

АБЕРРАЦИИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ, ВЫЗВАННЫЕ ОШИБКАМИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

При синтезе зонной структуры дифракционных линз (ДЛ) с помощью генераторов микроизображения [1-3] неизбежны технологические ошибки, приводящие к отклонению фокусного расстояния линзы от расчетного значения и к aberrациям в изображении осевого точечного источника, формируемом линзой.

Оценке влияния ошибок изготовления на оптические характеристики ДЛ посвящен ряд работ. В частности, в [4] даны допуски на те виды технологических ошибок, которые приводят к aberrациям Зейделя в формируемом изображении. В работах [2,5,6] проведен анализ влияния на качество изображения взаимного смещения фрагментов зон структуры линзы, а в работах [7,8] - ошибок совмещения фотошаблонов при фотолитографическом процессе синтеза ДЛ с многоступенчатой рельефно-фазовой структурой.

Настоящая работа посвящена анализу влияния на фокусирующие и aberrационные свойства ДЛ таких ошибок синтеза ее зонной структуры, как несоответствие радиусов кольцевых зон расчетным значениям, смещение центров зон и их эллиптичность. Анализ проводится в приближении aberrаций не выше третьего порядка и в предположении, что указанные ошибки являются степенными функциями апертуры линзы.

Как показано в [9], эйконал волнового поля, формируемого ДЛ в m -м порядке дифракции, в ее собственной плоскости описывается выражением

$$G_m = G + \frac{m\lambda}{\lambda_0} G_0. \quad (1)$$

Здесь G и λ - эйконал и длина падающей волны; G_0 - эйконал записи структуры ДЛ, определяющий ее фокусирующие и aberrационные свойства; λ_0 - длина волны записи.

Выражение (1) показывает, что если ДЛ освещается осевым коллимированным пучком с $\lambda = \lambda_0$, то в минус первом рабочем порядке дифракции эйконал формируемой ДЛ волны с точностью до знака совпадает с эйконалом записи. Следовательно, эйконал записи идеальной ДЛ, т.е. линзы, формирующей безaberrационный сферический волновой фронт, в выбранном приближении имеет вид

$$G = \frac{r^2}{2f'_0} - \frac{r^4}{8f'^3_0}, \quad (2)$$

где f'_0 - расчетное фокусное расстояние ДЛ на длине волны λ_0 , r - расстояние в плоскости линзы от ее оптической оси.

Из выражения (2) следует, что радиус k -й изофазы структуры идеальной ДЛ связан с f_0 и λ_0 уравнением

$$\frac{r_k^2}{2f'_0} - \frac{r_k^4}{8f'^3_0} = \frac{k\lambda_0}{2}. \quad (3)$$

Для описания изофаз при наличии ошибок синтеза структуры введем полярные координаты в плоскости ДЛ ρ и ϑ , отсчитываемые от расчетного центра кольцевых зон и полярной оси OY , соответственно. Тогда координата ρ_k k -й изофазы может быть легко выражена через радиус соответствующей изофазы идеальной линзы:

$$\rho_k = r_k + \Delta\rho_k, \quad (4)$$

где $\Delta\rho_k$ - ошибка позиционирования k -й изофазы.

В приближении аббераций третьего порядка, а также при условии, когда $\Delta\rho_k \ll r_k$ из выражения (4) следует, что

$$\left. \begin{aligned} r_k^2 &= \rho_k^2 - 2\rho_k \Delta\rho_k; \\ r_k^4 &= \rho_k^4, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а сама ошибка может быть представлена в виде

$$\Delta\rho_k = \Delta r_k + y_{c,k} \cos \vartheta + \epsilon_k \cos^2 \vartheta, \quad (6)$$

где Δr_k - отклонение радиуса k -й изофазы от расчетного значения; $y_{c,k}$ - смещение центра k -й изофазы; ϵ_k - величина, характеризующая эллиптичность k -й изофазы и равная разности ее полуосей.

