

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИФРАКЦИОННОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ ЛИНЗОЙКазанский Н.Л.^{1,2}, Хонина С.Н.^{1,2}, Скиданов Р.В.^{1,2}, Морозов А.А.¹, Харитонов С.И.^{1,2}, Вологовский С.Г.¹¹Институт систем обработки изображений РАН,²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ)**Аннотация**

Рассматривается формирование изображений дифракционной линзой. Проведён аналитический и численный расчёт формирования изображений при освещении дифракционной линзы излучением с различными длинами волн в параксиальной и непараксиальной волновых моделях. Рассмотрены как многоуровневые, так и квантованные дифракционные линзы. Приводятся результаты вычислительного и натурального экспериментов.

Ключевые слова: дифракционная многоуровневая линза, формирование изображения в оптической системе, хроматическая аберрация.

Введение

Дифракционная линза имеет ряд преимуществ перед линзой рефракционной по таким параметрам, как масса, размер, простота тиражирования линзы для формирования несферического сходящегося волнового фронта. В связи с этим дифракционная линза интересна как оптический прибор для различных приложений. Большинство имеющихся работ, как правило, рассматривают дифракционную линзу либо как дополнительный элемент для компенсации хроматической аберрации рефракционной изображающей системы [1, 2], либо для фокусировки [1–11], например в [3, 4] рассматривается осевое распределение интенсивности для когерентного случая. В [5] рассматривается процесс фокусировки плоской волны на линзе Френеля. Много работ посвящено частным случаям использования дифракционных линз в узкоспециализированных задачах [6–11]. В частности, в работе [6] изучаются спектральные свойства дифракционной линзы. Синтез многофокусных дифракционных линз исследуется в работах [7, 8]. В статье [9] рассматривается возможность использования дифракционной линзы в конфокальном микроскопе. Новая модификация бинарной дифракционной линзы предлагается в [10]. В работе [11] рассматривается использование дифракционной линзы для формирования световых пучков.

Исследований применения дифракционной линзы для формирования изображений значительно меньше. При этом, как правило, основное внимание уделяется особенностям изготовления такой линзы [12–14], а не качеству формирования изображения. Кроме того, существенно ограничивается спектральный диапазон [14].

В настоящей работе рассматривается формирование изображений в некогерентном свете с помощью дифракционной линзы. В некогерентном случае объект во входной плоскости представляется как набор точечных источников, от которых в параксиальном случае распространяется параболическая волна, а в непараксиальном – сферическая.

1. Моделирование: непараксиальный случай

В этом случае от каждого точечного источника на объекте идёт сферическая волна до оптического элемента, расположенного на расстоянии z_1 от объекта:

$$S_{nm}(\xi, \eta, z_1) = A_{nm} \frac{\exp\left(ik\sqrt{(\xi - x_{nm})^2 + (\eta - y_{nm})^2 + z_1^2}\right)}{\sqrt{(\xi - x_{nm})^2 + (\eta - y_{nm})^2 + z_1^2}}, \quad (1)$$

где (x_{nm}, y_{nm}) – координаты (m, n) -го точечного источника в объектной плоскости, A_{nm} – соответствующая амплитуда.

Если оптический элемент является дифракционным, то его фаза рассчитывается с учётом базовой длины волны λ_0 . При освещении дифракционного оптического элемента (ДОЭ) излучением с длиной волны λ комплексная функция пропускания ДОЭ рассчитывается следующим образом:

$$T_\lambda(\xi, \eta) = A(\xi, \eta) \exp\left[i\frac{\lambda_0}{\lambda} \varphi(\xi, \eta)\right]. \quad (2)$$

Поле в плоскости изображения на расстоянии z_2 от оптического элемента вычисляется с помощью интегрального преобразования Рэлея–Зоммерфельда:

$$F_{nm}(u, v, z_2) = -\frac{iz_2}{\lambda} \iint_{\Omega} T_\lambda(\xi, \eta) S_{nm}(\xi, \eta) \times \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(\xi - u)^2 + (\eta - v)^2 + z_2^2}\right] \times \frac{d\xi d\eta}{\left[(\xi - u)^2 + (\eta - v)^2 + z_2^2\right]}, \quad (3)$$

где Ω – область определения поля в плоскости оптического элемента.

Интенсивность в плоскости изображения:

$$I(u, v, z_2) = \sum_{n,m} |F_{nm}(u, v, z_2)|^2. \quad (4)$$

Для выполнения расчётов по формуле (3) требуются довольно значительные вычислительные ресурсы, поэтому желательно использовать более простые модели расчёта (если позволяют характеристики оптической системы).

2. Моделирование: параксиальный случай

В этом случае можно считать, что от каждого точечного источника на объекте идёт параболическая волна до оптического элемента, расположенного на расстоянии z_1 от объекта:

$$P_{nm}(\xi, \eta, z_1) = \frac{A_{nm}}{z_1} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_1\right) \times \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z_1} \left[(\xi - x_{nm})^2 + (\eta - y_{nm})^2\right]\right\}. \quad (5)$$

Поле в плоскости изображения на расстоянии z_2 от оптического элемента вычисляется с помощью интегрального преобразования Френеля:

$$F_{nm}(u, v, z_2) = -\frac{i}{\lambda z_2} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_2\right) \times \iint_{\Omega} T_{\lambda}(\xi, \eta) \times P_{nm}(\xi, \eta, z_1) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_2} ((\xi - u)^2 + (\eta - v)^2)\right] d\xi d\eta. \quad (6)$$

Выражение (6) удобно как для теоретического анализа, так и в вычислительном плане, так как позволяет применить алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В частности, если подставить $P_{nm}(\xi, \eta, z_1)$, то получим:

$$F_{nm}(u, v, z_2) = -\frac{iA_{nm}}{\lambda z_1 z_2} \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} (z_1 + z_2)\right] \times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_1} (x_{nm}^2 + y_{nm}^2)\right] \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_2} (u^2 + v^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} T_{\lambda}(\xi, \eta) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda} (\xi^2 + \eta^2) \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\right\} \times \exp\left\{-\frac{i2\pi\xi}{\lambda} \left(\frac{x_{nm}}{z_1} + \frac{u}{z_2}\right)\right\} \times \exp\left\{-\frac{i2\pi\xi}{\lambda} \left(\frac{y_{nm}}{z_1} + \frac{v}{z_2}\right)\right\} d\xi d\eta. \quad (7)$$

В случае аналитического задания $T_{\lambda}(\xi, \eta)$ это выражение можно приближённо вычислить методом стационарной фазы [15]. Если же функция ДООЭ (2) представляет собой квантованный (дифракционный) аналог гладкой аналитической функции, то для вычисления интеграла (7) можно воспользоваться разложением в ряд Фурье, как показано ниже.

