

## Системы обобщенных гармонических линз для формирования изображений

*Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, В. С. Васильев*

- Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия

- Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,  
Самара, Россия

Рассматриваются системы из неизображающих обобщённых линз в объективе. Для получения узкой функции рассеяния точки фазовая функция одной из линз рассчитывается таким образом, чтобы в фокальной плоскости объектива формировалась световое пятно минимальной ширины. Показано, что такой системы функция рассеяния точки, рассчитанная геометрическим методом по ширине менее пятна Эйри на оптической оси и сопоставима с пятном Эйри во внеосевой области.

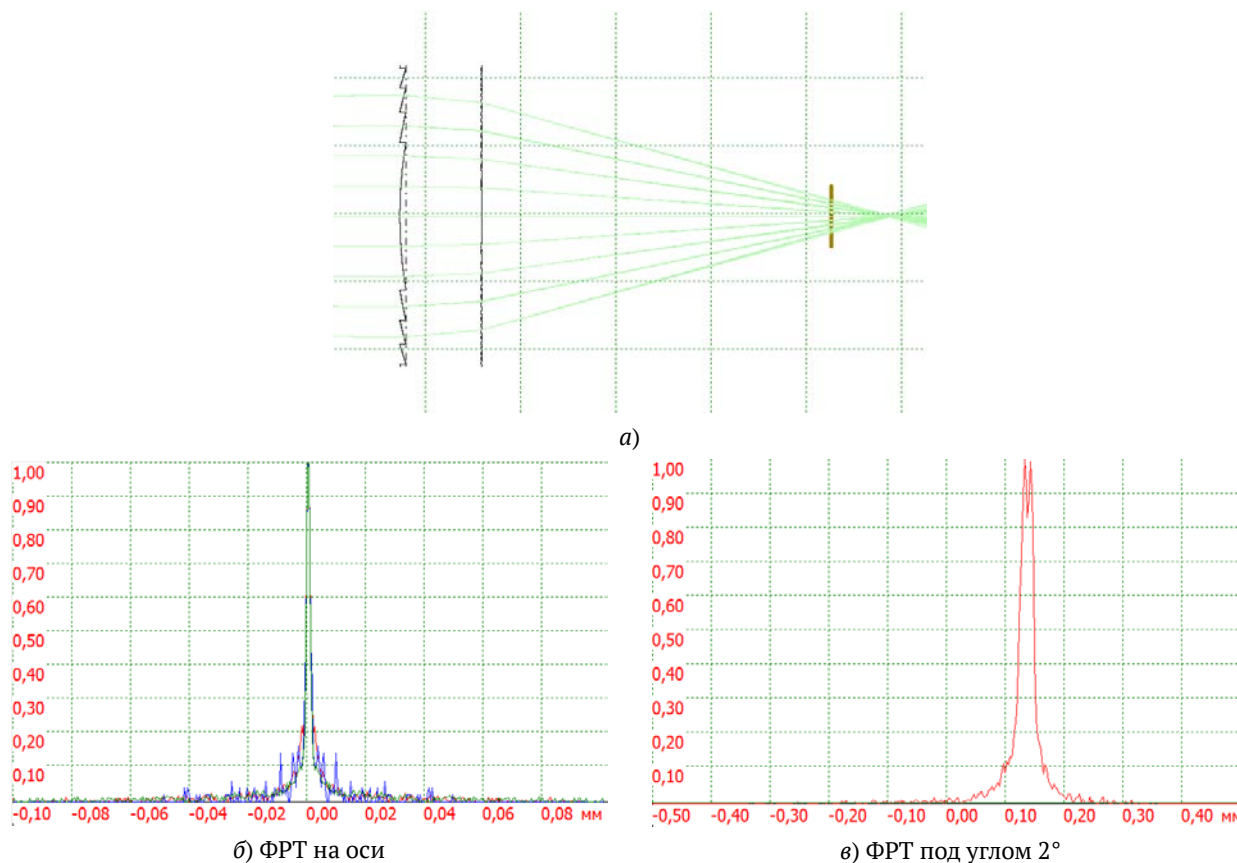
*Ключевые слова:* обобщённая гармоническая линза, объектив, фазовая функция, функция рассеяния точки.

