

## 27. Изображающие системы на основе неизображающих обобщенных линз

В. С. Васильев<sup>1</sup>, Р. В. Скиданов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

Рассматривается возможность использования системы из 4-х неизображающих обобщённых линз в объективе. Для получения узкой функции рассеяния точки фазовая функция четвертой линзы рассчитывается так, чтобы на выходе системы также бы формировалась идеальная сферическая волна. Показано, что у такой системы функция рассеяния точки, рассчитанная геометрическим методом, по ширине меньше пятна Эйри.

*Ключевые слова:* Обобщённая гармоническая линза, Оптическая система, Фазовая функция обобщённой гармонической линзы, ФРТ.

*Цитирование:* **Васильев, В. С.** Изображающие системы на основе неизображающих обобщенных линз / В. С. Васильев, Р. В. Скиданов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 144–147.

### Введение

Оптические изображающие системы на основе асферических линз намного компактнее и проще в конструкции чем системы на основе сферических линз, поскольку содержат намного меньше элементов [1]. Однако технологии их изготовления намного сложнее технологий изготовления сферических линз, поэтому широкое использование асферических линз в массово выпускаемых изображающих системах началось относительно недавно (последние 20 лет).

В настоящий момент времени схема использования асферических линз в изображающих оптических системах довольно стандартная. В нашем же случае в объективе группа сферических линз заменяется на один асферический элемент, который проводит исправление волнового фронта, формируя практически идеальный гомоцентрический пучок. При этом, обычно используется что-то из стандартного набора асферических линз [1]. Однако под асферической линзой можно понимать гораздо более широкий класс элементов, в том числе и осесимметричные элементы свободной формы. Одним из таких элементов является обобщенная линза [2–4], однако, как следует из этих работ получение изображения с помощью одиночной обобщенной линзы практически невозможно.

Однако и изображение, получаемое с помощью одиночной сферической линзы также не очень высокого качества, хотя система из таких линз дает изображение вполне приемлемого качества. Так же и в системе из нескольких обобщенных линз. Если в такой оптической системе несколько элементов, то всегда можно подобрать фазовые функции нескольких эле-

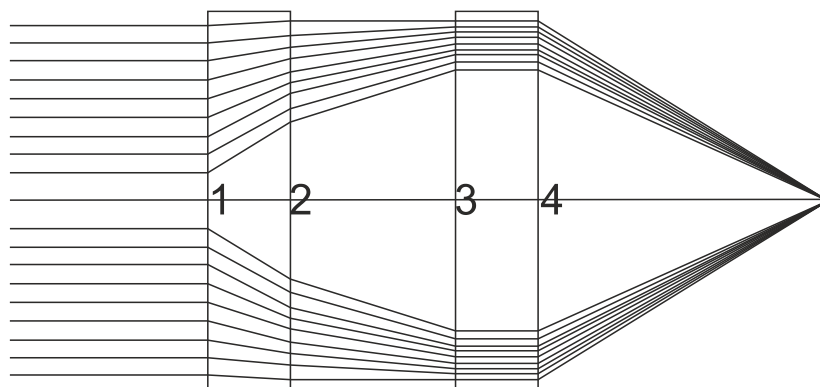


Рис. 1. Трассировка лучей через четыре гармонические обобщенные линзы

ментов таким образом, чтобы на выходе оптической системы был сформирован гомоцентрический пучок. В настоящее время развитие технологий формирования микрорельефов с высотой существенно больше микрометра, дает возможность изготовления дифракционных [5, 6] или гармонических линз [7], аппроксимирующих любую асферическую поверхность [8]. Конечно, в этом случае необходимо компенсировать хроматические искажения [8,9], но с увеличением высоты рельефа они быстро уменьшаются [7].

Использование асферических линз со свободной формой поверхности дает дополнительную степень свободы при проектировании многолинзовых объективов.

