

РЕНТГЕНОВСКАЯ ФРЕНЕЛЕВСКАЯ ОСЕВАЯ ГОЛОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХБЛОЧНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ИЗ ФРЕНЕЛЕВСКИХ ЗОННЫХ ПЛАСТИН

Л.А. АРУТЮНЯН*, М.К. БАЛЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: levhar@ysu.am

(Поступила в редакцию 23 апреля 2020 г.)

Предложена схема реализации френелевской осевой голограммы для области жесткого рентгеновского излучения. Схема основана на трехблочном интерферометре из френелевских зонных пластин. В качестве тестового объекта для численного моделирования, рассмотрен трафарет, с напечатанным на ней текстом «X-RAY OPTICS». Хотя качество восстановленного изображения ограничено, что следовало ожидать при осевой голограмме, оно вполне достаточно для четкого отображения указанного текста.

1. Введение

В области рентгеновского излучения предложены различные голографические схемы: голограмма Фраунгофера [1–3], голограмма Габора и Фурье [4–9]. В работе [10] предложена схема рентгеновской Фурье голограммы, основанной на системе из двух зонных пластин. Предложены также схемы динамически-дифракционной рентгеновской голограммы [11–18].

В работах [19, 20] предложен интерферометр, основанный на трех френелевских зонных пластинах (ФЗП), и работающий в режиме деления амплитуды. В работе [21] была предложена голографическая схема Фурье с использованием первых двух блоков этого интерферометра.

Целью настоящей работы является реализация френелевской осевой голограммы в области жесткого рентгеновского излучения. Для записи голограммы используется вышеотмеченный трехблочный интерферометр, а восстановление изображения осуществляется численным способом.

2. Схема устройства для записи голограммы

Схематическая картина предлагаемой экспериментальной установки для записи голограммы представлена на рис.1. Она основана на интерферометре из трех ФЗП с общей оптической осью и удаленных друг от друга на двойное

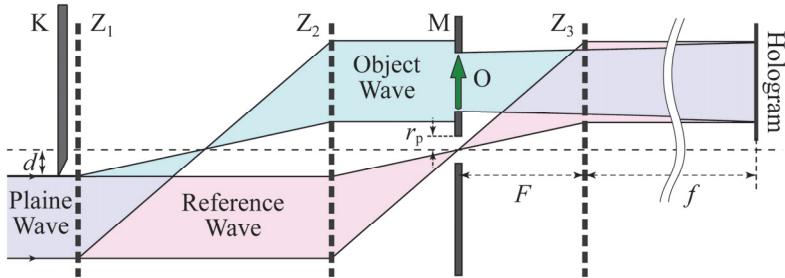


Рис.1. Схематическая картина устройства для записи голограммы. Z_1, Z_2, Z_3 – ФЗП, К – нож, М – маска на объектной плоскости, О – тестируемый объект, F – фокусное расстояние первого порядка дифракции ФЗП, d – расстояние края ножа от оптической оси, r_p – радиус отверстия на маске, f – расстояние голограммы от третьей ФЗП.

фокусное расстояние. На интерферометре падает плоская волна, параллельно оптической оси, а голограмма записывается после третьего блока, на расстоянии в несколько раз превышающей фокусное расстояние ФЗП. В качестве объектной волны рассматривается волновой пакет, дифрагированный в первом порядке на первом и втором ФЗП, и в нулевом порядке (т.е. проходящий) – на третьем. В качестве опорной волны – волновой пакет, дифрагированный в нулевом порядке на первом, и в первом порядке на втором и третьем ФЗП. Объектная плоскость совпадает с задней фокальной плоскостью второго ФЗП.

