

МНОГОФОКУСНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА

Л.Л. Досколович^{1,2}, Е.А. Безус^{1,2}, Н.Л. Казанский^{1,2}¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Предложен метод расчёта спектральной многофокусной дифракционной линзы, формирующей заданный набор фокусов с фиксированными положениями при нескольких различных длинах волн. Метод основан на минимизации функции, представляющей квадрат модуля разности между комплексными амплитудами пучков, формируемых микрорельефом спектральной линзы для заданных длин волн, и функциями комплексного пропускания многофокусных линз, рассчитанных для указанных длин волн. В качестве примера были рассчитаны зонные пластинки, формирующие три фиксированных фокуса при трёх и четырёх длинах волн. Полученные результаты могут найти применение при разработке и создании новых многофокусных контактных и интраокулярных линз с уменьшенными хроматическими аберрациями.

Ключевые слова: многофокусная линза, дифракционная линза, зонная пластинка, дифракционная оптика.

Цитирование: Досколович, Л.Л. Многофокусная спектральная дифракционная линза / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 219-226. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-219-226.

Введение

Многофокусные дифракционные линзы позволяют сфокусировать падающий световой пучок в несколько фокусов на оптической оси, обеспечивая при этом требуемое распределение энергии между фокусами [1, 2]. Многофокусные линзы имеют ряд важных применений в офтальмологии, оптических датчиках и системах микроскопии [3]. В частности, контактные и интраокулярные линзы (ИОЛ), обеспечивающие хорошее зрение на ближних, средних и дальних расстояниях, обычно основаны на многофокусных дифракционных линзах, формирующих заданный набор фокусов, соответствующих различным зрительным расстояниям [2, 4–9]. Формирование нескольких фокусов достигается либо за счёт разделения ИОЛ на несколько зон, каждая из которых формирует один из фокусов [4–7], либо за счёт комбинирования преломляющей линзы с фиксированным фокусным расстоянием с дифракционной зонной пластинкой, формирующей дополнительные фокусы в нескольких порядках дифракции [2, 3, 6–10]. До недавнего времени большинство доступных многофокусных ИОЛ формировали только два различных фокуса. Недавно на рынке появились трёхфокусные линзы, которые, в сравнении с двухфокусными линзами, обеспечили существенное улучшение качества зрения на средних зрительных расстояниях [5]. Трёхфокусные линзы содержат «сегментированный» дифракционный рельеф, состоящий из чередующихся ступенек с различной высотой, формирующих два фокуса в дополнение к основному фокусу. Имплантация линз такого типа обсуждалась в работе [11]. В общем случае использование сегментированного рельефа приводит к увеличению размера дифракционного пятна.

Дифракционный рельеф, используемый в существующих ИОЛ, обеспечивает формирование дополни-

тельных фокусов (одного или двух с заданным положением) только для одной заданной длины волны. При изменении длины волны изменяются положения дополнительных фокусов, а также распределение энергии между фокусами. Это может привести к существенному ухудшению качества изображений, формируемых при различных длинах волн.

В настоящей работе предлагается метод расчёта так называемых «спектральных многофокусных дифракционных линз», формирующих заданный набор фокусов, которые сохраняют свое положение для нескольких различных длин волн. В качестве примера рассчитаны спектральные трёхфокусные линзы, имеющие фиксированную оптическую силу для трёх и четырёх расчётных длин волн. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного метода и показывают формирование трёх фокусов с фиксированными положениями для расчётных длин волн.

1. Метод расчёта

Рассматриваемая в настоящей работе многофокусная линза соответствует комбинации двух оптических элементов: тонкой рефракционной линзы и дифракционной многофокусной зонной пластинки (МЗП). При необходимости эти два элемента могут быть объединены в единой многофокусной линзе [1, 10].

Рассмотрим сначала расчёт МЗП для одной заданной длины волны λ . Общий метод расчёта МЗП описан в работах [1, 2]. При этом фазовая функция МЗП имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{mf}(\rho; \lambda) &= \Phi[\varphi_d(\rho; \lambda)] = \\ &= \Phi\left[\text{mod}_{2\pi}\left(\frac{\pi\rho^2}{\lambda f_d}\right)\right], \quad \rho \in [0, R], \end{aligned} \quad (1)$$

где R – радиус апертуры МЗП, $\varphi_d(\rho; \lambda) = \text{mod}_{2\pi}[\pi\rho^2/(\lambda f_d)]$ – параксиальная фазовая

функция дифракционной линзы с фокусным расстоянием f_d . Функция $\Phi[\varphi_d]$ в (1) описывает нелинейное преобразование фазы дифракционной линзы и, как показано в [1, 2], обеспечивает формирование дополнительных порядков дифракции, соответствующих сферическим пучкам с фокусными расстояниями f_d/m , $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. При этом фокусные расстояния многофокусной линзы, состоящей из тонкой рефракционной линзы с фокусным расстоянием f_0 и МЗП, описываются следующим выражением:

$$F_m = \frac{f_0 f_d}{f_d - m f_0}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

Распределение энергии между фокусами определяется величинами $I_m = |c_m|^2$, где

$$c_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(i\Phi[\xi] - im\xi) d\xi \quad (3)$$

– коэффициенты Фурье функции $\exp(i\Phi[\xi])$ ($\sum_m |c_m|^2 = 1$) [1, 2].