2.1. Квантованные ДООЭ

Запишем фазу тонкого (дифракционного) элемента в виде:

$$\varphi_t(\xi, \eta) = \text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta), \quad (8)$$

где $\varphi_t(\xi, \eta) \in [0, 2\pi]$.

Тогда квантованную фазу обозначим:

$$\varphi_q(\xi, \eta) = Q[\varphi_t(\xi, \eta)], \quad (9)$$

где преобразование Q такое, что $Q[0] = 0$, $Q[2\pi] = 2\pi$, причём монотонно возрастающее.

Комплексная функция пропускания оптического элемента в этом случае:

$$T_q(\xi, \eta) = \exp[i\varphi_q(\xi, \eta)] = \exp\{iQ[\text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta)]\} = \exp\{iQ[\text{mod}_{2\pi} \Phi]\}. \quad (10)$$

Функция Φ принимает любые значения, причём $\text{mod}_{2\pi} \Phi$ периодичен по 2π и также $Q[\text{mod}_{2\pi} \Phi]$ периодически по 2π . Следовательно, (10) можно разложить в ряд Фурье [16]:

$$T_q(\xi, \eta) = \exp\{iQ[\text{mod}_{2\pi} \Phi]\} = \sum_p c_p \exp[i\Phi p] = \sum_p c_p \exp[i\varphi(\xi, \eta) p], \quad (11)$$

$$c_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\{iQ[\text{mod}_{2\pi} \Phi]\} \exp[-i\Phi p] d\Phi. \quad (12)$$

После освещения ДООЭ (10) волной $A(\xi, \eta)$ поле на расстоянии z_2 от оптического элемента вычисляется с помощью интегрального преобразования Френеля (6):

$$F(u, v, z_2) = -\frac{i}{\lambda z_2} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_2\right) \times \iint_{\Omega} A(\xi, \eta) T_q(\xi, \eta) \times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_2} ((\xi - u)^2 + (\eta - v)^2)\right] d\xi d\eta. \quad (13)$$

С учётом (11) выражение принимает следующий вид:

$$F(u, v, z_2) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_2\right) \sum_p c_p G_p(u, v, z_2), \quad (14)$$

где $G_p(u, v, z_2) = -\frac{i}{\lambda z_2} \iint_{\Omega} A(\xi, \eta) \exp[i\varphi(\xi, \eta) p] \times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_2} ((\xi - u)^2 + (\eta - v)^2)\right] d\xi d\eta. \quad (15)$

Так как выражение (15) содержит под знаком интеграла гладкие аналитические функции, то его можно вычислить методом стационарной фазы.

Фаза быстроосциллирующей функции в (15) имеет следующий вид:

$$f_p(\xi, \eta) = \varphi(\xi, \eta) p + \frac{\pi}{\lambda z_2} [(\xi - u)^2 + (\eta - v)^2] = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \psi_p(\xi, \eta) + \frac{[(\xi - u)^2 + (\eta - v)^2]}{2z_2} \right\}, \quad (16)$$

где $\psi_p(\xi, \eta) = \frac{\varphi(\xi, \eta) \lambda p}{2\pi}$.

Определим стационарную точку:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_p(\xi, \eta)}{\partial \xi} = \frac{\partial \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \xi} + \frac{(\xi - u)}{z_2} = 0, \\ \frac{\partial f_p(\xi, \eta)}{\partial \eta} = \frac{\partial \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \eta} + \frac{(\eta - v)}{z_2} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Из (17) следует:

$$\begin{cases} u_p(\xi, \eta) = z_2 \frac{\partial \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \xi} + \xi, \\ v_p(\xi, \eta) = z_2 \frac{\partial \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \eta} + \eta. \end{cases} \quad (18)$$

Выражение (15) приближённо равно:

$$G_p(u, v, z_2) \approx -\frac{i}{z_2} \exp\left(\frac{i\pi}{4}\right) \times A(\xi_s, \eta_s) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} f_p(\xi_s, \eta_s)\right) \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} - \left(\frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta}\right)^2}} \Bigg|_{(\xi_s, \eta_s)}, \quad (19)$$

где (ξ_s, η_s) – стационарная точка из (17).

Используя (18), выразим знаменатель в (19) через координаты выходной плоскости.

Из (18) имеем следующее соотношение.

$$\begin{cases} \frac{\partial u_p(\xi, \eta)}{\partial \xi} = z_2 \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + 1, \\ \frac{\partial v_p(\xi, \eta)}{\partial \eta} = z_2 \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} + 1. \end{cases} \quad (20)$$

Тогда вторые производные в (19) с учётом (17) и (20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} &= \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{z_2} \frac{\partial u_p(\xi, \eta)}{\partial \xi}, \\ \frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} &= \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{z_2} \frac{\partial v_p(\xi, \eta)}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (21)$$