Подставив соотношения (5), (6) в (3) получим уравнение k -й изофазы при наличии ошибок позиционирования

$$\frac{\rho_k^2}{2f'_0} - \frac{\rho_k^4}{8f'^3_0} - \frac{\rho_k}{f'_0} (\Delta r_k + y_{c,k} \cos \vartheta + \epsilon_k \cos^2 \vartheta) = \frac{k\lambda}{2}. \quad (7)$$

Эйконал записи структуры ДЛ, изофазы которой описываются уравнением (7), имеет вид

$$G^i_0(\rho, \vartheta, y_c) = \frac{\rho^2}{2f'_0} - \frac{\rho^4}{8f'^3_0} - \frac{\rho}{f'_0} (\Delta r + y_c \cos \vartheta + \epsilon \cos^2 \vartheta). \quad (8)$$

Сравнивая выражения (2) и (8), видим, что при наличии ошибок позиционирования ДЛ формирует абберированный волновой фронт, а его волновая абберация описывается соотношением

$$\Delta G^i_0(\rho, \vartheta, y_c) = \frac{\rho}{f'_0} (\Delta r + y_c \cos \vartheta + \epsilon \cos^2 \vartheta). \quad (9)$$

Для оценки максимально допустимого значения каждой из рассматриваемых ошибок воспользуемся критерием Штреля, согласно которому сфокусированное пятно практически не отличается от дифракционно ограниченного, если нормированная интенсивность в дифракционном фокусе не меньше 0,8 [10]. Кроме того, как это было оговорено выше, будем считать, что ошибки позиционирования являются степенными функциями апертуры ДЛ, т.е. в рассматриваемом приближении могут быть представлены в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta r(\rho) &= B \cdot \rho^\alpha; & y_c(\rho) &= C \cdot \rho^\alpha; \\ \epsilon(\rho) &= A \cdot \rho^\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где A, B, C - константы; $0 \leq \alpha \leq 3$.

Тогда при отклонениях радиусов изофаз кольцевых зон от расчетных значений получаем, что

$$\Delta r_{\max} = b(\alpha) \cdot \frac{\lambda}{\operatorname{tg} \sigma'_A} \approx b(\alpha) \Delta_{\min}, \quad (11)$$

где

$$b(\alpha) = \frac{(\alpha+3)(\alpha+5)}{\pi|\alpha^2-1} \cdot \sqrt{\frac{\alpha+2}{20}}; \quad (\alpha \neq 1), \quad (12)$$

Δr_{\max} - максимально допустимое отклонение радиуса изофазы от расчетного значения на краю ДЛ; σ'_A - апертурный угол в пространстве изображений; Δ_{\min} - период структуры на краю ДЛ.

При этом дифракционный фокус линзы смещается вдоль ее оптической оси и отстоит от паракиального фокуса на величину

$$\Delta f'_0 = \frac{24(\alpha+1)}{(\alpha+3)(\alpha+5)} \cdot \frac{\Delta r_{\max}}{\operatorname{tg} \sigma'_{A1}} \quad (13)$$

Отметим, что при $\alpha = 1$, т.е. при линейной зависимости ошибки Δr от апертуры ДЛ, как следует из выражения (9) с учетом первого из соотношений (10), волновая aberrация линзы представляет собой aberrацию расфокусировки. Она, не ухудшая качества изображения, приводит к изменению фокусного расстояния ДЛ на величину, определяемую формулой (13). При $\alpha \neq 1$ волновой фронт, формируемый ДЛ, искажен сферической aberrацией и, в частности, при $\alpha = 3$ - сферической aberrацией Зейделя.

