных пластинках каждая пара зон обычной фазовой ФЗП заменяется  $M$  зонами ( $M = 3, 4, \dots$ ), со сдвигами фаз

$$\Phi_m = \frac{2\pi(m-1)}{M}, \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

В отсутствие поглощения в МСЗП реализуются только дифракционные порядки  $j = 1 \pm kM$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), причем наиболее выражен первый порядок. Эффективность остальных порядков снижается согласно фактору  $1/j^2$ .

Очевидно, что при последовательном пропорциональном уменьшении указанных сдвигов фаз:  $\Phi'_m = \alpha \Phi_m$  ( $0 < \alpha < 1$ ), появляется и волна нулевого порядка. Назовем такую пластину МСЗП с неполным фазовым сдвигом. Расчеты показывают, что для таких МСЗП при  $M = 3$  равенство эффективностей дифракций первого и нулевого порядков достигается при  $\alpha \approx 0.55$ .

## 2. Схема интерферометра

Рассмотрим рентгеновский интерферометр, состоящий из трех зонных пластин с общей главной оптической осью, сдвинутых друг относительно друга на двойное фокусное расстояние первого порядка дифракции. Пусть плоская монохроматическая волна падает на первый блок интерферометра, параллельно главной оптической оси, а интерференционная картина регистрируется за третьим блоком, в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси (рис.1а). Рассматривается интерференция между пучками следующих двух каналов дифракции: первый канал (1,1,0) – луч, дифрагированный на первом и втором блоках в первом порядке и в нулевом порядке – на третьем блоке (крупный пунктир на рис.1а). Второй канал (0,1,1): дифрагированный в нулевом порядке на первом блоке и в первом порядке на втором и третьем блоках (мелкий пунктир).

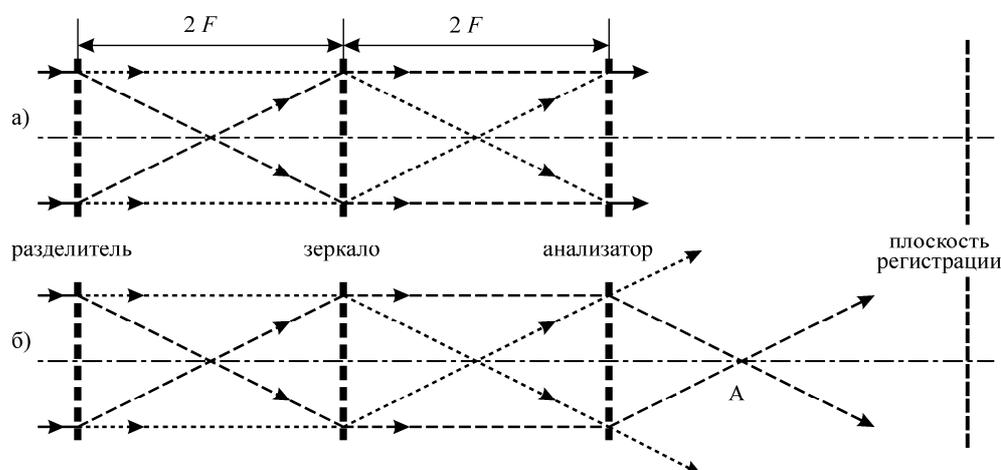


Рис.1. Схематическая картина интерферометра и ход лучей: а) каналы дифракции (1,1,0) и (0,1,1); б) каналы дифракции (1,1,1) и (0,1,0).

С целью подавления шумов интерференционных картин, вызванных влиянием других порядков дифракции, в качестве блоков интерферометра рассматриваются не ФЗП, а МСЗП с неполным фазовым сдвигом (для первого

и третьего блоков) и обычные МСЗП для второго блока. С учетом только дифракций первого порядка в обычном МСЗП, нулевого и первого порядков в МСЗП с неполным фазовым сдвигом, таких "нежелательных" каналов останется два: (1,1,1) и (0,1,0) (рис.1б). Как видно из рисунка, влияние этих каналов на интерференционную картину можно уменьшить удалением плоскости регистрации на несколько фокусных расстояний от третьего блока. Более того, влияние канала (1,1,1) можно исключить полностью путем размещения маленькой непрозрачной диафрагмы в точке его фокусировки, за третьим блоком (точка А на рис.1б).