Соответственно, смешанные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} &= \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} = \frac{1}{z_2} \frac{\partial u_p(\xi, \eta)}{\partial \xi}, \\ \frac{\partial^2 f_p(\xi, \eta)}{\partial \eta \partial \xi} &= \frac{\partial^2 \psi_p(\xi, \eta)}{\partial \eta \partial \xi} = \frac{1}{z_2} \frac{\partial v_p(\xi, \eta)}{\partial \eta}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, выражение (19) принимает следующий вид:

$$G_p(u, v, z_2) \approx -i \exp\left(\frac{i\pi}{4}\right) \times A(\xi_s, \eta_s) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} f_p(\xi_s, \eta_s)\right) \times \frac{1}{\sqrt{\frac{\partial u_p(\xi, \eta)}{\partial \xi} \frac{\partial v_p(\xi, \eta)}{\partial \eta} - \left(\frac{\partial u_p(\xi, \eta)}{\partial \eta}\right)^2}} \Bigg|_{(\xi_s, \eta_s)}. \quad (23)$$

Интенсивность поля (14):

$$\begin{aligned} |F(u, v, z_2)|^2 &= \left| \sum_p c_p G_p(u, v, z_2) \right|^2 = \\ &= \sum_p |c_p|^2 |G_p(u, v, z_2)|^2 + \\ &+ \sum_{l,m} c_l c_m^* G_l(u, v, z_2) G_m^*(u, v, z_2). \end{aligned} \quad (24)$$

При освещении объекта частично-когерентным светом вклад перекрёстных членов в (24) будет мал, поэтому

$$|F(u, v, z_2)|^2 \approx \sum_p |c_p|^2 |G_p(u, v, z_2)|^2. \quad (25)$$

2.2. Освещение ДОО

монохроматическим излучением

Фазовый дифракционный оптический элемент, изготовленный в подложке с показателем преломления n для базовой длины волны λ_0 , имеет глубину микрорельефа, связанную с фазовой функцией (8):

$$h(\xi, \eta) = \frac{\lambda_0 \text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta)}{2\pi(n-1)} = \frac{\lambda_0 \varphi_t(\xi, \eta)}{2\pi(n-1)}. \quad (26)$$

При освещении такого элемента монохроматическим излучением с длиной волны λ фазовая функция прошедшего поля будет следующей:

$$\begin{aligned} \varphi(\xi, \eta, \lambda) &= \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) h(\xi, \eta) = \\ &= \frac{\lambda_0}{\lambda} \text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta). \end{aligned} \quad (27)$$

Для квантованного ДОО аналогично:

$$\varphi_q(\xi, \eta, \lambda) = \frac{\lambda_0}{\lambda} Q[\text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta)]. \quad (28)$$

В этом случае также комплексную функцию пропускания можно представить через ряд Фурье:

$$\begin{aligned} T_q(\xi, \eta, \lambda) &= \exp\left\{i\frac{\lambda_0}{\lambda} Q[\text{mod}_{2\pi} \varphi(\xi, \eta)]\right\} = \\ &= \sum_p c_p(\lambda) \exp[i\varphi(\xi, \eta) p]. \end{aligned} \quad (29)$$

Найдём коэффициенты разложения для фазовой функции $\Phi = \varphi(\xi, \eta)$:

$$c_p(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(i\frac{\lambda_0}{\lambda} \Phi\right) \exp(-ip\Phi) d\Phi, \quad (30)$$

$$\begin{aligned} c_p(\lambda) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[i\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - p\right)\Phi\right] d\Phi = \\ &= \exp\left[i\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - p\right)\right] \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - p\right)\right]}{\pi\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - p\right)}. \end{aligned} \quad (31)$$

Из (31) следует, что при освещении ДОО излучением с длиной волны, отличной от базовой, число дифракционных порядков будет зависеть от отношения длин волн.

В частности, пусть оптическим элементом служит параболическая линза с фокусным расстоянием f_0 :

$$\varphi(\xi, \eta) = -\frac{2\pi(\xi^2 + \eta^2)}{\lambda_0 2f_0}. \quad (32)$$

Тогда поле (6) примет следующий вид:

$$F_{nm}(u, v, z_2) = -\frac{i}{\lambda z_2} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_2\right) \times \sum_p c_p(\lambda) \iint_{\Omega} \exp\left[-i \frac{2\pi(\xi^2 + \eta^2)}{\lambda_0} p\right] \times P_{nm}(\xi, \eta, z_1) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_2} ((\xi - u)^2 + (\eta - v)^2)\right] d\xi d\eta. \tag{33}$$

Рассмотрим первую экспоненту под интегралом в (33):

$$\exp\left[-i \frac{2\pi(\xi^2 + \eta^2)}{\lambda_0} p\right] = \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(\xi^2 + \eta^2)}{2 f_0 / (\lambda p / \lambda_0)}\right]\right\}. \tag{34}$$

Из выражения (34) очевидно появление кратных фокусов

$$f_p = f_0 / (\lambda p / \lambda_0). \tag{35}$$

3. Результаты численного моделирования

Моделирование выполнялось как в рамках непараксиальной модели (3), так и параксиальной модели (6) на основе алгоритма БПФ.

При моделировании были использованы следующие параметры. Объект общим размером 50×50 мм имел характерные детали размером 16×16 мм. Для формирования изображения использовалась линза с фокусным расстоянием $f = 320$ мм и диаметром 5 мм, расположенная на расстоянии $z_1 = 50\,000$ мм от объекта.

Табл. 1. Сравнение моделирования формирования изображения в параксиальной и непараксиальной моделях для идеальной линзы на расстоянии 322 мм от линзы

	$\lambda_1 = 400$ нм	$\lambda_2 = 550$ нм	$\lambda_3 = 700$ нм	Суммарное
Непараксиальный расчёт				
Параксиальный расчёт (БПФ)				

Расчёт с использованием алгоритма БПФ по формуле (7), показанный во второй строке табл. 1, качественно совпадает с более точным расчётом, однако несоответствие геометрии изображения и дискретизации (необходимость выполнять интерполяцию) приводят к расплыванию формируемых изображений.

На рис. 2 и в табл. 2 показаны результаты моделирования построения цветных изображений для 256-уровневой дифракционной линзы, рассчитанной для базовой длины волны λ_2 .

Рассматривалось освещение лазерным излучением с тремя длинами волн: $\lambda_1 = 400$ нм, $\lambda_2 = 550$ нм и $\lambda_3 = 700$ нм. Базовой считалась средняя длина волны $\lambda_0 = \lambda_2$. Изображение рассчитывалось на различных расстояниях от линзы размером 0,5×0,5 мм.