Являясь дифракционной решеткой, ФЗП обладают разными порядками дифракции. С учетом только 0, +1 и -1 порядков дифракций в интерферометре формируются 27 каналов распространения излучения. Блокировка 25 «нежелательных» каналов, а также пространственное разделение объектного и опорного волновых пакетов в объектной плоскости осуществляются ножом, расположенного непосредственно после первого ФЗП, и маской в объектной плоскости. Последнее из себя представляет непрозрачный экран, с окном для тестируемого объекта и маленьким отверстием для опорной волны с центром на оптической оси. В приближении геометрической оптики, построением хода лучей можно показать, что указанные 25 каналы распространения не пересекаются с голограммой, при выполнении условий

$$\begin{cases} f > \max(5/3, R/d - 1)F, \\ r_p < d, \end{cases} \quad (1)$$

где f – расстояние между третьей ФЗП и голограммой, F и R фокальное расстояние и радиус ФЗП, соответственно, d – расстояние края ножа от оптической оси, r_p – радиус отверстия на маске.

3. Аналитическое рассмотрение

Для аналитического рассмотрения вопроса достаточно предположить, что объектная волна образуется прохождением через объект плоской волны, а опорный пучок является плоской волной. Соответствующая упрощенная схема показана на рис.2.

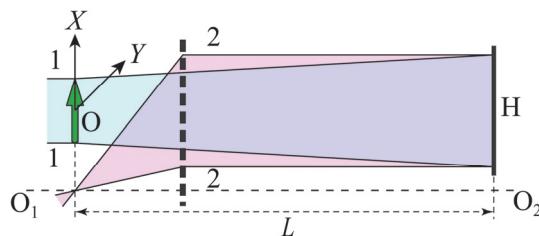


Рис.2. Упрощенная схема записи голограммы. O – тестируемый объект, H – голограмма, 1 – объектная волна, 2 – опорная волна, O_1O_2 – оптическая ось интерферометра, X и Y – координаты в объектной плоскости.

Амплитуду волны в плоскости голограммы можно представить в виде

$$E_{\text{hol}} = E_{\text{ref}} + E_{\text{obj}}, \quad (2)$$

а соответствующую интенсивность в виде

$$I_{\text{hol}} = |E_{\text{hol}}|^2 = |E_{\text{ref}}|^2 + E_{\text{ref}}^* E_{\text{obj}} + E_{\text{ref}}^* E_{\text{obj}} + |E_{\text{obj}}|^2 = \sum_{i=1}^4 I_{\text{hol},i}, \quad (3)$$

где E_{ref} – опорная волна, а E_{obj} – объектная волна. Обе волны распространяются вдоль оптической оси. Регистрированная интенсивность есть, осевая френелевская голограмма объекта. Объектную волну в параболическом приближении можно представить в виде

$$E_{\text{obj}} = -i \frac{kr\sqrt{t}}{2\pi L} \int_{-a}^a \int_{-a}^a T(X', Y') \exp \left[\frac{ik}{2L} [(X - X')^2 + (Y - Y')^2] \right] dX' dY', \quad (4)$$

где $T(X, Y)$ – комплексный амплитудный коэффициент пропускания объекта, $2a$ – размер объекта, k – волновое число, $L = F + f$ – расстояние от объекта до голограммы. Интегрирование производится по поверхности объекта. Опорную волну, в рамках сделанных предположений, можно представить в виде

$$E_{\text{ref}} = r\sqrt{t}. \quad (5)$$

Здесь r и t , соответственно, коэффициенты дифракции первого и нулевого порядка на ФЗП.

Численное восстановление изображения сводится к моделированию дифракции падающей на голограмму плоской волны, на расстояние L . Аналитически это можно описать умножением функции распределения интенсивности на голограмме (3) с функцией

$$-\frac{ik}{2\pi L} \exp \left[ik \frac{(X_p - X)^2 + (Y_p - Y)^2}{2L} \right] \quad (6)$$