Аналогично классическому трехблочному рентгеновскому интерферометру с лауэвской геометрией дифракции (ЛЛЛ-интерферометр) [6], предложенная схема интерферометра состоит из трех последовательных элементов: разделителя, зеркала и анализатора. Интерференционное поле в каждой точке формируется лучами, исходящими из одной и той же точки на поверхности разделителя, причем с равными длинами траекторий по двум каналам распространения. Эти обстоятельства снижают требования к пространственной и временной когерентности исходного излучения на поверхности разделителя. Это имеет место и для ЛЛЛ-интерферометров, что позволяет для них использовать лабораторные источники жесткого рентгеновского излучения. Естественно предполагать такую же возможность и для рассматриваемого случая.

Если третий блок интерферометра сместить параллельно оптической оси на расстояние, намного меньшее фокусного расстояния, то канал дифракции (0,1,1) после третьего блока преобразуется в слабо расходящийся (или сходящийся, в зависимости от направления смещения) пучок. В результате на плоскости регистрации образуется интерференционная картина с уменьшающимся периодом осцилляций при удалении от центра интерференционной картины к краям. Понятно, что аналогичные интерференционные полосы возникнут и при смещении первого или даже второго блоков интерферометра. Такие интерферометры, по аналогии с ЛЛЛ-интерферометром [7], можно назвать дефокусированными. На рис.2 показаны ход лучей (рис.2а) и численно моделированная интерференционная картина (рис.2б) такого интерферометра. В расчетах использованы следующие значения основных параметров интерферометра:  $\lambda = 0.1$  нм,  $F = 1$  м,  $M = 3$ , радиус МСЗП  $R = 316.2$  мкм, радиус непрозрачной диафрагмы  $R_s = 39.5$  мкм,  $\Delta = 1.4 \times 10^{-2} F$ , расстояние от третьего МСЗП до экрана  $L = 5F$ . Провал интенсивности в центре интерференционной картины обусловлен наличием диафрагмы в точке А на рис.1а. Отметим, что с целью уменьшения процессорного времени расчет интерференционной картины проведен для одномерного случая – для линейных зонных пластин.

Важным различием между ЛЛЛ и предложенным в данной работе интерферометрами заключается в том, что если в первом случае блоки интерферометра меняют направления распространения интерферирующих

пучков, оставляя их плоскопараллельными, то в нашем случае они меняют сходимости интерферирующих пучков (параллельный пучок на сходящийся, расходящийся – на параллельный).

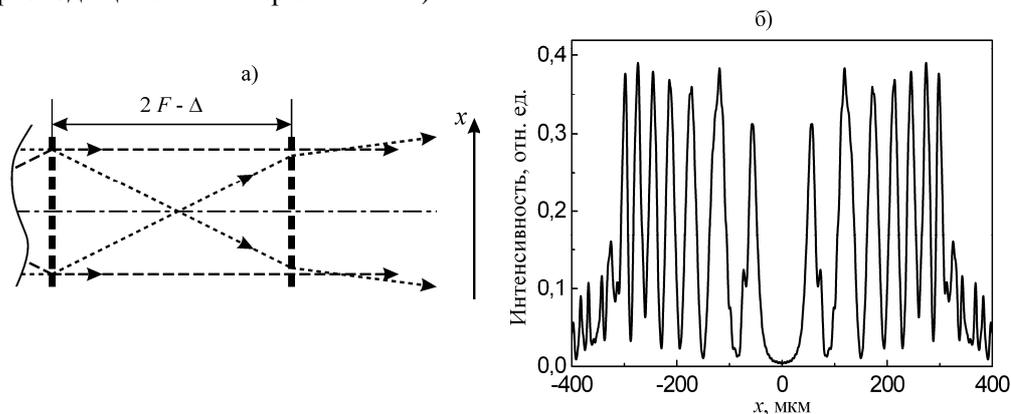


Рис.2. Трехблочный дефокусированный интерферометр: а) распространение интерферирующих пучков; б) расчетная интерференционная картина.