На рис. 1 показан вид объекта и фаза линзы.

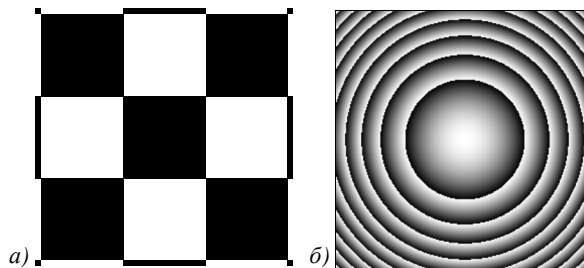


Рис. 1. Вид объекта 50×50 мм и фаза линзы диаметром 5 мм

3.1. Дифракционная многоуровневая линза

В табл. 1 показаны результаты моделирования для идеальной линзы (действует аналогично рефракционной).

В первой строке таблицы приведены результаты расчёта на основе выражения (3). Как видно из результатов табл. 1, в этом случае идеальная линза примерно одинаково хорошо изображает объект при освещении излучением с различными длинами волн. Некоторое различие в резкости связано с изменением функции рассеяния точки при изменении длины волны. Хроматическая aberrация, связанная с изменением показателя преломления материала, из которого изготовлена линза, в этом случае не учитывалась.

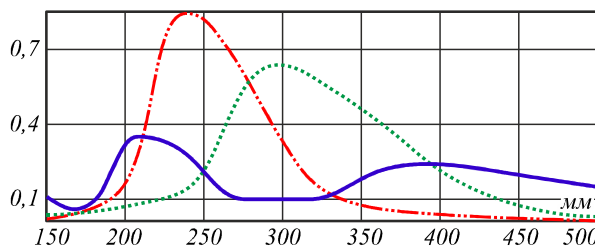


Рис. 2. Распределение интенсивности на оптической оси для многоуровневой дифракционной линзы (синий цвет для $\lambda_1 = 400$ нм, зелёный цвет для $\lambda_2 = 550$ нм, красный цвет для $\lambda_3 = 700$ нм)

Из рис. 2 хорошо видно смещение фокуса и появление дополнительных фокусов при изменении длины волны освещающего излучения по сравнению с базовой длиной волны, для которой изготавливается ДОО.

В соответствии с (35), фокусные расстояния вычисляются по формуле:

$$f_{\lambda,p} = f_0 \lambda_0 / (\lambda p). \tag{36}$$

Для рассматриваемых параметров расчёта фокусы: $f_{700,p} = 320 \text{ мм} \cdot 550 \text{ нм} / (p \cdot 700 \text{ нм}) \approx 250 \text{ мм}/p$,

$$f_{400,p} = 320 \text{ мм} \cdot 550 \text{ нм} / (p \cdot 400 \text{ нм}) \approx 440 \text{ мм}/p.$$

На рис. 2 хорошо виден смещённый фокус для красного излучения $f_{700,1} \approx 250 \text{ мм}$ и два фокуса для синего: $f_{400,1} \approx 440 \text{ мм}$, $f_{400,2} \approx 220 \text{ мм}$.

Табл. 2. Сравнение моделирования формирования изображения в параксиальной и непараксиальной моделях для многоуровневой дифракционной линзы на расстоянии 322 мм от линзы





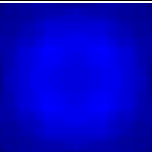
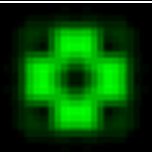
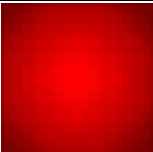
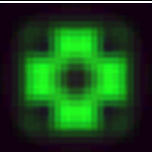

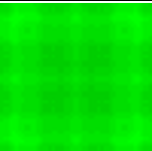
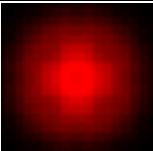
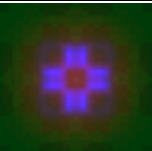
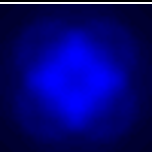
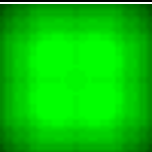
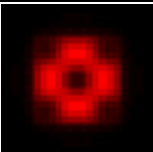
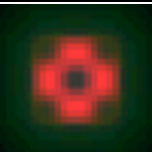
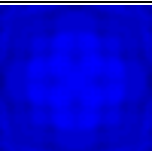
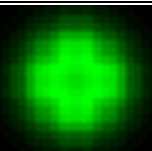
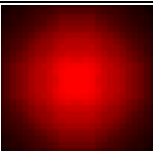
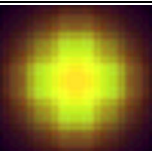
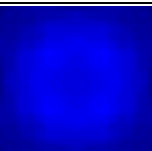
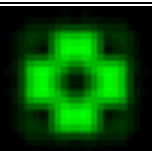
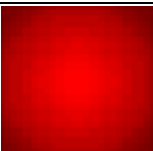
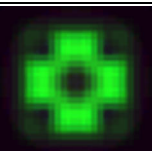
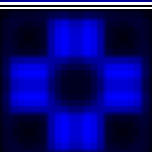
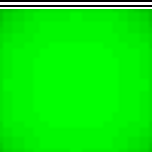
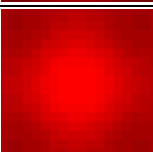
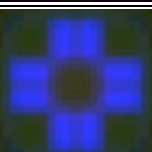
	$\lambda_1 = 400 \text{ нм}$	$\lambda_2 = 550 \text{ нм}$	$\lambda_3 = 700 \text{ нм}$	Суммарное
Непараксиальный расчёт				
Параксиальный расчёт (БПФ)				

Табл. 3. Моделирование формирования изображения на различных расстояниях от многоуровневой дифракционной линзы (расчёт на основе БПФ)

	$\lambda_1 = 400 \text{ нм}$	$\lambda_2 = 550 \text{ нм}$	$\lambda_3 = 700 \text{ нм}$	Суммарное
$z = 220 \text{ мм}$				
$z = 250 \text{ мм}$				
$z = 294 \text{ мм}$				
$z = 322 \text{ мм}$				
$z = 440 \text{ мм}$				

Из результатов табл. 2 следует, что дифракционная линза подвержена существенным хроматическим aberrациям. Учитывая качественное согласование результатов расчёта на основе алгоритма БПФ с более точной моделью при значительном сокращении времени расчёта, будем использовать этот алгоритм для предварительных оценок.