Если ошибка позиционирования такова, что приводит лишь к неконцентричности кольцевых зон структуры ДЛ, радиусы изофаз которой удовлетворяют уравнению (3), то допуск на максимальное смещение центра крайней изофазы

$$y_{c,\max} = c(\alpha) \frac{\lambda_0}{\operatorname{tg} \sigma'_{A1}} \approx c(\alpha) \Delta_{\min}' \quad (14)$$

где

$$c(\alpha) = \frac{\alpha+4}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha+2}{10}}; \quad (\alpha \neq 0). \quad (15)$$

Дифракционный же фокус смещен вдоль оси OY и отстоит от паракиального фокуса на величину

$$\Delta y' = \frac{4y_{c,\max}}{\alpha+4} \quad (16)$$

Очевидно, что при $\alpha = 0$, т.е. когда, несмотря на смещение, зоны остаются концентричными, линза формирует неабerrированный волновой фронт. При всех остальных же значениях α волновой фронт, формируемый ДЛ, искажен aberrациями типа комы и, в частности, при $\alpha = 2$ - комой Зейделя.

При ошибках позиционирования, приводящих к эллиптичности изофаз, максимально допустимое значение разности полуосей крайней изофазы структуры линзы

$$\epsilon_{\max} = a(\alpha) \frac{\lambda_0}{\operatorname{tg} \sigma'_{A1}} \approx a(\alpha) \cdot \Delta_{\min}' \quad (17)$$

где

$$a(\alpha) = \frac{(\alpha+3)(\alpha+5)}{\pi} \sqrt{\frac{2(\alpha+2)}{5(3\alpha^4 + 6\alpha^3 + 90\alpha^2 + 240\alpha + 227)}} \quad (18)$$

При этом дифракционный фокус смещается вдоль оси линзы на величину

$$\Delta f'_0 = \frac{12(\alpha+1)}{(\alpha+3)(\alpha+5)} \frac{\epsilon_{\max}}{\operatorname{tg} \sigma'_{A1}} \quad (19)$$

В отличие от вышерассмотренных случаев линза с эллиптичными зонами формирует aberrированный фронт при любом значении α и, в частности, при $\alpha = 1$ качество изображения ограничено астигматизмом Зейделя, а при $\alpha = 3$ - aberrацией типа птеры пятого порядка [9].

Таким образом, результаты данной работы позволяют прогнозировать aberrации синтезированных ДЛ, оценивать их качество, а также выработать требования к точностным характеристикам генераторов изображения, используемых для синтеза зонной структуры.

1. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы /В.П. Корольков, В.П. Коронкевич, И.А. Михальцова и др. // Автометрия, 1989, № 3, с. 95-102; № 4, с. 47-64.
 2. Рентгеновская оптика и микроскопия / Под ред. Г.Шмаля, Д. Рудольфа: Пер. с англ. под ред. А.В. Виноградова. - М.: Мир, 1987. - 464 с.
 3. Аристов В.В., Бабин С.В., Ермо А.И. Возможности технологии микроэлектроники для создания элементов компьютерной оптики. - Компьютерная оптика / МЦНТИ, ЦКБ УП АН СССР.М., 1989, вып. 4, с. 61-65.
 4. *Vladimirsky Y., Koops H.W.* Moire Method and Zone Plate Pattern Inaccuracies // 32 nd Int. Symp. on Electron, Ion and Photon Beams, 1988, p. 1-11.
 5. *Simpson M.J., Michette A.G.* The effects of manufacturing inaccuracies on the imaging properties of Fresnel zone plates // Optica Acta. - 1983, vol. 30, N 10, p. 1455-1462.
 6. The effects of manufacturing inaccuracies on the imaging properties of zone plates / M.J. Simpson, M.T. Browne, R.E. Burge and etc. Journ. De Phys., 1984, vol. 45, N 2, p. C2-93-C2-96.
 7. Пальчикова И.Г., Рябчук А.Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформ на функцию зрачка. Автометрия, 1985, № 6, с. 38-42.
 8. Бобров С.Т. Влияние ошибок изготовления дифракционных линз на качество формируемого изображения. Автометрия, 1987, № 5, с. 62-66.
 9. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем.Л.: Машиностроение, 1986. - 223 с.
 10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. / Под ред. Г.П. Матюевича. М.: Наука, 1973. - 720 с.
-