Для трёхфокусной зонной пластинки с бинарным микрорельефом функция нелинейного преобразования может быть определена в виде [1, 2]

$$\Phi[\xi] = \begin{cases} 0, & \xi \in [0, \pi), \\ \varphi, & \xi \in [\pi, 2\pi), \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi = 2 \tan^{-1}(\pi/2)$. Значение φ выбирается так, что $|c_{-1}|^2 = |c_0|^2 = |c_1|^2 \approx 0,2884$. В этом случае более 86 % энергии падающего пучка будет направлено МЗП (1) в три сферических пучка с фокусными расстояниями F_m , $m = -1, 0, 1$. В случае трёхфокусной зонной пластинки с непрерывным микрорельефом функция $\Phi[\xi]$ может быть определена как тригонометрическая функция [8, 9]:

$$\Phi[\xi] = 1,435 \cdot \sin(\xi). \quad (5)$$

Множитель в формуле (5) обеспечивает равномерное распределение энергии между тремя фокусами: $|c_{-1}|^2 = |c_0|^2 = |c_1|^2 \approx 0,3$. Таким образом, если функция $\Phi[\xi]$ имеет вид (5), то 90 % энергии падающего пучка будет направлено МЗП (1) в три пучка с фокусами F_m , $m = -1, 0, 1$. Отметим, что за счёт выбора функции нелинейного преобразования $\Phi[\xi]$ можно обеспечить произвольное требуемое распределение энергии между заданным набором фокусов [1, 2].

Фазовые дифракционные элементы (ДОЭ) обычно рассчитываются на работу с излучением одной фиксированной длины волны. В то же время известны ДОЭ, формирующие заданные распределения интенсивности для нескольких длин волн (обычно для двух или трёх) [12–20]. Для однофокусной дифракционной линзы увеличение числа рабочих длин волн может быть достигнуто за счёт увеличения высоты дифракционного микрорельефа [19, 20]. В других случаях расчёт таких ДОЭ, как правило, основан на сложных итерационных оптимизационных процедурах. Уменьшение спектральной селективности оптического элемента также

может быть достигнуто за счёт использования комбинации двух дифракционных рельефов из различных материалов [21]. В этом случае возможно получение высокой энергетической эффективности дифракционной структуры в некотором спектральном диапазоне, однако угол дифракции остаётся зависящим от длины волны падающего излучения.

Первыми дифракционными элементами, предложенными для разделения излучения различных длин волн по различным порядкам дифракции, являются так называемые цветоделительные дифракционные решётки (ЦДР, англ. *color separation gratings*) [12, 16, 18]. ЦДР позволяют разделить три длины волны λ_{-1} , λ_0 и λ_{+1} , связанные соотношением

$$\lambda_{\pm 1} = \lambda_0 (N / (N \pm 1)), \quad (6)$$

где N – целое число между -1 -м, 0 -м и $+1$ -м порядками дифракции, то есть падающее излучение с длиной волны λ_0 направляется в 0 -й порядок дифракции, а излучение с длинами волн $\lambda_{\pm 1}$ направляется в ± 1 -е порядки соответственно. Для объяснения метода расчёта спектральных МЗП, предназначенных для формирования набора из нескольких фокусов для нескольких различных длин волн, рассмотрим сначала принцип работы ЦДР. Для заданных длин волн λ_0 , λ_{+1} , связанных формулой (6), ЦДР имеет на периоде N ступенек с равной шириной и следующими высотами [12]:

$$h_j = (\lambda_0 / (n - 1)) j, \quad j = \overline{0, N - 1}, \quad (7)$$

где n – показатель преломления решётки при длине волны λ_0 . Пренебрегая дисперсией материала решётки, соотношение между высотой микрорельефа решётки и фазовым набегом φ , формируемым при длине волны λ , можно записать как [12, 16]

$$\varphi(h_j; \lambda) = (2\pi/\lambda)(n - 1)h_j, \quad j = \overline{0, \dots, N - 1}. \quad (8)$$

Согласно (8), решётка, определённая выражением (7), формирует следующие фазовые набеги для падающих плоских волн с длинами волн λ_0 , $\lambda_{\pm 1}$:

$$\begin{aligned} \varphi(h_j; \lambda_0) &= 2\pi j, \\ \varphi(h_j; \lambda_{\pm 1}) &= 2\pi j (1 \pm (1/N)), \quad j = \overline{0, N - 1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку фаза определена с точностью до 2π , то фазовые набеги (9) можно переписать в виде

$$\varphi(h_j; \lambda_0) = 0, \quad \varphi(h_j; \lambda_{\pm 1}) = \pm (2\pi j/N), \quad j = \overline{0, N - 1}. \quad (10)$$

Согласно (10), фазовый набег для длины волны λ_0 равен нулю, то есть данная длина волны будет направлена в 0 -й порядок дифракции. Для длин волн $\lambda_{\pm 1}$ фазовые набеги в (10) соответствуют линейным фазовым функциям, квантованным на N уровней. Эти фазовые функции совпадают с фазовыми набегами, формируемыми квантованными дифракционными призмами, рассчитанными для каждой из этих длин волн и обеспечивающими отклонение падающего пучка на углы, соответствующие -1 -му (для длины волны λ_{-1}) или

+1-му (для длины волны λ_{+1}) порядкам дифракции решетки. Таким образом, представленный анализ подтверждает, что ЦДР, определяемая уравнением (7), разделяет три длины волны, связанные соотношением (6), между -1-м, 0-м и +1-м порядками дифракции.