Ниже показан расчёт формирования изображения на различных расстояниях от линзы.

3.2. Квантованная линза

Изготовление многоуровневых дифракционных элементов довольно сложно. На практике чем меньше уровней квантования, тем проще технологический

процесс. Наиболее простыми в изготовлении являются бинарные элементы.

На рис. 3 показаны результаты моделирования для бинарной дифракционной линзы. Из рис. 3 видно, что расположение фокусов для различных длин волн осталось примерно таким же, как и для многоуровневой линзы, однако интенсивность в фокусах упала более, чем в 2 раза (теоретически остаётся 41,5 %). Это произошло из-за перераспределения энергии в дополнительные дифракционные порядки (локальные фокусы) [4].

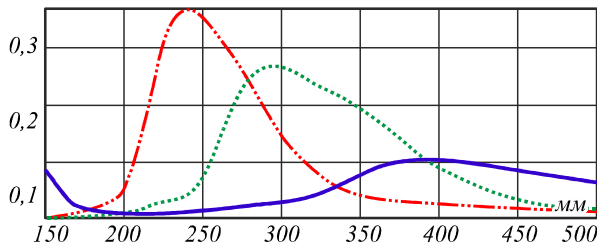


Рис. 3. Распределение интенсивности на оптической оси для бинарной дифракционной линзы (синий цвет для $\lambda_1=400$ нм, зелёный цвет для $\lambda_2=550$ нм, красный цвет для $\lambda_3=700$ нм)

4. Эксперимент

Для проведения экспериментов по формированию изображений дифракционными линзами было изготовлено методом фотолитографии несколько вариантов дифракционных линз. В частности, были изготовлены бинарные линзы с фокусным расстоянием 50 мм и четырёхуровневые линзы с фокусными расстояниями 16 мм, 50 мм, 160 мм, 320 мм. При этом для формирования четырёхуровневого микрорельефа осуществлялась последовательная запись трёх фотошаблонов на одной подложке с промежуточным плазмохимическим травлением [17–19]. Глубина сформированного микрорельефа менялась от 800 нм до 1000 нм, в зависимости от того, на какую основную длину волны рассчитана изготавливаемая линза.

На рис. 4 представлены восстановленная форма микрорельефа центральной области (рис. 4а) и сечение профиля одной из таких линз (рис. 4б).

Как видно из рис. 4, получившийся микрорельеф хорошего качества без сбоев и неоднородностей. Чтобы проверить работоспособность изготовленных линз, была собрана оптическая схема, представленная на рис. 5.

Для исследования хроматических aberrаций дифракционной линзы было использовано несколько специальных цветных таблиц, которые либо распечатывались на бумаге, либо непосредственно выводились на монитор компьютера (рис. 6). Затем в оптической схеме, представленной на рис. 5, осуществлялось формирование изображения, причём настройка на резкость осуществлялась по зелёному цвету.

Как видно из рис. 7, качество изображения весьма невысокое, т.к. в дополнение к хроматической aberrации такая линза обладает ещё и высоким коэффициентом светорассеивания. При использовании четырёхуровневой линзы качество изображения заметно меняется в лучшую сторону (рис. 8).

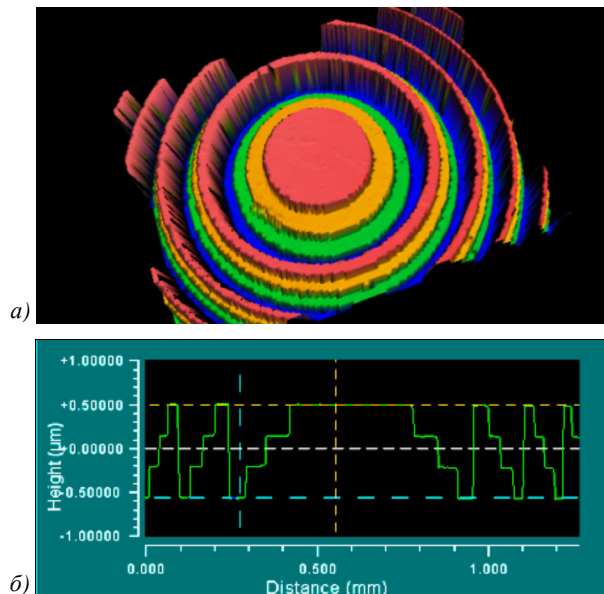


Рис. 4. Восстановленная форма микрорельефа центральной области (а) и сечение профиля одной из таких линз (б), полученные на интерферометре белого света New View Zygo 5000

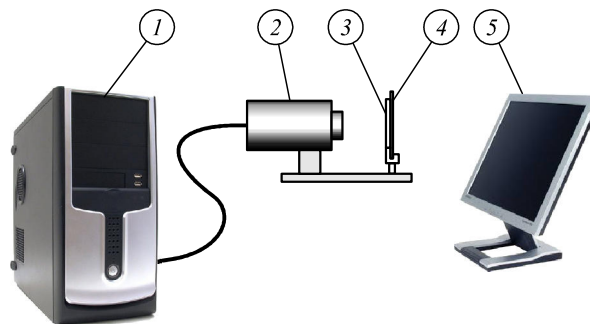


Рис. 5. Оптическая схема, позволяющая строить изображения с помощью дифракционных линз: 1 — компьютер, 2 — CCD-камера, 3 — диафрагма, 4 — дифракционная линза, 5 — монитор

На рис. 7 представлена картина, полученная с помощью бинарной дифракционной линзы.