и последующим интегрированием по поверхности голограммы по координатам X и Y (точно так же, как и в оптике видимого диапазона излучения [22]). Здесь X_p и Y_p координаты точки наблюдения на восстановленном изображении. Обозначим амплитуды восстановленных волн через E_{reci} , где i меняется от 1 до 4, соответственно четырем членам в выражении (3). При интегрировании пока будем предполагать, что размеры голограммы бесконечны, влияние конечных размеров голограммы будет рассмотрено в следующем разделе. В этом случае, в процессе интегрирования во втором члене в (3), получается дельта-функция Дирака, что позволяет вынести функции из-под знака интеграла по X' , Y' во внутреннем интеграле и получить сфокусированное изображение объекта. Не приводя здесь подробности вычислений, так как они приводятся к хорошо известным табличным интегралам, приведем лишь результаты:

$$\begin{aligned} E_{rec1} &= r^2 t, \\ E_{rec2} &= r^2 t T^*(X_p, Y_p), \\ E_{rec3} &= r^2 t \left(\frac{-ik}{4\pi L} \right) \int_{-a-a}^a \int_{-a-a}^a T(X', Y') \exp \left[ik \frac{(X_p - X')^2 + (Y_p - Y')^2}{4L} \right] dX' dY', \\ E_{rec4} &= r^2 t \left(\frac{k}{2\pi L} \right)^2 \int_{-a-a-a-a}^a \int_{-a-a-a-a}^a \int_{-a-a-a-a}^a \int_{-a-a-a-a}^a T(X', Y') T^*(X'', Y'') \\ &\times \exp \left[-ik \frac{(X_p - X'')(X' - X'') + (Y_p - Y'')(Y' - Y'')}{L} \right] dX' dY' dX'' dY''. \end{aligned} \quad (7)$$

Проанализируем каждый из восстановленных членов. Первый член из себя представляет восстановленную опорную волну; второй член – восстановленное сфокусированное изображение объекта; третий член – волновой пакет, распространяющийся от мнимого изображения объекта, расположенного слева от голограммы на расстоянии L , и проходящий расстояние $2L$ до точки наблюдения. Наконец четвертый член – так называемый интермодуляционный (или автокорреляционный) член. В результате получается сфокусированное изображение объекта, на фоне указанных трех пакетов. Это обстоятельство, в частности интерференционные явления между налагаемыми пакетами, ухудшает качество изображения. Эти трудности в оптике видимого диапазона излучения были преодолены созданием внеосевых голографических схем, когда опорная и объектная волны составляют некоторый угол друг относительно друга, и, в результате, вышеуказанные пакеты не накладываются с фокусированным изображением предмета [22].

4. Разрешающая способность

Разрешающая способность определяет наименьшее расстояние между двумя точками объекта, которые могут быть различимы на изображении. В предыдущем параграфе, при восстановлении изображения, мы интегрировали по поверхности голограммы, считая голограмму бесконечной. Вследствие этого получились дельта функции, а это означает, что бесконечная голограмма фокусирует точку объекта в точку изображения. Если же считать, что голограмма имеет конечные размеры H по двум направлениям OX и OY , то вместо дельта функций получится функция

$$f(X' - X_p, Y' - Y_p) = \frac{\sin \frac{k(X' - X_p)H}{2L} \sin \frac{k(Y' - Y_p)H}{2L}}{\frac{k(X' - X_p)H}{2L} \frac{k(Y' - Y_p)H}{2L}}. \quad (8)$$

В результате, голограмма с конечными размерами фокусирует точку объекта не в точку на изображении, а в дифракционное пятно с конечным размером. Размер этого пятна определяет разрешающую способность схемы. Из (8) для размера дифракционного пятна получим

$$D = 2\lambda L/H. \quad (9)$$

Оценим требования, предъявляемые к разрешающей способности детектора голограммы, необходимого для регистрации всех, образованных на нем интерференционных полос, включая полосы с наименьшим периодом. Период интерференционных полос задается выражением $\lambda/\sin\varphi$, где φ – угол между интерферирующими пучками, которое в нашем случае – угол рассеяния объектной волны при дифракции на тестируемом объекте. Максимальное значение этого угла – $\Phi_{\max} \approx R/L$, (считается, что размер голограммы H порядка радиуса ФЗП – R). Соответственно, для минимального периода образованных на голограмме интерференционных полос получим