Важно отметить, что ЦДР, определяемая уравнением (7), минимизирует следующую функцию:

$$F(h_1, \dots, h_N) = \sum_{l=-1}^1 \sum_{j=0}^{N-1} \left| \exp[i\varphi(h_j; \lambda_l)] - \exp\left(i l \frac{2\pi}{N} j \right) \right|^2, \quad (11)$$

где $\varphi(h_j; \lambda_l)$, $l=0, \pm 1$ – фазовые набег (10), формируемые ступеньками решетки. Функция (11) соответствует квадрату модуля разности между комплексными амплитудами пучков, формируемых решеткой на длинах волн λ_0 , $\lambda_{\pm 1}$, и функциями комплексного пропускания, обеспечивающими отклонение пучков в дифракционные порядки с номерами 0 и ± 1 . Полученное соотношение между функцией (11) и ЦДР, определяемой выражением (7), позволяет предположить, что аналогичная функция может быть использована как целевая функция для расчёта ДОО, формирующих требуемые распределения (требуемый набор фокусов) для нескольких различных длин волн. В общем случае эта целевая функция будет описывать разность между комплексными амплитудами пучков, формируемых элементом на расчётных длинах волн, и функциями комплексного пропускания, обеспечивающими формирование требуемых распределений на каждой из расчётных длин волн.

Рассмотрим в рамках данного подхода расчёт профиля спектральной многофокусной зонной пластинки (СМЗП), формирующей несколько заданных фокусов для нескольких произвольных длин волн λ_l , $l=1, \dots, L$, которые не обязаны быть связаны каким-либо аналитическим соотношением, аналогичным (6). В этом случае профиль СМЗП определяется из условия минимума функции, представляющей квадрат модуля разности между комплексными амплитудами

пучков, сформированных для расчётных длин волн λ_l , и функциями комплексного пропускания многофокусных линз $P_{mf}(\rho; \lambda_l) = \exp[i\varphi_{mf}(\rho; \lambda_l)]$, рассчитанных для этих длин волн. Предположим, что радиальный профиль СМЗП состоит из N ступенек с одинаковой шириной $\Delta = R/N$ и высотами h_j , $j = \overline{0, N-1}$. Обозначим $P_{smf}(h_j; \lambda_l) = \exp\{i(2\pi/\lambda_l)[n(\lambda_l)-1]h_j\}$ функции комплексного пропускания СМЗП для расчётной длины волны λ_l в точке $\rho_j = (j+0,5)\Delta$, где h_j – высота микрорельефа в этой точке, а $n(\lambda_l)$ – показатель преломления материала элемента. Тогда значения h_j могут быть найдены путём минимизации следующей целевой функции:

$$F(h_0, \dots, h_{N-1}) = \sum_{l=1}^L w_l \sum_{j=0}^{N-1} \left| P_{smf}(h_j; \lambda_l) - P_{mf}(\rho_j; \lambda_l) \right|^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

где w_l – веса ($w_l > 0$, $\sum_{l=1}^L w_l = 1$), описывающие требуемое распределение энергии для различных длин волн. Согласно (12), значения h_j могут быть найдены независимо друг от друга из условия

$$F_j(h_j) = \sum_{l=1}^L w_l \left| P_{smf}(h_j; \lambda_l) - P_{mf}(\rho_j; \lambda_l) \right|^2 \rightarrow \min. \quad (13)$$

При расчёте СМЗП нужно учитывать технологические ограничения на максимальную высоту микрорельефа h_{\max} и число уровней рельефа M . Предположим, что высоты h_j могут принимать одно из следующих M значений: $h_j \in \{0, h_{\max}(1/M), \dots, h_{\max}[1-1/M]\}$. В этом случае значения h_j , минимизирующие целевую функцию (13), могут быть найдены простым перебором:

$$h_j = h_{\max} \frac{m_j}{M}, \quad m_j = \arg \min_{m \in \{0, \dots, M-1\}} \left[\sum_{l=1}^L w_l \left| P_{smf}\left(h_{\max} \frac{m}{M}; \lambda_l\right) - P_{mf}(\rho_j; \lambda_l) \right|^2 \right]. \quad (14)$$

Таким образом, расчёт СМЗП выполняется на основе выражения (14). Для получения спектральной многофокусной зонной пластинки с тремя фиксированными фокусами F_m , $m = -1, 0, 1$, работающей на длинах волн λ_l , $l=1, \dots, L$, в качестве функций $P_{mf}(\rho; \lambda_l)$ в уравнении (14) должны быть использованы функции трёхфокусных зонных пластинок для каждой из заданных длин волн. Фазовые функции $\varphi_{mf}(\rho; \lambda_l)$ могут быть рассчитаны с использованием выражений (1) и (4) или (1) и (5) с фиксированным значением f_d .