Несмотря на несомненно высокую хроматическую aberrацию, качество изображения, получаемого на 4-уровневой линзе, существенно выше, чем у бинарной линзы. Ещё более качественным получается изображение при уменьшении спектрального диапазона для формируемого изображения. Так, на рис. 9 представлено изображение рабочего окна программы Windows Comander, снятое с экрана монитора дифракционной четырёхуровневой линзой с фокусным расстоянием 50 мм с расстояния в 1 м.

Как видно из рис. 9, качество полученного изображения близко к качеству изображения, которое получается при использовании хорошего рефракционного объектива. На рис. 10 приведены отдельно цветные квадраты для красного, синего и зелёного цветов.

Как видно из рис. 10, при чётком изображении одной из трёх цветовых компонент две другие существенно размываются.

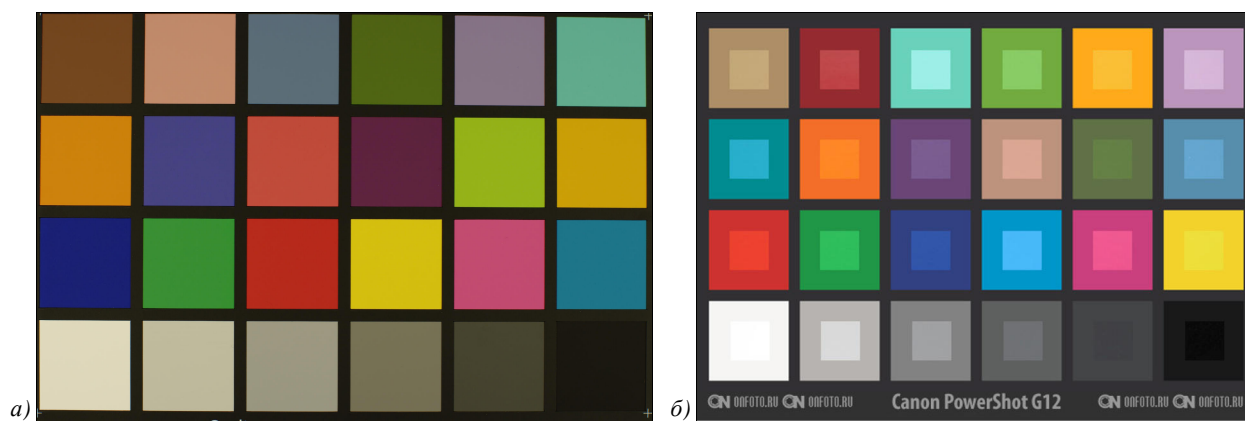


Рис. 6. Цветные таблицы для контроля хроматической аберрации дифракционной линзы

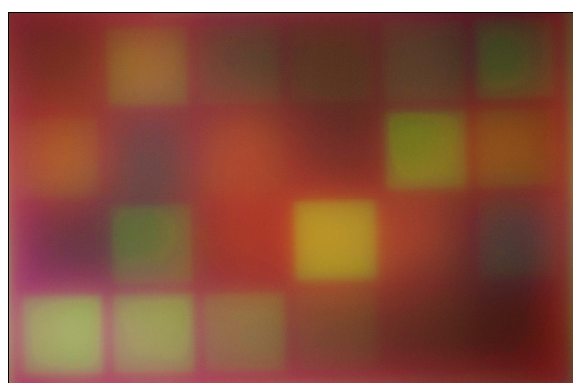
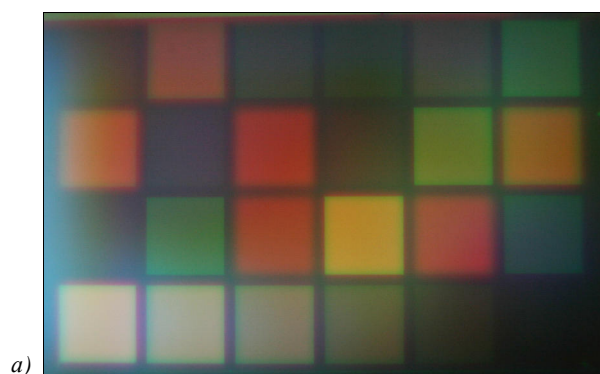
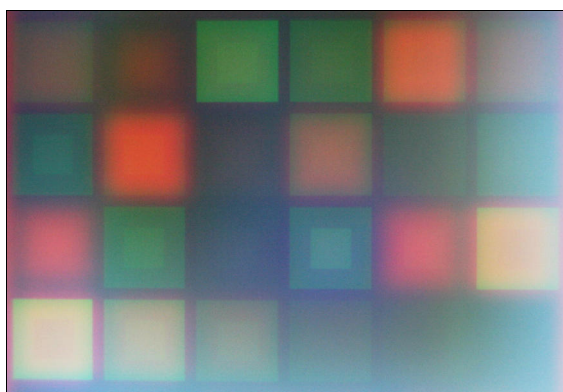


Рис. 7. Изображение, полученное с помощью бинарной дифракционной линзы



а)



б)

Рис. 8. Изображения цветных таблиц (рис. 6), полученные с помощью дифракционных четырёхуровневых линз

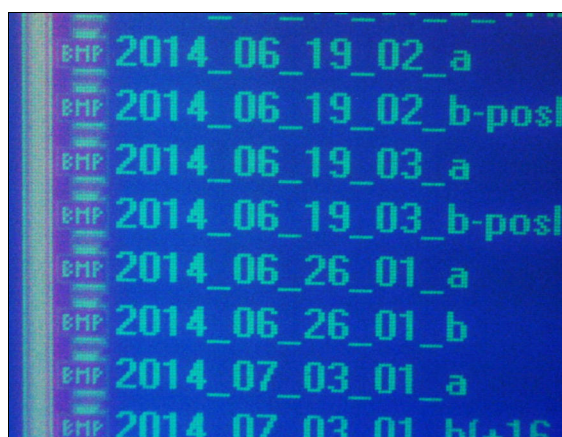


Рис. 9. Изображение рабочего окна программы Windows Commander, снятое с экрана монитора дифракционной четырёхуровневой линзой с фокусным расстоянием 50 мм с расстояния в 1 м