*Цитирование:* Скиданов, Р. В. Системы обобщенных гармонических линз для формирования изображений / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, В. С. Васильев // НОЛОEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 53–57.

### Введение

Развитие технологии изготовления многоуровневых микрорельефов дало возможность реализовать дифракционные линзы для систем формирования изображений [1, 2]. Изображающие системы на их основе очень удобны для практического использования, они обладают существенно меньшей массой и компактнее систем на основе рефракционных линз. Высокий хроматизм дифракционных линз [1, 2], возможно компенсировать путем использования, так называемых гармонических линз [3–5]. Однако, качество изображений, формируемых такими линзами, плохое в сравнении с качеством в современных объективах и для компенсации хроматических искажений необходимо использование дополнительной цифровой обработки [6]. При этом сами дифракционные или гармонические линзы аппроксимируют своим рельефом, как правило, либо сферическую, либо параболическую линзу [3–5]. Эти типы линз позволяют формировать пучки близкие к гомоцентрическим. При этом использование дифракционных или гармонических линз в составе многолинзового объектива рассматривается только в одном качестве, в виде компенсатора хроматических aberrаций [7–9]. Однако, в отличие от рефракционных линз, дифракционные и гармонические линзы, аппроксимирующие существенно асферические поверхности по трудоемкости изготовления ничем не отличаются от дифракционных и гармонических линз, аппроксимирующих сферические линзы.

Одним из таких элементов является обобщенная линза [10, 11], однако как следует из этих работ получение изображения с помощью одиночной обобщенной линзы практически невозможно. Однако, в системе из нескольких обобщенных линз всегда можно подобрать фазовые



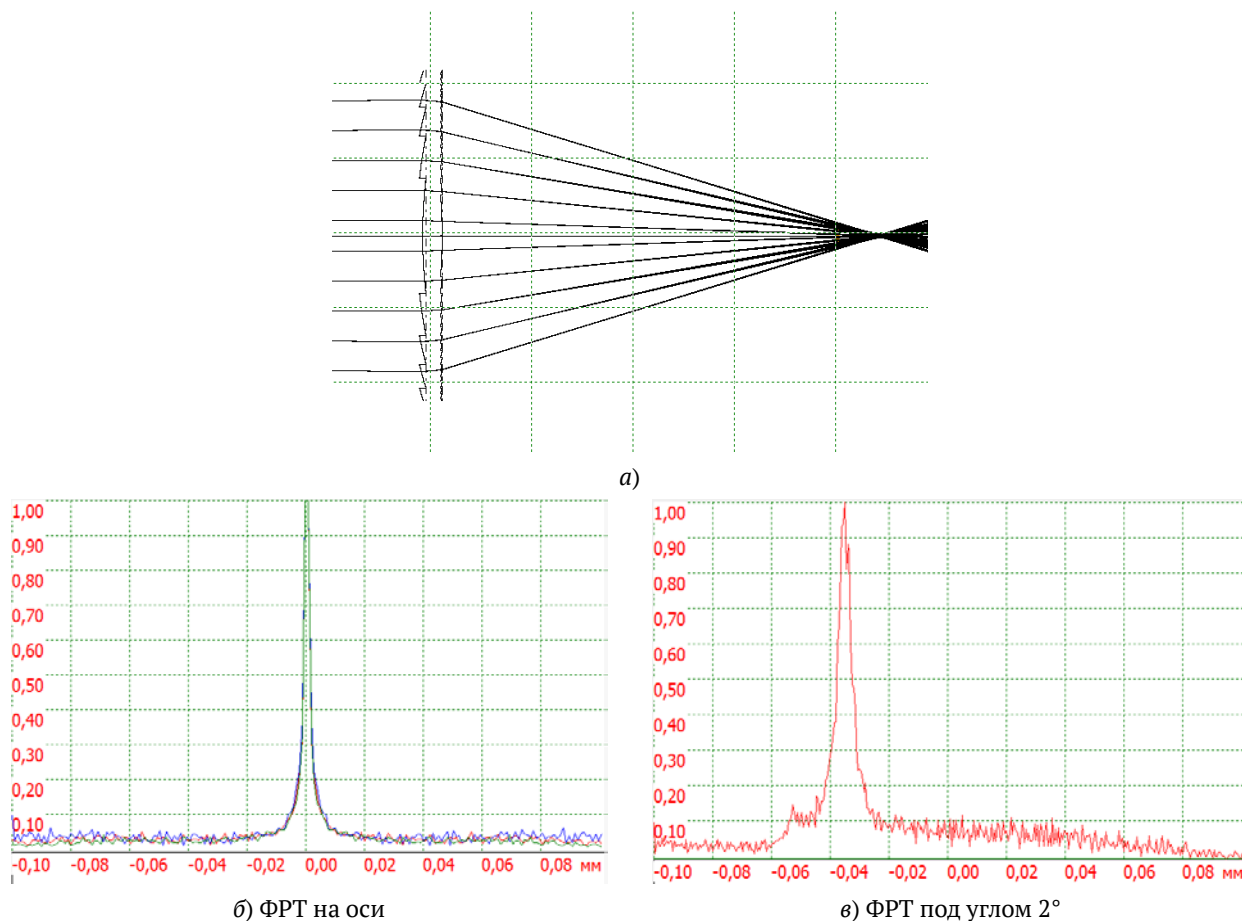
**Рис. 1.** Трассировка осевой плоской волны через систему из гармонической и дифракционной линз диаметром 20 мм, на подложке толщиной 4 мм (высоты рельефа для иллюстративности увеличены в 100 раз)