Авторы надеются, что предложенный интерферометр можно использовать для отображения фазового контраста, аналогично существующей в настоящее время технике с использованием ЛЛЛ-интерферометров [8], а вышеуказанная особенность позволит получить фазовое изображение в увеличенном масштабе (рентгеновский фазовый микроскоп).

### 3. Заключение

Рассмотрена новая схема рентгеновского интерферометра, состоящего из трех многоступенчатых зонных пластин с общей главной оптической осью. Для максимального подавления нежелательных порядков дифракции в блоках интерферометра и, следовательно, уменьшения шумов интерференционной картины, используются многоступенчатые обычные зонные пластинки (для среднего блока) и зонные пластинки с неполными фазовыми сдвигами (для двух крайних блоков).

Предложенный интерферометр не накладывает жестких требований к пространственной и временной когерентности падающего излучения и, скорее всего, может быть использован не только для синхротронных, но и лабораторных источников рентгеновского излучения.

Рассмотренный интерферометр допускает дефокусированную модификацию, аналогично трехблочному интерферометру с лауэвской геометрией дифракции. Появляющаяся при этом интерференционная картина может служить базовой интерференционной картиной для восстановления фазы в задачах отображения фазового контраста.

Сочетание эффектов фокусировки и интерференции в одном устройстве может служить основой для отображения фазового контраста в увеличенном масштабе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **A.V.Baez.** J. Opt. Soc. Am., **42**, 756 (1952).
2. **А.Мишегг.** Оптика мягкого рентгеновского излучения. М., Мир, 1989.
3. **А.Куйумчян, А.Исоян, Е.Шулаков, В.Аристов, М.Кондратенков, А.Снигирев, И.Снигирева, А.Суворова, К.Тамасаку, М.Ябашиди, Т.Ишикава, К.Труни.** Proc. of SPIE, **4783**, 92 (2002).
4. **А.Куйумчян, В.Кохн, А.Снигирев, И.Снигирева, А.Исоян, Е.Шулаков, В.Аристов.** Poverchnost RAS, **2**, 29 (2006).
5. **E.Di Fabrizio, F.Romanato, M.Gentili, S.Cabrini, B.Kaulich, J.Susini, R.Barrett.** Nature, **401**, 895 (1999).
6. **U.Bonse, M.Hart.** Appl. Phys. Lett., **6**, 155 (1965).
7. **U.Bonse, E. te Kaat.** Zeit. Phys., **243**, 14 (1971).
8. **A.Momose.** Nucl. Instr. Meth., **A352**, 622 (1995).

#### ՌԵՏՆԳԵՆՅԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱՉԱՓ ԿԱԶՄՎԱԾ ՖՐԵՆԵԼՅԱՆ ԳՈՏԻՍԿԱՆ ԹԻԹԵՂՆԵՐԻՑ

Լ.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ.Մ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Կ.Գ. ԹՐՈՒՆԻ

Առաջարկված է նոր տիպի ռենտգենյան ինտերֆերաչափ, հիմնված ընդհանուր օպտիկական առանցքով երեք բազմաստիճանային գոտիական թիթեղների վրա: Ինչպես և եռաբլոկ լաուեյան ինտերֆերաչափը, առաջարկվող ինտերաչափը չի ենթադրում կոշտ սահմանափակումներ ընկնող ճառագայրման տարածական և ժամանակային կոհերենտության նկատմամբ: Վարջինս կարող է հնարավոր դարձնել նրա կիրառումը ռենտգենյան ճառագայթների լաբորատոր աղբյուրների դեպքում: Ցույց է տրված այս ինտերֆերաչափի առավելությունը փուլային կոնտրաստի արտապատկերման ինդիրներում, կապված պատկերի խոշորացման հետ:

#### X-RAY INTERFEROMETER BASED ON FRESNEL ZONE PLATES

L.A. HAROUTUNYAN, G.M. HOVHANNISYAN, K.G. TROUNI

A new type of X-ray interferometer based on three multilevel zone plates with common lens axis is suggested. Like to well-known triple Laue-case X-ray interferometer this interferometer doesn't impose strict requirements on spatial and time coherence of the incident wave and therefore can be used with laboratory X-ray sources. The interferometer has advantages in the area of phase-contrast X-ray imaging, connected with the image magnification.