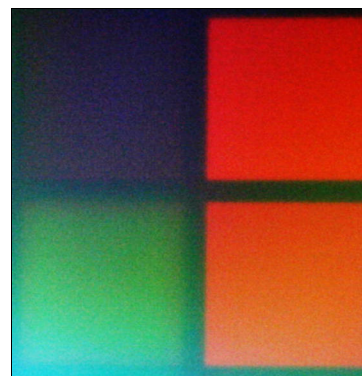


Рис. 10. Увеличенное изображение участка цветной таблицы

Заключение

Методом вычислительного и натурального экспериментов рассмотрено формирование цветных изображений с помощью дифракционных бинарных и четырёхуровневых линз. Теоретически и экспериментально показано, что:

- 1) изображения, полученные с помощью бинарной линзы, имеют качество совершенно недостаточное для формирования цветных изображений;

- 2) изображения, полученные с помощью четырёхуровневой линзы, формируют существенно более качественное изображение, однако качество сформированного изображения из-за сильного хроматизма также недостаточно для использования в изображающих системах, кроме случая построения изображения в узком спектральном диапазоне;
- 3) для работы с цветными изображениями необходимо использование квазидифракционных или гармонических линз [20–22].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и РФФИ (грант № 13-07-13166-офи_м_РЖД).

Литература

1. **Грейсух, Г.И.** Принципы построения проекционных и фокусирующих оптических систем с дифракционными элементами / Г.И. Грейсух, И.М. Ефименко, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 1987. – Т. 1. – С. 114-116.
2. **Greisukh, G.I.** Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics – 2001. – Vol. 40, Issue 16. – P. 2730-2735.
3. **Zapata-Rodriguez, C.J.** Axial behavior of diffractive lenses under Gaussian illumination: complex-argument spectral analysis / C.J. Zapata-Rodriguez, M. Martinez-Corral, P. Andres, A. Pons // Journal of the Optical Society of America A. – 1999. – Vol. 16, Issue 10. – P. 2532-2538.
4. **Хонина, С.Н.** Бинарная линза: Исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 339-346.
5. **Faklis, D.** Spectral properties of multiorde diffractive lenses / D. Faklis, G.M. Morris // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2462-2468.
6. **Казанский, Н.Л.** Вычислительный эксперимент с линзой Френеля / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1988. – Вып. 3. – С. 22-28.
7. **Kotlyar, V.V.** Diffraction computation of focusator into longitudinal segment and multifocal lens / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1780. – P. 263-272
8. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, Issue 11. – P. 3610-3615.
9. **Dobson, S.L.** Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S.L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, Issue 20. – P. 4744-4748.
10. **Mait, J.N.** Binary subwavelength diffractive-lens design / J.N. Mait, D.W. Prather, M.S. Mirotznik // Optics Letters. – 1998. – Vol. 23, Issue 17. – P. 1343-1345.
11. **Motogaito, A.** Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution / A. Motogaito, K. Hiramatsu // Optics and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3. – P. 67-73.
12. **Moreno, V.** High efficiency diffractive lenses: deduction of kinoform profile / V. Moreno, J.F. Roman, J.R. Salgueiro // American Journal of Physics. – 1997. – Vol. 65. – P. 556-562.
13. **Faklis, D.** Diffractive lenses in broadband optical system design / D. Faklis, G.M. Morris // Photonic Spectra. – 1991. – Vol. 25(12). – P. 131-134.
14. **Buralli, D.A.** Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // Applied Optics. – 1991. – Vol. 30. – P. 2151-2158.
15. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. – Изд. 2-е. — М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 713 с.
16. **Doskolovich, L.L.** A method for estimating the DOE's energy efficiency / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharonov, A.Ye. Tzaregorodtzev // Optics and Laser Technology. – 1995. – Vol. 27, Issue 4. – P. 219-221.
17. **Волков, А.В.** Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 127-130.
18. **Волков, А.В.** Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 130-133.
19. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики / Н.Л. Казанский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 54-62.
20. **Волков, А.В.** Экспериментальное исследование массопереноса в жидких фотополимеризующихся композициях / А.В. Волков, С.Г. Волоотовский, В.М. Гранчак, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер, В.С. Соловьёв, Д.М. Якуненкова // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, № 9. – С. 181-185.
21. **Волков, А.В.** Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОО / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенцев // Компьютерная оптика. – 1999. – № 19. – С. 137-142.
22. **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. – 1995. – V. 34, Issue 14. – P. 2469-2475.

References

1. **Greisukh, G.I.** Principles of construction of projection and focusing optical systems with diffractive elements / G.I. Greisukh, I.M. Efimenko, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 1987. – V. 1. – P. 114-116. – (In Russian)
2. **Greisukh, G.I.** Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2001. – Vol. 40, Issue 16. – P. 2730-2735.
3. **Zapata-Rodriguez, C.J.** Axial behavior of diffractive lenses under Gaussian illumination: complex-argument spectral analysis / C.J. Zapata-Rodriguez, M. Martinez-Corral, P. Andres, A. Pons // Journal of the Optical Society of America A. – 1999. – Vol. 16, Issue 10. – P. 2532-2538.
4. **Khonina, S.N.** Binary lens: investigation of local focuses / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, R.V. Skidanov // Computer Optics. – 2011. – Vol. 35, No. 3. – P. 339-346. – (In Russian).
5. **Faklis, D.** Spectral properties of multiorde diffractive lenses / D. Faklis, G.M. Morris // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2462-2468.
6. **Kazansky, N.L.** Computer experiment with a Fresnel lens / N.L. Kazansky // Computer Optics. – 1990. – Vol. 2, № 1. – P. 17-21.
7. **Kotlyar, V.V.** Diffraction computation of focusator into longitudinal segment and multifocal lens / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1780. – P. 263-272
8. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, Issue 11. – P. 3610-3615.
9. **Dobson, S.L.** Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S.L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36, Issue 20. – P. 4744-4748.
10. **Mait, J.N.** Binary subwavelength diffractive-lens design / J.N. Mait, D.W. Prather, M.S. Mirotznik // Optics Letters. – 1998. – Vol. 23, Issue 17. – P. 1343-1345.