2. Примеры расчёта

Для оценки эффективности предлагаемого подхода была рассчитана спектральная трёхфокусная зонная пластинка, профиль которой был определён из уравнений (1), (5), (14). При расчёте использовались

следующие параметры: $f_d = 350$ мм, радиус апертуры зонной пластинки $R = 2,5$ мм, максимальная высота микрорельефа $h_{\max} = 5,5$ мкм, число уровней квантования $M = 256$. Значения h_{\max} и M были выбраны в соответствии с технологическими возможностями станции лазерной записи CLWS-300 [22], которую планируется использовать для изготовления СМЗП.

В качестве расчётных длин волн были выбраны следующие три значения, соответствующие максимальной чувствительности трёх типов клеток-колбочек сетчатки: $\lambda_1 = 450$ нм (синий), $\lambda_2 = 540$ нм (зелёный) и $\lambda_3 = 580$ нм (жёлтый/красный). Соответствующие значения показателя преломления материала зонной пластинки были выбраны одинаковыми $n(\lambda_1) = n(\lambda_2) = n(\lambda_3) = 1,65$ (фоторезист). Рельеф $h_{SZP}(\rho)$ спектральной трёхфокусной зонной пластинки, рассчитанный на основе выражения (14),

показан на рис. 1. Следует отметить, что максимальная высота рельефа зонной пластинки примерно в 5 раз превышает высоту «обычного» дифракционного микрорельефа, рассчитанного на работу с одной длиной волны. Как правило, увеличение значения h_{\max} позволяет улучшить рабочие характеристики зонной пластинки, однако затрудняет её изготовление за счёт увеличения аспектного отношения (скважности).

Пусть спектральная многофокусная линза состоит из тонкой рефракционной линзы с фокусным расстоянием $f_0 = 50$ мм и рассчитанной СМЗП. При выбранных значениях f_0 и f_d элемент формирует следующие три фокуса в соответствии с выражением (2): $F_{-1} = 43,7$ мм, $F_0 = 50$ мм и $F_{+1} = 58,3$ мм.

Отметим, что положение центрального фокуса может быть изменено за счёт выбора фокусного расстояния рефракционной линзы f_0 , в то время как расстояние между соседними фокусами определяется значением f_d . Действительно, в соответствии с формулой (2), значения оптической силы порядков дифракции зонной пластинки составляют $P_0 = 0$,

$P_{\pm 1} = 1/f_d \approx \mp 2,9D$. Эти значения добавляются к оптической силе рефракционной линзы $P = 1/f_0 = 20D$, что соответствует формированию трёх фокусов.

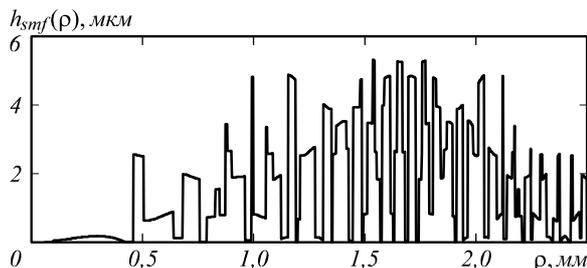


Рис. 1. Радиальный профиль $h_{smf}(\rho)$ микрорельефа спектральной трёхфокусной зонной пластинки, рассчитанной для трёх длин волн

Распределение интенсивности, формируемое спектральной многофокусной линзой, может быть рассчитано с помощью дифракционного интеграла Френеля – Кирхгофа [1]:

$$I(r, z; \lambda) = \left| \frac{2\pi}{\lambda z} \int_0^R A(\rho) P_{smf}(\rho; \lambda) P_{lens}(\rho; \lambda) \exp\left(i \frac{\pi \rho^2}{\lambda z}\right) J_0\left(\frac{2\pi r \rho}{\lambda z}\right) \rho d\rho \right|^2, \quad (15)$$

где z – координата вдоль оптической оси, r – радиальная координата в плоскости, перпендикулярной оптической оси, $A(\rho)$ – амплитуда падающего пучка, $P_{smf}(\rho; \lambda) = \exp\{i(2\pi/\lambda)[n(\lambda) - 1]h_{SZP}(\rho)\}$ – функция комплексного пропускания СМЗП, а $P_{lens}(\rho; \lambda) = \exp[-i\pi r^2/(\lambda f_0)]$ – функция комплексного пропускания тонкой рефракционной линзы с фокусным расстоянием f_0 .

Нормированные распределения интенсивности вдоль оптической оси (осевая функция рассеяния точки), формируемые спектральной трёхфокусной линзой для расчётных длин волн при $A(\rho) \equiv 1$, показаны на рис. 2а и демонстрируют хорошее качество формирования трёх фокусов. Положения фокусов практически неизменны для трёх расчётных длин волн.