функции нескольких элементов 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 [12, 13] или гармонических линз [14] аппроксимирующих любую асферическую поверхность [8]. Конечно, в этом случае необходимо компенсировать хроматические искажения [8, 9], но с увеличением высоты рельефа они быстро уменьшаются [9].

Использование гармонических асферических линз со свободной формой поверхности дает множество степеней свободы при проектировании многолинзовых объективов. При проектировании появляется возможность формировать пучки любой сложной формы, кроме этого, существенно плотнее друг к другу можно располагать гармонические поверхности.

### 1. Системы гармонических линз

При высоте микрорельефа более 20 мкм дифракционный хроматизм гармонической линзы становится меньше классического хроматизма, связанного с дисперсией показателя преломления материала. Следовательно, при достаточно высоком микрорельефе в 30–40 мкм можно рассматривать систему сочетающую, например, гармоническую линзу и дифракционную для компенсации классического хроматизма (рис. 1а). На рис. 1б представлено сечение функции рассеяния точки (ФРТ) для системы из этих двух линз в белом свете. Высота микрорельефа



**Рис. 2.** Трассировка осевой плоской волны через оптимизированную систему из гармонической и дифракционной линз диаметром 20 мм, на подложке толщиной 4 мм (высоты рельефа для иллюстративности увеличены в 100 раз)

гармонической линзы составляла 30 мкм, диаметр обеих линз 20 мм, совокупное фокусное расстояние системы 30 мм. Оптическая сила дифракционной линзы была рассчитана по методике, описанной в [15], так чтобы компенсировать хроматизм гармонической линзы, вызванный дисперсией показателя преломления материала.

Как видно из рис. 1 ширина ФРТ на оси составляет около 1 мкм. При угле всего в 2° ситуация сильно меняется, ширина ФРТ, составляет уже около 25 мкм. Однако полученный результат характерен для двух неоптимизированных поверхностей.