11. **Motogaito, A.** Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution / A. Motogaito, K. Hiramatsu // *Optics and Photonics Journal*. – 2013. – Vol. 3. – P. 67-73.
12. **Moreno, V.** High efficiency diffractive lenses: deduction of kinoform profile / V. Moreno, J.F. Roman, J.R. Salgueiro // *American Journal of Physics*. – 1997. – Vol. 65. – P. 556-562.
13. **Faklis, D.** Diffractive lenses in broadband optical system design / D. Faklis, G.M. Morris // *Photonic Spectra*. – 1991. – Vol. 25(12). – P. 131-134.
14. **Buralli, D.A.** Design of diffractive singlets for monochromatic imaging / D.A. Buralli, G.M. Morris // *Applied Optics*. – 1991. – Vol. 30. – P. 2151-2158.
15. **Born, M.** Principles of optics / M. Born, E. Wolf. – Cambridge, University Press, 2003. – 753 p.
16. **Doskolovich, L.L.** A method for estimating the DOE's energy efficiency / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, A.Ye. Tzaregorodzev // *Optics and Laser Technology*. – 1995. – Vol. 27, Issue 4. – P. 219-221. – (In Russian).
17. **Volkov, A.V.** Study plasma etching technology for multilevel diffractive optical elements / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.E. Rybakov // *Computer Optics*. – 1998. – Vol. 18. – P. 127-130. – (In Russian).
18. **Volkov, A.V.** The development of technology for forming diffractive optical elements with sub-micron dimensions of the topography on the silicon wafer / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.E. Rybakov // *Computer Optics*. – 1998. – Vol. 18. – P. 130-133. – (In Russian).
19. **Kazanskiy, N.L.** Research & education center of diffractive optics // *Proceedings of SPIE*. – 2012. – Vol. 8410. – P. 84100R. – DOI: 10.1117/12.923233.
20. **Volkov, A.V.** Experimental study of mass transfer in liquid photopolymerizing compositions / A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy, V.M. Granchak, N.L. Kazanskiy, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer, V.S. Solovjev, D.M. Yakunenkov // *Technical Physics*. – 1995. – V. 65(9). – P. 181-185. – (In Russian).
21. **Volkov, A.V.** Experimental study of lighting devices with DOE / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, G.V. Usplenyev // *Computer Optics*. – 1999. – Vol. 19. – P. 137-142. – (In Russian).
22. **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // *Applied Optics*. – 1995. – V. 34, Issue 14. – P. 2469-2475.

FORMATION OF IMAGES USING MULTILEVEL DIFFRACTIVE LENS

N.L. Kazanskiy^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}, R.V. Skidanov^{1,2}, A.A. Morozov¹, S.I. Kharitonov^{1,2}, S.G. Volotovskiy¹

¹Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,

²Samara State Aerospace University

Abstract

We present the formation of images using multilevel diffractive lens. An analytical and numerical calculation are presented for the formation of images when diffractive lens illuminated by radiation at different wavelengths in the paraxial and nonparaxial wave models. Multilevel and quantized diffractive lenses are considered. We present computational and experimental results.

Key words: multilevel diffractive lens, the image formation optical system, chromatic aberration.

Сведения об авторах



Казанский Николай Львович, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает заместителем директора по научной работе и заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Руководитель научно-образовательного центра компьютерной оптики, созданного совместно ИСОИ РАН и СГАУ, заведующий базовой (СГАУ в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ *SPIE* и *IAPR*. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 240 статей, 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm>.

E-mail: kazansky@smr.ru.

Nikolay Lvovich Kazanskiy (b. 1958) graduated with honours (1981) from S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara State Aerospace University. He is the vice-director for research and the head of Diffractive Optics laboratory at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is the manager of the Research & Education Center of Computer Optics established jointly by SSAU and IPSI RAS, holding the chair of SSAU's base sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a SPIE- and IAPR-member. He is co-author of 240 scientific papers, 7 monographs, and 35 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Сведения об авторе **Хонина Светлана Николаевна** – см. стр. 411 этого номера.

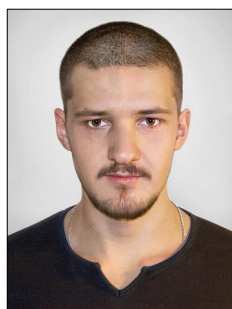


Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лабораторией микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 90 статей, 5 монографий.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies laboratory at the

Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 90 scientific papers, 5 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



Морозов Андрей Андреевич, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В списке научных работ А.А. Морозова 5 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: ragefalcon@mail.ru.

Andrey Andreevich Morozov (b. 1987). He received his bachelor of Applied Mathematics and Physics (2008) in SSAU. He received his master of Applied Mathematics and Physics (2010) in SSAU. He is co-author of 5 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.



Харитонов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры технической кибернетики, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонова 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: prognoz2007@gmail.com.

Sergey Ivanovich Kharitonov, Senior Researcher of Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from the Physics department of Samara State University. 1993 – defended his dissertation "Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation Focuser". 2010 – defended his doctoral thesis on "Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements". Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. The list of scientific papers S.I. Kharitonov's 87 articles, 5 patents.



Волотовский Сергей Геннадьевич, 1959 года рождения, в 1984 году окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва (КуАИ) по специальности «Прикладная математика», работает ведущим программистом в Учреждении Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: разработка программного обеспечения расчёта и моделирования работы элементов дифракционной оптики.

E-mail: sv@smr.ru.

Sergey Gennadjevich Volotovskiy (b. 1959) graduated from Kuibyshev Aviation Institute named after academician S.P. Korolyov (KuAI) on a specialty "Applied Mathematics", works as the leading programmer in the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: software design, modeling of systems with diffractive optical elements.

Поступила в редакцию 1 июня 2014 г.