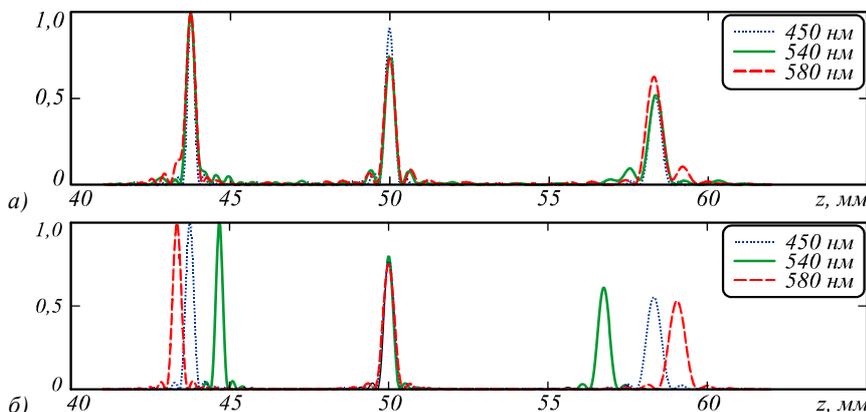


Рис. 2. Нормированные распределения интенсивности вдоль оптической оси, формируемые спектральной трёхфокусной зонной пластинкой, рассчитанной для трёх длин волн 450 нм, 540 нм и 580 нм (а), и обычной трёхфокусной линзой, рассчитанной для одной длины волны 540 нм (б)

Согласно формулам (12)–(14), спектральная трёхфокусная зонная пластинка аппроксимирует функции комплексного пропускания трёхфокусных зонных пластинок, определяемых выражениями (1) и (5) для расчётных длин волн. Отметим, что трёхфокусная зонная пластинка, определяемая выражениями (1) и (5), обеспечивает равномерное распределение энергии между фокусами на расчётной длине волны. Каждый из фокусов может быть охарактеризован ди-

фракционным размером пятна $\Delta(F_m, \lambda_i) = 1,22 \lambda_i F_m / R$ в плоскости, перпендикулярной оптической оси. При этом значения $|c_m|^2 = 0,3$, $m = 0, \pm 1$ определяют доли энергии, попадающие в дифракционные пятна с размерами $\Delta(F_m, \lambda_i)$ [1, 2]. Важно отметить, что интенсивности в максимумах обратно пропорциональны квадратам фокусных расстояний и квадратам длин волн, поэтому значения интенсивности в фокусах

связаны соотношением $I(0, F_m; \lambda_l) \sim 1/(\lambda_l F_m)^2$, в связи с чем интенсивность в максимуме достигает наибольшего значения для первого фокуса (фокуса F_{-1}) и далее уменьшается с ростом фокусного расстояния. Распределения интенсивности на рис. 2а нормированы на максимальное значение для каждой из длин волн λ_l , $l=1, 2, 3$. Таким образом, нормированные распределения достигают максимального (единичного) значения в первом фокусе (при $z = F_{-1} = 43,7$ мм) и некоторых меньших значений в фокусах F_0 и F_{+1} .

Для сравнения на рис. 2б показаны нормированные распределения интенсивности вдоль оптической оси, формируемые трёхфокусной зонной пластинкой, рассчитанной из выражений (1) и (5) для одной длины волны $\lambda_2 = 540$ нм. Из рисунка следует, что в этом случае положения дополнительных фокусов $F_{\pm 1}$ не сохраняются при изменении длины волны. Для длин волн $\lambda_1 = 450$ нм и $\lambda_3 = 580$ нм расстояние между фокусами F_{-1} составляет 1,3 мм, а между фокусами $F_{+1} - 2,3$ мм. При этом положение центрального фокуса F_0

совпадает для трёх длин волн, поскольку этот фокус формируется тонкой рефракционной линзой.

В качестве более сложного примера рассмотрим расчёт трёхфокусной зонной пластинки с фокусами фиксированного положения для следующих четырёх длин волн: $\lambda_1 = 450$ нм (синий), $\lambda_2 = 540$ нм (зелёный), $\lambda_3 = 580$ нм (жёлтый/красный), и $\lambda_4 = 640$ нм (жёлтый/красный) (рис. 3а). Нормированные распределения интенсивности вдоль оптической оси, формируемые этой спектральной трёхфокусной линзой, показаны на рис. 3б и демонстрируют хорошее качество формирования трёх фокусов для всех четырёх расчётных длин волн. Тем не менее, следует отметить, что при увеличении числа расчётных длин волн качество формируемых фокусов ухудшается, в частности, возрастает интенсивность в боковых лепестках и нарушается распределение энергии между фокусами. Эти эффекты могут быть скомпенсированы за счёт увеличения максимально допустимой высоты микро-рельефа. Однако, как было упомянуто выше, это делает изготовление такого дифракционного микро-рельефа более сложным.