$$D_{\text{hol}} \approx \lambda L/R. \quad (10)$$

С учетом соотношений $R = \sqrt{\lambda F N}$ и $\Delta R_N = \sqrt{\lambda F} / (2\sqrt{N})$ (N – количество френелевских зон, ΔR_N – ширина последней зоны ФЗП), выражение (10) преобразится к виду

$$D_{\text{hol}} = 2\Delta R_N L/F. \quad (11)$$

Если разрешающая способность детектора голограммы меньше указанного значения, то интерференционные полосы на голограмме с большим углом интерференции не будут зарегистрированы. Это приведет к уменьшению «эффективных» размеров голограммы и, согласно (9), понижению разрешающей способности восстановленного изображения.

Интерферометр, использованный в предложенной схеме, работает в режиме деления амплитуды, с равными длинами траекторий в обоих каналов распространения излучения. Вследствие этого он не налагает жесткие требования к характеристикам когерентности исходного излучения. Однако, угловое смещение объектной волны при дифракции на тестируемом объекте приводит к попеченному смещению интерферирующих между собой лучей на входе интерферометра, на величину φL . Максимальное значение этого смещения определяет требование к радиусу пространственной когерентности:

$$\rho = \varphi_{\max} L \approx R, \quad (12)$$

при которой будут зарегистрированы все интерференционные полосы. Восстановление изображения возможна и при низкой когерентности исходного излучения, однако в этом случае часть интерференционных полос, соответствующих большим углам рассеяния, не будут зарегистрированы. Это, аналогично рассмотренному выше случая детектора голограммы с низким пространственным разрешением, приведет к уменьшению «эффективных» размеров голограммы, и, соответственно, низкой разрешающей способности восстановленного изображения.

Угловое смещение лучей объектной волны при рассеянии на тестируемом объекте приводит и к разности длин траекторий интерферирующих между собой лучей. Грубая оценка этой разности приводит к

$$\Delta l \leq \frac{R^2}{F} \left(1 + \frac{F}{2L} \right) \approx \lambda N. \quad (13)$$

Соответствующее требование к немонохроматичности

$$\Delta\lambda/\lambda \leq N^{-1}, \quad (14)$$

что достижимо даже для лабораторных источников с характеристическим излучением.

5. Численное моделирование записи голограммы и восстановление изображения

С целью оценки целесообразности применения представленной схемы френелевской осевой голографии, нами проведено численное моделирование записи голограммы, и дальнейшее восстановление изображения тестируемого объекта от голограммы. Численное моделирование дифракции рентгеновских лучей в вакууме основано на интегрировании уравнения Гельмгольца методом двумерного преобразования Фурье [23]. Объекты на пути рентгеновского излучения (тестируемый объект, ФЗП и т.д.) считаются плоскими и описываются комплексными амплитудными коэффициентами пропускания как функции от

двух перпендикулярных к оптической оси координат. В качестве тестового объекта рассматривается надпись «X-RAY OPTICS» светлыми (прозрачными) буквами на черном фоне (шрифт Arial). Длина волны рентгеновского излучения: $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ (характеристическое излучение CuKa). Рассмотрены кремневые ФЗП с фокусным расстоянием $F = 20 \text{ см}$ и радиусом $R = 153 \mu\text{м}$. Соответственно этим значениям, количество френелевских зон: 760, ширина последней зоны: $0.1 \mu\text{м}$. Глубина рельефа зонной структуры выбрана $6.1 \mu\text{м}$, что приводит к фазовому скачку на границах зон в 0.6π рад. Голограмма регистрируется на расстоянии $f = 4F = 80 \text{ см}$ от третьего ФЗП (соответственно расстояние объект–голограмма: $L = F + f = 1 \text{ м}$). Расстояние края ножа от оптической оси: $d = 33.7 \mu\text{м}$, радиус отверстия на маске в предметной плоскости: $r_p = 0.5d = 16.8 \mu\text{м}$. Размер элементов изображения (пикселов) на детекторе голограммы выбрана $1 \mu\text{м}$, что по порядку соответствует требованию (9).

