

УДК 535.417

Ю. Ц. Батомункуев, Н. А. Мещеряков

Институт оптики и оптических технологий СГГА
ул. Плахотного, 10, Новосибирск, 630108, Россия
E-mail: opttechnic@mail.ru

РАСЧЕТ РЕНТГЕНОВСКОЙ ГОЛОГРАММНОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ НАНОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

В работе выполнен расчет рентгеновских голограммных линз с исправленной сферической аберрацией седьмого порядка для рабочих длин волн 2,4, 4,5 и 13,5 нм. Радиус кривизны поверхности голограммной линзы определяется из условия максимальной дифракционной эффективности. Показано, что учет усадки толщины голограммной линзы позволяет исправить сферическую аберрацию пятого порядка. Получено, что выбором оптимальной длины волны когерентного источника могут быть записаны в одной и той же схеме голограммные линзы с существенно разными рабочими длинами волн. Относительные отверстия рассчитанных голограммных линз равны 1 : 1,1, 1 : 1 и 1 : 0,9.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, голограммная линза, аберрации рентгеновской голограммы.

Известно, что для фокусировки когерентного мягкого рентгеновского излучения [1; 2] могут быть использованы вогнутые зеркала, многослойные зеркала, зонные пластины Френеля, фокусирующие дифракционные решетки, преломляющие и капиллярные линзы [3–8]. Недостатками дифракционных элементов являются низкая эффективность, наличие множества порядков дифракции. К недостаткам зеркал, преломляющих и капиллярных линз следует отнести большие аберрации и малые значения относительных апертур. В то же время представляют интерес возможные комбинации дифракционных и преломляющих элементов, обеспечивающие один порядок дифракции и высокую дифракционную эффективность. Одним из примером такой комбинации является параболическая голограммная линза, которая может быть представлена, с одной стороны, в виде толстой зонной пластины Френеля с параболическими (асферическими) поверхностями, а с другой – в виде параболической (асферической) линзы, в объеме которой голографическим способом сформированы чередующиеся кольца модуляции показателя преломления и коэффициента поглощения.

Целью настоящей работы является расчет комбинированной голограммной линзы

для рентгеновского нанометрового диапазона спектра с исправленной сферической аберрацией седьмого порядка.

Ниже представлены схема записи Габора и рабочая схема комбинированной голограммной линзы. Ось Oz цилиндрической системы координат совпадает с оптической осью линзы, а ось Or проходит через центр линзы. В схеме записи z_r – координата источника расходящейся сферической волны, являющейся опорной волной, а z_0 – координата точки схождения второй сферической волны, являющейся объектной волной.

Плоскости предмета и изображения в рабочей схеме перпендикулярны оптической оси Oz (плоскость предмета проходит через точку с координатой z_c , а плоскость изображения – через точку с координатой z_i). В общем случае рабочая длина волны λ_c отличается от длины волны λ_0 когерентного источника при записи, а конечные значения показателя преломления n_c и толщины L_c комбинированной линзы отличаются от их начальных значений n_0 и L_0 . В дальнейшем комбинированную голограммную линзу будем называть голограммной линзой. Голограммная линза может быть реализована использованием в качестве материала линзы рентгеновских фоторезистов, например тонких слоев полиметилметакрилата и SU8 [7].

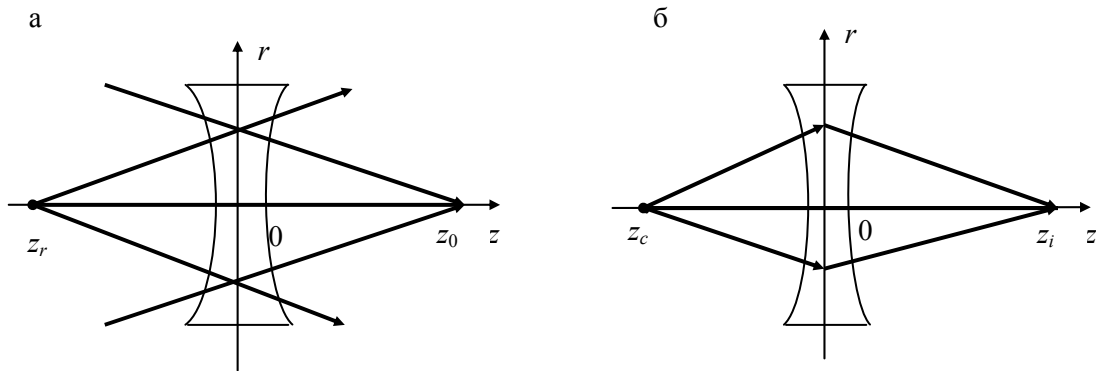


Рис. 1. Схема записи (а) и рабочая схема (б) голограммной линзы

Формирование объемной зонной пластины Френеля с большим аспектным отношением может быть осуществлено с помощью глубокой электронно-лучевой литографии или LIGA технологии [3; 7].