В настоящей работе будет рассмотрена система, в которой за счет использования системы обобщенных линз на выходном зрачке формируется гомоцентрический пучок с практически кольцевым распределением интенсивности, что дает эффект сопоставимый с эффектом от аподизирующего фильтра [10], но без потери светосилы. Это дает возможность уменьшить размер центрального пятна в картине Эйри.

### 1. Оптическая схема

В данной работе будем рассматривать обобщенную параболическую линзу как оптический элемент, функция пропускания которого выражается формулой:

$$T(r) = -\exp(-iCr^m), \quad (1)$$

где  $C$  — масштабный множитель,  $m$  — степень обобщенной линзы,  $r$  — координата радиус-вектора линзы. Надо понимать, что такая линза, за исключением случая  $m = 2$ , не будет изображающей, но есть возможность получения четкого изображения в системе из нескольких линз. Для этого надо подобрать такой фазовую функцию второй линзы, которая полностью компенсирует негомоцентричность пучка, сформированного первой линзой. Будем называть обобщенной линзой линзу с функцией пропускания

$$T(r) = -\exp[i\Phi(r)], \quad (2)$$

где  $\Phi(r)$  — произвольная функция.

На рисунке 1 показана схема работы такой системы.

Система сформирована на двух подложках. На первой подложке находятся две обобщенные линзы с  $m = 0,24$  и  $m = 0,57$ . На второй подложке две корректирующие линзы.

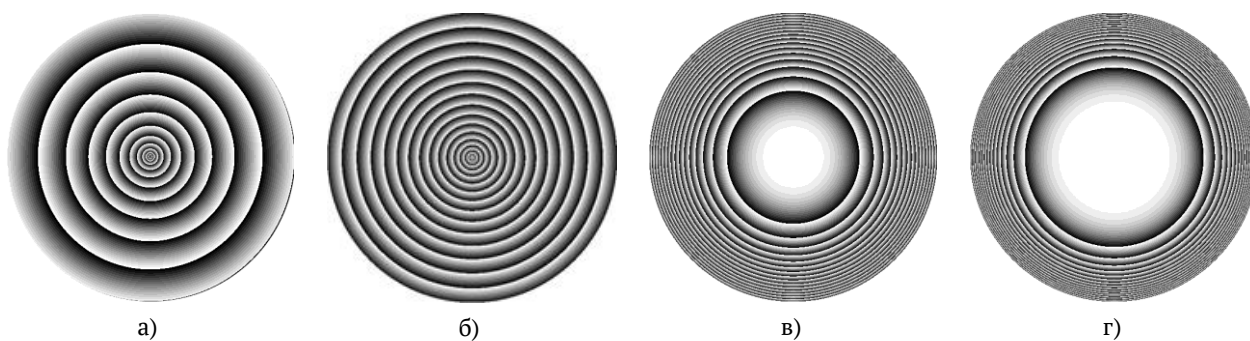


Рис. 2. Фазовые функции для линз 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