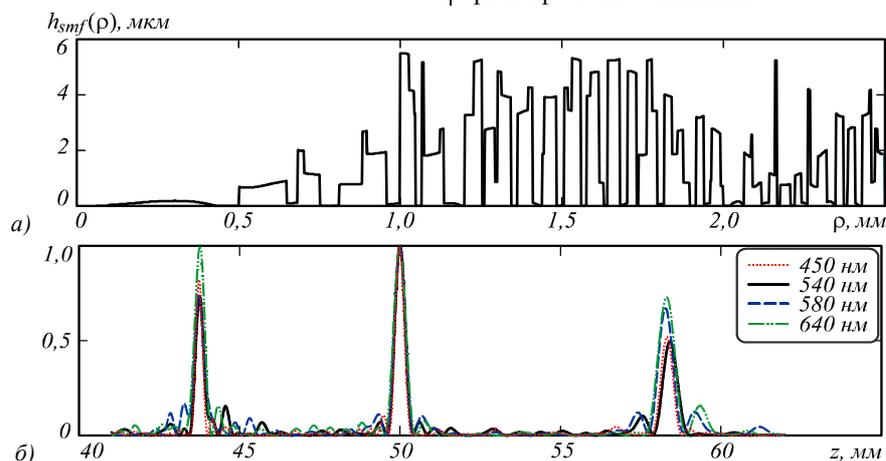


Рис. 3. Радиальный профиль $h_{smf}(\rho)$ микро-рельефа спектральной зонной пластинки, рассчитанной для четырёх длин волн 450 нм, 540 нм, 580 нм и 640 нм (а); нормированные распределения интенсивности вдоль оптической оси, сформированные спектральной зонной пластинкой для четырёх длин волн (б)

Заключение

Предложен метод расчёта дифракционных спектральных многофокусных линз, формирующих набор фокусов фиксированного положения для нескольких расчётных длин волн. Представленный метод основан на минимизации функции, представляющей квадрат модуля разности между комплексными амплитудами пучков, формируемых микро-рельефом спектральной линзы на расчётных длинах волн λ_l , $l=1, \dots, L$, и функциями комплексного пропускания «монохроматических» многофокусных дифракционных линз, рассчитанных для каждой из этих длин волн.

В качестве примеров были рассчитаны две спектральные трёхфокусные зонные пластинки с диаметром 5 мм и оптической силой трёх фокусов $P_{-1} = 3D$, $P_0 = 0$ и $P_{+1} = -3D$, работающие на трёх длинах волн (450 нм, 540 нм, 580 нм) и четырёх длинах волн (450 нм, 540 нм, 580 нм, 640 нм) соответственно. Ре-

зультаты численного моделирования трёхфокусных спектральных линз, соответствующих суперпозиции тонкой рефракционной линзы и рассчитанных спектральных зонных пластинок, подтверждают формирование трёх фокусов с фиксированными положениями на расчётных длинах волн. Полученные результаты могут найти применение при расчёте и создании новых многофокусных интраокулярных линз с уменьшенными хроматическими эффектами.

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00514) в части метода расчёта многофокусной спектральной линзы и при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части исследования рабочих характеристик рассмотренных примеров линз.

Литература

1. **Soifer, V.A.** Iterative methods for diffractive optical elements computation / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich. – London, Bristol: Taylor & Francis, 1997. – 244 p. – ISBN: 0-7484-0634-4.
2. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1245-1251. – DOI: 10.1080/713823549.
3. **Golub, M.A.** Laser beam splitting by diffractive optics / M.A. Golub // Optics and Photonics News. – 2004. – Vol. 15, Issue 2. – P. 36-41. – DOI: 10.1364/OPN.15.2.000036.
4. **Ravikumar, S.** Chromatic aberration and polychromatic image quality with diffractive multifocal intraocular lenses / S. Ravikumar, A. Bradley, L.N. Thibos // Journal of Cataract and Refractive Surgery. – 2014. – Vol. 40, Issue 7. – P. 1192-1204. – DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.11.035.
5. **Gatinel, D.** Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses / D. Gatinel, C. Pagnouille, Y. Houbrechts, L. Gobin // Journal of Cataract and Refractive Surgery. – 2011. – Vol. 37, Issue 11. – P. 2060-2067. – DOI: 10.1016/j.jcrs.2011.05.047.
6. **Akondi, V.** Temporal multiplexing to simulate multifocal intraocular lenses: theoretical considerations / V. Akondi, C. Dorransoro, E. Gamba, S. Marcos // Biomedical Optics Express. – 2017. – Vol. 8, Issue 7. – P. 3410-3425. – DOI: 10.1364/BOE.8.003410.
7. **Lane, S.S.** Multifocal intraocular lenses / S.S. Lane, M. Morris, L. Nordan, M. Packer, N. Tarantino, R.B. Wallace 3rd // Ophthalmology Clinics of North America. – 2006. – Vol. 19, Issue 1. – P. 89-105. – DOI: 10.1016/j.ohc.2005.09.002.
8. **Valle, P.J.** Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses / P.J. Valle, J.E. Oti, V.F. Canales, M.P. Cagigal // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, Issue 7. – P. 2782-2792. – DOI: 10.1364/OPEX.13.002782.
9. **Osipov, V.** Application of nanoimprinting technique for fabrication of trifocal diffractive lens with sine-like radial profile / V. Osipov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, T. Drew, K. Zhou, K. Sawalha, G. Swadener, J.S.W. Wolffsohn // Journal of Biomedical Optics. – 2015. – Vol. 20, Issue 2. – 025008. – DOI: 10.1117/1.JBO.20.2.025008.
10. **Hinze, U.** Additive manufacturing of a trifocal diffractive-refractive lens / U. Hinze, A. El-Tamer, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, S. Reiß, H. Stolz, R.F. Guthoff, O. Stachs, B. Chichkov // Optics Communications. – 2016. – Vol. 372. – P. 235-240. – DOI: 10.1016/j.optcom.2016.04.029.
11. **Kohnen, T.** First implantation of a diffractive quadrafocal (trifocal) intraocular lens / T. Kohnen // Journal of Cataract and Refractive Surgery. – 2015. – Vol. 41, Issue 10. – P. 2330-2332. – DOI: 10.1016/j.jcrs.2015.11.012.
12. **Dammann, H.** Color separation gratings / H. Dammann // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17, Issue 15. – P. 2273-2279. – DOI: 10.1364/AO.17.002273.
13. **Dong, B.-Z.** Diffractive phase elements that implement wavelength demultiplexing and spatial annular focusing simultaneously / B.-Z. Dong, G.-Z. Yang, B.-Y. Gu, G.-Q. Zhang // Journal of the Optical Society of America A. – 1997. – Vol. 14, Issue 1. – P. 44-48. – DOI: 10.1364/JOSAA.14.000044.
14. **Dong, B.-Z.** Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously / B.-Z. Dong, G.-Q. Zhang, G.-Z. Yang, B.-Y. Gu, S.-H. Zheng, D.-H. Li, Y.-S. Chen, X.-M. Cui, M.-L. Chen, H.-D. Liu // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35, Issue 35. – P. 6859-6864. – DOI: 10.1364/AO.35.006859.
15. **Bengtsson, J.** Kinoforms designed to produce different fan-out patterns for two wavelengths / J. Bengtsson // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37, Issue 11. – P. 2011-2020. – DOI: 10.1364/AO.37.002011.
16. **Doskolovich, L.L.** Design of DOEs for wavelength demultiplexing and spatial focusing / L.L. Doskolovich, P.M. Repetto // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2000. – Vol. 2, Issue 5. – P. 488-493. – DOI: 10.1088/1464-4258/2/5/323.
17. **Methods for computer design of diffractive optical elements / L.L. Doskolovich, D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, V.S. Solov'yev, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov; ed. by V.A. Soifer. – New York: Wiley, 2002. – 784 pp. – ISBN: 978-0-471-09533-0.**
18. **Doskolovich, L.L.** Design and investigation of color separation diffraction gratings / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, N. Heikkilä, S. Siitonen, J. Turunen // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, Issue 15. – P. 2825-2830. – DOI: 10.1364/AO.46.002825.
19. **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2469-2475. – DOI: 10.1364/AO.34.002469.
20. **Хонина, С.Н.** Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учётом дисперсии показателя преломления / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский, А.В. Устинов, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 338-347. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347.
21. **Грейсх, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсх, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, № 4. – С. 692-697.
22. **Gurenko, V.M.** Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on axisymmetric 3D surfaces / V.M. Gurenko, L.B. Kastorsky, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, V.M. Vedernikov, A.G. Verkhogliad // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4900. – P. 320-325. – DOI: 10.1117/12.484573.