Расчет голограммной линзы основывается на известном методе характеристической функции $V(r, z)$ [4; 9]. Разложение этой функции имеет вид

$$V(r, z) = \frac{1}{2}(S_1 - S_2 z)r^2 - \frac{1}{8}(S_3 - 3S_4 z)r^4 + \frac{1}{16}S_5 r^6 - \frac{1}{16}S_7 r^8 + \dots,$$

где S_j – абберационные коэффициенты ($j = 1, 2, 3, \dots$), явный вид которых представлен, например, в [10]; (r, z) – координаты произвольной точки в объеме голограммной линзы.

При расчете голограммной линзы обычно задаются следующие величины: рабочая длина волны λ_c , положение предметной плоскости z_c (или плоскости изображения z_i) и требуемый коэффициент линейного увеличения β . Если же заданы фокусное расстояние F и коэффициент линейного увеличения β , то из формулы голограммы можно определить координаты z_c, z_i плоскостей предмета и изображения [9]. Расчет голограммной линзы включает в себя расчет схемы записи, так как характеристики голограммной линзы зависят от параметров схемы записи.

В общем случае расчет схемы записи заключается в определении длины волны λ_0 записывающего голограммную линзу когерентного излучения, в определении опти-

мальных волновых фронтов и интенсивностей опорной и объектной волн, а также в выборе оптимального значения экспозиции (или длительности записи). При записи двумя сферическими волнами требуется определение оптимальных координат z_r, z_0 опорной и объектной волн. Оптимальная длина волны записи λ_0 может быть определена из условия отсутствия сферической абберации третьего порядка на рабочей длине волны λ_c ($S_3 = 0$)

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_c n_0}{n_c m_r} \sqrt{1 + \frac{3(1 - \frac{m_z^2}{m_r^2})(\beta + 1)^2}{(\beta - 1)^2}},$$

где m_z, m_r – коэффициенты усадок вдоль осей Oz и Or [10]. Следует отметить, что длина волны λ_0 не зависит от фокусного расстояния F .

Координаты z_r, z_0 источников опорной и объектной волн могут быть определены из условия отсутствия на рабочей длине волны хроматической абберации $S_1 = 0$ и объемной хроматической абберации $S_2 = 0$:

$$z_r = \frac{2\mu F}{m_r^2 (P_c + 1)},$$

$$z_0 = \frac{2\mu F}{m_r^2 (P_c - 1)},$$

где параметр $P_c = \pm \frac{\mu m_z (\beta + 1)}{m_r^2 (\beta - 1)}$, $\mu = \frac{\lambda_c n_0}{\lambda_0 n_c}$ –

отношение длин волн в среде; F – фокусное расстояние голограммной линзы; m_r – коэффициент усадки вдоль оси Or [10]. В настоящее время разработаны лабораторные

установки для лазерной генерации на многих длинах волн мягкого рентгеновского излучения, например 13,2, 13,9, 14,7 нм (на переходе $4d^1S_0 - 4p^1P_1$ Ni-подобных ионов Cd, Ag и Pd) [11]. Разработка когерентных источников позволяет избавиться от хроматических аберраций рентгеновских оптических элементов.

В том случае, когда в процессе изготовления имеется возможность изменения толщины и диаметра голограммной линзы за счет изменения значений коэффициентов усадок m_z , m_r , оптимальное отношение этих коэффициентов усадок должно быть равно [12]

$$\frac{m_z}{m_r} = \sqrt{\frac{\beta^2 + \beta + 1 + \sqrt{\beta^4 + 6\beta^3 + 11\beta^2 + 6\beta + 1}}{2(\beta + 1)^2}}. \quad (1)$$

Выбор значений коэффициентов усадок m_z и m_r , удовлетворяющих формуле (1), позволяет исправить сферическую аберрацию пятого порядка.