Восстановление изображения предмета от записанной голограммы осуществляется стандартным образом: рассматривается дифракция падающей на голограмму плоской волны на расстоянии равном расстоянию от предмета до голограммы L .

На Рис. 3 представлены (а) голограмма и (б) восстановленное изображение предмета. Как видно из рисунка, надпись на изображении вполне разборчива. Что касается помех на изображении, то этого следовало ожидать при френелевской осевой голографии, когда с восстановленным изображением налагаются вышеотмеченные «фоновые» поля (см. (7)).

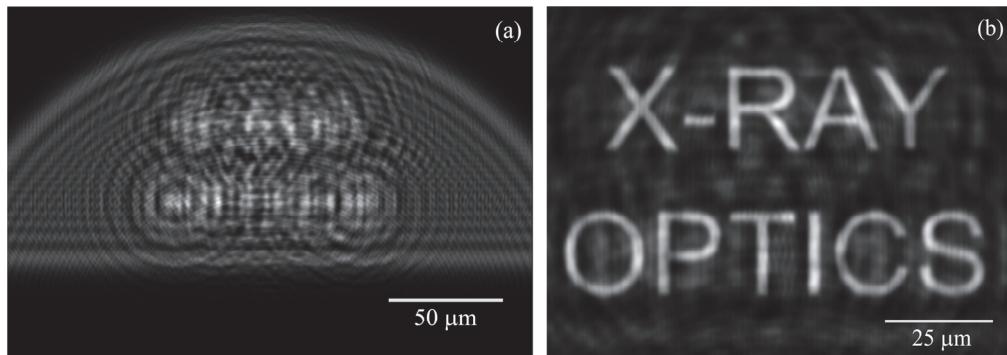


Рис.3. (а) Численно моделированная голограмма и (б) восстановленное от него изображение тестового объекта.

6. Заключение

Исследована возможность применения трехблочного интерферометра из ФЗП, работающего в режиме деления амплитуды, для реализации френелевской осевой голографии в области жесткого рентгеновского излучения. Для подавления множества каналов распространения излучения, возникающих в

интерферометре из-за наличия разных порядков дифракции на ФЗП, используется нож, расположенной на первом блоке и маска – на объектной плоскости интерферометра.

Оценены разрешающая способность метода, а также требования к детектору голограммы и когерентности исходного излучения. Отметим, что приведенные требования не категоричны, в том смысле, что восстановление изображения возможно и при несоблюдении указанных условий, однако, с малой разрешающей способностью.