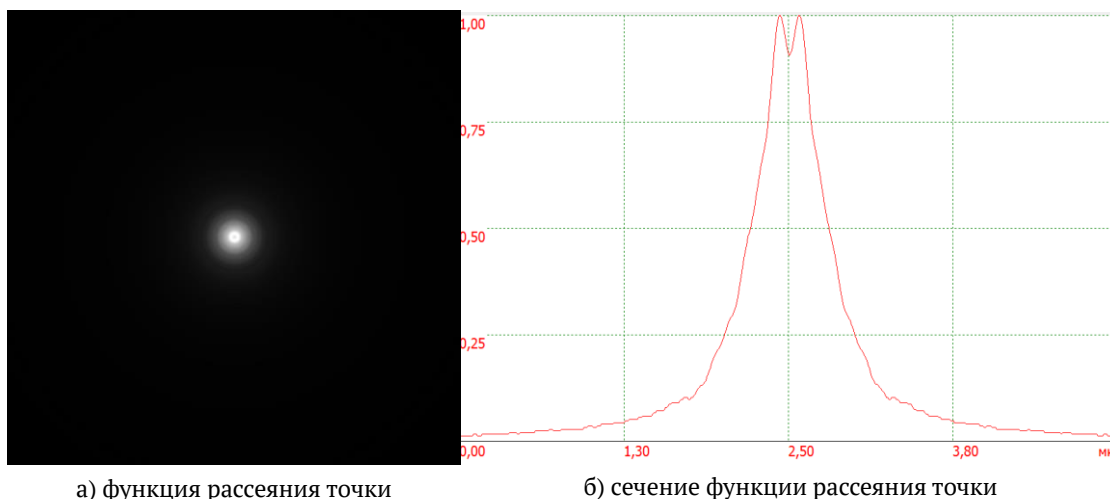


Рис. 3. Распределение интенсивности в плоскости фокусировки (функция рассеяния точки)

Линза номер 3 формирует параллельный пучок лучей, линза номер 4 формирует гомоцентрический пучок, сходящийся в одну точку на расстоянии 4 мм от последней поверхности системы. Диаметр всех линз одинаковый и равен 5 мм.

## 2. Результаты моделирования

Моделирование системы осуществлялось для монохроматического света с длиной волны 532 нм. Т. е. в настоящей работе не рассматривались эффекты, связанные с хроматической aberrацией, вызванной как наличием нескольких гармоник для линз с малой высотой рельефа, так и дисперсией материала. Это тема для дальнейших исследований. В результате моделирования для монохроматического света получена функция рассеяния точки, которая представлена на рисунке 3а. На рисунке 3б представлено сечение функции рассеяния точки.

Как видно из рисунка 3 функция рассеяния точки имеет ширину по полувысоте 0,6 мкм, что немного меньше дифракционного предела. При этом сам дифракционный предел для такой системы с фактически кольцевым выходным зрачком немного меньше, чем для систем с круглым выходным зрачком.

### Заключение

Главный вывод этой работы состоит в том, что при использовании системы неизображающих линз, которые не могут в одиночку формировать изображения в специально сконфигурированной системе из нескольких таких линз, изображение может быть построено. При этом характеристики получившегося объектива дают возможность говорить о дифракционно-ограниченной системе.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6., а также при поддержке ведущей научной школы НШ-6307.2018.8.

### Список источников

- [1] Хонина, С. Н. Фраксикон — дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С. Н. Хонина, С. Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. — 2009. — Том 33. — № 4. — С. 401–411.
- [2] Хонина, С. Н. Линзакон: непараксиальные эффекты / С. Н. Хонина, Н. Л. Казанский, А. В. Устинов, С. Г. Волоотовский // Оптический журнал. — 2011. — Том 78. — № 11. — С. 44–51.
- [3] Устинов, А. В. Обобщённая линза: анализ осевого и поперечного распределения / А. В. Устинов, С. Н. Хонина // Компьютерная оптика. — 2013. — Том 37. — № 3. — С. 305–315.
- [4] Грейсхух, Г. И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г. И. Грейсхух, Е. Г. Ежов, С. А. Степенев // Компьютерная оптика. — 2005. — Том 28. — № 1. — С. 60–66.
- [5] Казанский, Н. Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н. Л. Казанский, С. Н. Хонина, Р. В. Скиданов, А. А. Морозов, С. И. Харитонов, С. Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. — 2014. — Том 38. — № 3. — С. 425–434.
- [6] Sweeney, D. W. Harmonic diffractive lenses / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2475.
- [7] Хонина, С. Н. Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, Р. В. Скиданов, А. А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2015. — Том 39. — № 3. — С. 363–369.
- [8] Карпеев, С. В. Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С. В. Карпеев, С. В. Алфёров, С. Н. Хонина, С. И. Кудряшов // Компьютерная оптика. — 2014. — Том 38. — № 4. — С. 689–694.
- [9] Хонина, С. Н., Волоотовский С. Г. Минимизация размера светового или теневого фокального пятна с контролируемым ростом боковых лепестков в фокусирующих системах с высокой числовой апертурой / С. Г. Волоотовский, С. Н. Хонина // Компьютерная оптика. — 2011. — Том 35. — № 4. — С. 438–451.