Рассмотрим расчет габаритных параметров голограммной линзы. Толщина голограммной линзы L_c вдоль оптической оси (ось Oz) и радиусы кривизны R_{1c} , R_{2c} ее поверхностей могут быть определены из условия максимума локальной дифракционной эффективности в рабочей схеме:

$$(n_c - n_0) \left(L_c \mp \left(\frac{r^2}{2R_{1c}} - \frac{r^2}{2R_{2c}} \right) \right) \times \left(\frac{1}{1 - \frac{r^2}{2z_c^2}} + \frac{1}{1 - \frac{r^2}{2z_i^2}} \right) = \lambda_c. \quad (2)$$

При записи условия (2) изменение среднего показателя преломления принимается одинаковым во всем объеме линзы (не учитывается изменение показателя преломления линзы от координат r и z), кроме этого мы ограничимся рассмотрением линзы с параболическими поверхностями. В условии (2) и в последующих формулах верхний знак минус соответствует двояковыпуклой голограммной линзе, нижний знак плюс – двояковогнутой голограммной линзе.

Толщина голограммной линзы вдоль оптической оси равна

$$L_c = \frac{\lambda_c}{2(n_c - n_0)} = m_z L_0.$$

Чтобы оптический путь для осевого и внеосевого путей внутри голограммной

линзы был одинаковым, из разложения формулы (2) следует, что

$$\pm \left(\frac{1}{R_{1c}} - \frac{1}{R_{2c}} \right) = \frac{L_c}{2} \left(\frac{1}{z_i^2} + \frac{1}{z_c^2} \right). \quad (3)$$

Для симметричной голограммной линзы радиус кривизны $R_c = R_{2c} = -R_{1c}$ должен быть равен

$$R_c = \pm \frac{4z_c^2 z_i^2}{L_c(z_c^2 + z_i^2)} = \pm \frac{m_r^2 R_0}{m_z},$$

где R_0 – начальный радиус кривизны симметричной линзы.

Для голограммной линзы с разными радиусами кривизны, например, если один из радиусов задается кривизной поверхности подложки, второй может быть вычислен из формулы (3).

Световой диаметр D_c голограммной линзы может быть определен, например, из условия равенства радиуса сферической аберрации седьмого порядка и радиуса центрального максимума дифракции Фраунгофера [12]:

$$\frac{5}{16} S_7 z_i \left(\frac{D_c}{2} \right)^7 = \frac{1,22 \lambda_c z_i}{D_c}.$$

В этом случае световой диаметр D_c голограммной линзы

$$D_c = 2 \left(\frac{1,925 \lambda_c}{S_7} \right)^{\frac{1}{8}}.$$

При диаметре голограммной линзы меньше D_c величина аберраций будет определяться дифракцией на краю линзы, при диаметре линзы больше D_c – геометрическими аберрациями, имеющими дифракционную структуру. Пространственное разрешение r' голограммной линзы может быть определено по формуле

$$r' = \frac{1,22 \lambda_c F (\beta - 1)}{\beta D_c}.$$

Известно, что пространственное разрешение голограммной линзы совпадает с шириной самых узких кольцевых зон Френеля [3]. Метод характеристической функции также может быть применен и к многокомпонентным преломляющим линзам [7].

Результаты расчетов трех рентгеновских голограммных линз с одинаковыми фокусными расстояниями $F = 10,0$ мкм и коэффициентами линейного увеличения $\beta = -10$ крат представлены ниже. Изменение среднего показателя преломления принято рав-

Характеристики рентгеновских голограммных линз

N	λ_c , нм	λ_0 , нм	m_z	z_0 , мкм	z_r , мкм	L_0 , мкм	L_c , мкм	R_0 , мкм	R_c , мкм	D_c , мкм	r' нм
1	2,4	3,05	0,83	33,8	-10,2	1,44	1,20	276	332	9,7	3,3
2	4,5	5,73	0,83	33,8	-10,2	2,71	2,25	147	177	10,5	5,8
3	13,5	17,2	0,83	33,8	-10,2	8,12	6,75	49	59	12,0	13,4

ным $\Delta n = n_c - n_0 = 10^{-3}$, коэффициент усадок $m_r = 1$, начальное значение показателя преломления $n_0 = 1$, рабочие длины волн λ_c рассчитанных голограммных линз равны соответственно 2,4, 4,5, 13,5 нм.