В качестве тестового объекта при численном моделировании рассмотрена надпись текста ‘X-RAY OPTICS’. Хотя качество восстановленного изображения ограничено, чего и следовало ожидать при френелевской осевой голограммии, оно вполне достаточно для разборчивого отображения указанной надписи на восстановленном изображении.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ: М.К. Балян: обзор литературы, разделы 1, 3 и часть раздела 4; Л.А. Арутюнян: разделы 2, 5 и часть раздела 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Snigirev, L. Snigireva, V. Kohn, S. Kuznetsov, I. Schelokov. Rev. Sci. Instrum., **66**, 5486 (1995).
2. K.A. Nugent, T.E. Gureyev, D.F. Cookson, D. Paganin, Z. Barnea, Phys. Rev. Letters, **77**, 2961 (1996).
3. D.M. Paganin. Coherent X-ray optics, Oxford University Press, 2006.
4. I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen, E.H. Anderson, M.R. Howells, D.P. Kern, Science, **256**, 1009 (1992).
5. W. Leitenberger, A.J. Snigirev. J. Appl. Phys., **90**, 538 (2001).
6. N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohgashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki, S. Aoki. J. Phys. IV France, **104**, 551 (2003).
7. V. Aristov, A. Kuyumchyan, A. Souvorov, A. Isoyan, K. Trouni. Microsystem Tech, **11**, 26 (2004).
8. В.В. Аристов, А.В. Куюмчян, А.Ю. Суворов, Т. Ишикава, А.А. Исоян, К. Труни, Е. Саркисян. Известия Российской академии наук. Серия физическая, **69**, 220 (2005).
9. H. Iwamoto, N. Yagi. J. Synchrotron Rad., **18**, 564 (2011).
10. N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohgashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki, S. Aoki. AIP Conference Proceedings, **705**, 1340 (2004).
11. А.М. Егиазарян, П.А. Безирганин. Известия НАН РА, Физика, **15**, 35 (1980).
12. A. Momose. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, **352**, 622 (1995).
13. А.М. Егиазарян. Письма в ЖТФ, **24**(10), 55 (1998).

14. **А.М. Егиазарян, К.Г. Труни, А.Р. Мкртчян**, Письма в ЖЭТФ, **68**, 681 (1998).
15. **M. Balyan**. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51**, 79 (2016).
16. **M. Balyan**. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51**, 289 (2016).
17. **M. Balyan**. J. Synchrotron Rad., **20**, 749 (2013).
18. **M. Balyan**. J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **50**, 394 (2015).
19. **L.A. Haroutunyan**, J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **50**, 292 (2015).
20. **L.A. Haroutunyan**, J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **51**, 284 (2016).
21. **M. Balyan, L. Haroutunyan**, J. Synchrotron Rad., **25**, 241 (2018).
22. **Г. Колфилд**, Оптическая голограмма, том 1, Москва, «Мир», 1982.
23. **J. Goodman**, Introduction to Fourier Optics, New York: McGraw-Hill, 1996.

ՈԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՖՐԵՆԵԼՅԱՆ ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՀՈԼՈԳՐԱՖԻԱ,
ՖՐԵՆԵԼՅԱՆ ԳՈՏԻԱԿԱՆ ԹԻԹԵՂՆԵՐԻՑ ԿԱԶՄՎԱԾ
ԵՌԱԲԼՈԿ ԻՆՏԵՐՖԵՐՈՒՅԱՓԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՍԻ

Լ.Ա. ՀԱՐՈՒՆԵՐՈՒՅԱՆ, Մ.Կ. ԲԱԼՅԱՆ

Առաջարկված է ֆրենելյան առանցքային հոլոգրաֆիայի իրականացման սխեմա, ձարձագայթման ռենտգենյան տիրույթի համար: Սարքի հիմքում ընկած է ֆրենելյան գոտիական թիթեղներից բաղկացած եռաբլոկ իներֆերաչափ: Թվային մոդելավորման համար, որպես թեստային օբյեկտ դիտարկված է տրաֆարետ, որի վրա տպված է ‘X-RAY OPTICS’ տեքստը: Չնայած վերականգնված պատկերի որակը սահմանափակ է, ինչը սպասելի էր առանցքային հոլոգրաֆիայի դեպքում, այն միանգամայն բավարար է նշված տեքստը հստակ արտապատկերելու համար:

X-RAY ON-AXIS FRESNEL HOLOGRAPHY USING THREE-BLOCK FRESNEL ZONE PLATE INTERFEROMETER

L.A. HAROUTUNIAN, M.K. BALYAN

An experimental setup for X-ray on-axis Fresnel holography is suggested. It is based on three-block Fresnel zone plate interferometer. As a test object, for numerical simulation, a stencil with the text ‘X-RAY OPTICS’ printed on it is considered. Although the quality of the reconstructed image is limited, which should be expected in case of on-axis holography, it is still good enough for clear imaging of the text mentioned.