Сведения об авторах

Досколович Леонид Леонидович в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 г.), профессор РАН, заведующий лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. Области научных интересов: дифракционная оптика, лазерные информационные технологии, нанофотоника. E-mail: leonid@smr.ru.

Безус Евгений Анатольевич в 2009 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика и информатика». Кандидат физико-математических наук (2012 г.), научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Области научных интересов: нанофотоника, плазмоника, электромагнитная теория дифракции.

E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Казанский Николай Львович в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 г.), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Заведующий базовой кафедрой высокопроизводительных вычислений Самарского университета в ИСОИ РАН. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 23 января 2018 г. Окончательный вариант – 9 февраля 2018 г.

MULTIFOCAL SPECTRAL DIFFRACTIVE LENS

L.L. Daskolovich^{1,2}, E.A. Bezus^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,
² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

We present a method for calculating a spectral multifocal diffractive lens that forms a given set of fixed-position foci at multiple operating wavelengths. It is based on minimizing a function represented as a squared absolute value of difference between the complex amplitudes of beams formed by the relief of a spectral lens at the given wavelengths and the complex transmission functions of multifocal lenses calculated for these wavelengths. As an example, we calculated zone plates that form three fixed foci at three and four operating wavelengths. The results obtained may find application in the development and creation of new multifocal contact and intraocular lenses with reduced chromatic aberrations.

Keywords: multifocal lens, diffractive lens, zone plate, diffractive optics.

Citation: Daskolovich LL, Bezus EA, Kazanskiy NL. Multifocal spectral diffractive lens. *Computer Optics* 2018; 42(2): 219-226. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-219-226.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under project no. 18-07-00514 (development of the method for designing multifocal spectral lenses) and the Federal Agency for Scientific Organizations under agreement no. 007-Г3/Ч3363/26) (investigation of the performance of the considered lens examples).