Таким образом, в работе выполнен расчет рентгеновских голограммных линз с исправленной сферической аберрацией седьмого порядка. Показано, что учет усадки толщины голограммной линзы позволяет исправить сферическую аберрацию пятого порядка. Получено, что выбором оптимальной длины волны когерентного источника могут быть записаны в одной и той же схеме двумя сферическими волнами голограммные линзы с существенно разными рабочими длинами волн. Относительные отверстия рассчитанных голограммных линз равны 1 : 1,1, 1 : 1 и 1 : 0,9. Ширина зон Френеля на краю линз равна соответственно 3,3, 5,8, 13,4 нм. Представленные результаты могут быть использованы при разработке схем записи рентгеновских голограммных линз, а также при разработке на их основе многокомпонентных рентгеновских оптических систем с повышенным значением относительного отверстия.

Список литературы

1. Глушкин Е. С., Кулипанов Г. Н., Кезерашвили Г. Я., Пиндюрин В. Ф., Скринский Л. Н., Соколов А. С., Ильинский П. П. Исследование излучения из спирального ондулятора, установленного на накопителе ВЭПП-2М, как источника для рентгеновской микроскопии и голографии // Рентгеновская оптика и микроскопия: Пер. с англ. / Под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа. М.: Мир, 1987. 463 с.
2. Виноградов А. В., Рокка Дж. Дж. Импульсно-периодический рентгеновский лазер на переходе $3p-3s$ Ne-подобного аргона в капиллярном разряде // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 1. С. 7–17.
3. Рентгеновская оптика и микроскопия / Под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа; пер. с англ. Н. Н. Зорева, И. В. Кожевникова; под ред. А. В. Виноградова. М.: Мир, 1987. 464 с.
4. Мишкетт А. Оптика мягкого рентгеновского излучения / Пер. с англ. Н. Н. Зорева, И. В. Кожевникова; под ред. А. В. Виноградова. М.: Мир, 1989. 352 с.
5. Виноградов А. В., Брытов И. А., Грудский А. Я., Кожевников И. В., Коган М. Т., Слемзин В. А. Зеркальная рентгеновская оптика / Под ред. А. В. Виноградова. Л.: Машиностроение, 1989. 467 с.
6. Аркадьев В. А., Кумахов М. А., Пономарев И. Ю., Ходеев И. А., Чертов Ю. П., Шахпаронов И. М. Широкополосная рентгеновская оптика с большой угловой апертурой // УФН. 1989. Т. 157, вып. 3. С. 529–537.
7. Аристов В. В., Шабельников Л. Г. Современные достижения рентгеновской оптики преломления // УФН. 2008. Т. 178, № 1. С. 61–83.
8. Бибишкин М. С., Вайнер Ю. А., Пестов А. Е., Прохоров К. А., Салащенко Н. Н., Фраерман А. А., Чхало Н. И. Исследование характеристик многослойных рентгеновских зеркал с ультракороткими периодами $d = 0,7-2,4$ нм // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69, № 2. С. 199–206.
9. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.
10. Батомункуев Ю. Ц. Особенности расчета схем записи объемных осевых голографических оптических элементов с неизоотропной усадкой // Автотметрия. 2002. № 2. С. 108–114.
11. Рагозин Е. Н., Собельман И. И. Лазерные источники в мягкой рентгеновской

области спектра // УФН. 2005. Т. 175, № 12. С. 1339–1341.

12. Батомункуев Ю. Ц. Особенности расчета рентгеновских объемных голограммных элементов // Сб. тр. V Междунар.

конф. «ГОЛО-ЭКСПО-2008». СПб., 2008. С. 249–253.

Материал поступил в редколлегию 11.01.2009

Yu. Ts. Batomunkuev, N. A. Mescheryakov

**CALCULATION OF THE X-RAY HOLOGRAPHIC LENS
FOR THE NANOMETRIC RANGE OF SPECTRUM**

Calculation of x-ray holographic lenses with corrective spherical aberration of the seventh order for working wavelength 2,4 nm, 4,5 nm and 13,5 nm is executed in article. The radius of surfaces of holographic lenses is determined from condition of maximum of diffractive efficiency. It is shown that consideration of shrinkage of thickness of the holographic lenses allows to correct the spherical aberration of the fifth order. It is obtained that holographic lenses with greatly different working wavelengths can be recorded on one scheme by choice of optimum of wavelength of coherent source. The relative diameters of the obtained holographic lenses are 1:1,1, 1:1 and 1:0,9.

Keywords: x-ray optics, holographic lens, aberrations of x-ray hologram.