References

- [1] Soifer VA, Kotlyar VV, Daskolovich LL. Iterative methods for diffractive optical elements computation. London, Bristol: Taylor & Francis; 1997. ISBN: 0-7484-0634-4.
- [2] Golub MA, Daskolovich LL, Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Soifer VA. Computer generated diffractive multi-focal lens. *J Mod Opt* 1992; 39(6): 1245-1251. DOI: 10.1080/713823549.
- [3] Golub MA. Laser beam splitting by diffractive optics. *Opt Photon News* 2004; 15(2): 36-41. DOI: 10.1364/OPN.15.2.000036.
- [4] Ravikumar S, Bradley A, Thibos LN. Chromatic aberration and polychromatic image quality with diffractive multifocal intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2014; 40(7): 1192-1204. DOI: 10.1016/j.jcrs.2013.11.035.
- [5] Gatinel D, Pagnouille C, Houbrechts Y, Gobin L. Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 2011; 37(11): 2060-2067. DOI: 10.1016/j.jcrs.2011.05.047.
- [6] Akondi V, Dorronsoro C, Gamba E, Marcos S. Temporal multiplexing to simulate multifocal intraocular lenses: theoretical considerations. *Biomed Opt Express* 2017; 8(7): 3410-3425. DOI: 10.1364/BOE.8.003410.
- [7] Lane SS, Morris M, Nordan L, Packer M, Tarantino N, Wallace 3rd RB. Multifocal intraocular lenses. *Ophthalmol Clin N Am* 2006; 19(1): 89-105. DOI: 10.1016/j.ohc.2005.09.002.
- [8] Valle PJ, Oti JE, Canales VF, Cagigal MP. Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses. *Opt Express* 2005; 13(7): 2782-2792. DOI: 10.1364/OPEX.13.002782.

- [9] Osipov V, Doskolovich LL, Bezus EA, Drew T, Zhou K, Sawalha K, Swadener G, Wolffsohn JSW. Application of nanoimprinting technique for fabrication of trifocal diffractive lens with sine-like radial profile. *J Biomed Opt* 2015; 20(2): 025008. DOI: 10.1117/1.JBO.20.2.025008.
- [10] Hinze U, El-Tamer A, Doskolovich LL, Bezus EA, Reiß S, Stolz H, Guthoff RF, Stachs O, Chichkov B. Additive manufacturing of a trifocal diffractive-refractive lens. *Opt Commun* 2016; 372: 235-240. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.04.029.
- [11] Kohnen T. First implantation of a diffractive quadrafocal (trifocal) intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 2015; 41(10): 2330-2332. DOI: 10.1016/j.jcrs.2015.11.012.
- [12] Dammann H. Color separation gratings. *Appl Opt* 1978; 17(15): 2273-2279. DOI: 10.1364/AO.17.002273.
- [13] Dong B-Z, Yang G-Z, Gu B-Y, Zhang G-Q. Diffractive phase elements that implement wavelength demultiplexing and spatial annular focusing simultaneously. *JOSA A* 1997; 14(1): 44-48. DOI: 10.1364/JOSAA.14.000044.
- [14] Dong B-Z, Zhang G-Q, Yang G-Z, Gu B-Y, Zheng S-H, Li D-H, Chen Y-S, Cui X-M, Chen M-L, Liu H-D. Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously. *Appl Opt* 1996; 35(35): 6859-6864. DOI: 10.1364/AO.35.006859.
- [15] Bengtsson J. Kinoforms designed to produce different fan-out patterns for two wavelengths. *Appl Opt* 1998; 37(11): 2011-2020. DOI: 10.1364/AO.37.002011.
- [16] Doskolovich LL, Repetto PM. Design of DOEs for wavelength demultiplexing and spatial focusing. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2000; 2: 488-493. DOI: 10.1088/1464-4258/2/5/323.
- [17] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: Wiley; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [18] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Khonina SN, Skidanov RV, Heikkilä N, Siitonen S, Turunen J. Design and investigation of color separation diffraction gratings. *Appl Opt* 2007; 46(15): 2825-2830. DOI: 10.1364/AO.46.002825.
- [19] Sweeney DW, Sommargren GE. Harmonic diffractive lenses. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2469-2475. DOI: 10.1364/AO.34.002469.
- [20] Khonina SN, Volotovskiy SG, Ustinov AV, Kharitonov SI. Analysis of focusing light by a harmonic diffractive lens taking into account the refractive index dispersion. *Computer Optics* 2017; 41(3): 338-347. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347.
- [21] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA, Bezus EA, Bykov DA. Suppression of the spectral selectivity of two-layer phase-relief diffraction structures. *Opt Spectrosc* 2009; 106(4): 621-626. DOI: 10.1134/S0030400X09040249.
- [22] Gurenko VM, Kastorsky LB, Kiryanov VP, Kiryanov AV, Kokarev SA, Vedernikov VM, Verkhogliad AG. Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on axisymmetric 3D surfaces. *Proc SPIE* 2002; 4900: 320-325. DOI: 10.1117/12.484573.

Authors' information

Leonid Leonidovich Doskolovich graduated with honors (1989) from Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. Doctor in Physics and Mathematics (2001). Head of Diffractive Optics laboratory at the Image Processing Systems Institute (IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”), professor at Technical Cybernetics department of Samara University. His current research interests include diffractive optics, laser information technologies, and nanophotonics. E-mail: leonid@smr.ru.

Evgeni Anatolievich Bezus graduated with honors (2009) from Samara State Aerospace University (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. Candidate in Physics and Mathematics (2012). Researcher at the Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute (IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”) and an associate professor at Technical Cybernetics department of Samara University. His current research interests include nanophotonics, plasmonics, and electromagnetic diffraction theory. E-mail: evgeni.bezus@gmail.com.

Nikolay Lvovich Kazanskiy graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara University. He is the Head of the Image Processing Systems Institute (IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”), also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara University, holding the chair at the department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>.

E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

Received January 23, 2018. The final version – February 9, 2018.