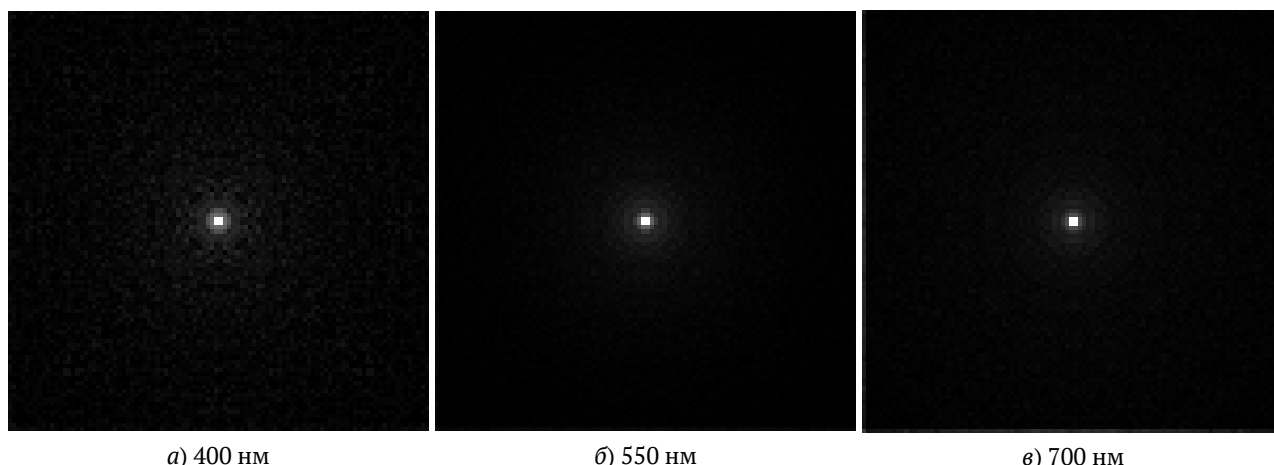
## 2. Оптимизация

Для оптимизации была выбрана функция невязки в виде линейной комбинации ширин осевой и внеосевой ФРТ.

$$f = C_1 f_1 + C_2 f_2, \tag{1}$$

$$C_1 + C_2 = 1.$$

где  $f$  — функция невязки,  $f_1$  — ФРТ на оси,  $f_2$  — внеосевая ФРТ,  $C_1$  и  $C_2$  — эмпирически задаваемые коэффициенты. В ходе оптимизации могли изменяться три параметра: расстояние между поверхностями, форма первой поверхности и жестко связанная с ней форма второй



а) 400 нм

б) 550 нм

в) 700 нм

**Рис. 3.** Двумерные ФРТ на различных длинах волн

поверхности. Расстояние между поверхностями было ограничено величиной 1 мм. В результате выполнения оптимизационного алгоритма при  $C_1 = C_2 = 0,5$  была получена система, представленная на рис. 2а.

Как видно из рис. 2а при оптимизации толщина была уменьшена до минимально возможного по условиям уровня. Сформированные поверхности уже не являются аппроксимациями параболических линз, а являются существенно асферическими. При этом ширина ФРТ на оси и под углом  $2^\circ$  почти не изменяется. На рис. 3 приведены двумерные ФРТ на длинах волн: 400 нм (рис. 3а), 550 нм (рис. 3б), 700 нм (рис. 3в) по области шириной  $100 \times 100$  мкм.

Из рис. 3 хорошо видно, что системы двух поверхностей хорошо ахроматизирована, ширина ФРТ для всех трех длин волн менее 5 мкм.

### Заключение

Моделирование системы из двух поверхностей: одной гармонической с высотой микрорельефа 30 мкм и дифракционной линзы с оптической силой подобранной так, чтобы она компенсировала хроматизм гармонической линзы, вызванный дисперсией материала, показало возможность расчета параметров, при которых ФРТ имеет почти одинаковую по ширине в осевой области и под углом  $2^\circ$ . Таким образом, появляется возможность только на основе поверхностей дифракционного типа создавать изображающие объективы. При этом алгоритм оптимизации при поиске решения минимизирует расстояние между поверхностями, что потенциально означает возможность проектирования очень компактных систем.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №0-69-47110.

### Список источников

- [1]. **Dobson, S. L.** [Diffraction lenses for chromatic confocal imaging](#) / S. L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // Applied Optics. — 1997. — Vol. — 36. — № 20. — P. 4744–4748.
- [2]. **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. Вологовский // Компьютерная оптика. — 2014. — Том 38. — № 3. — С. 425–434.

- [3] **Sweeney, D. W.** [Harmonic diffractive lenses](#) / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2475.
- [4] **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.
- [5] **Rosli, A.** [Design and fabrication of Si-HDPE hybrid Fresnel lenses for infrared imaging systems](#) / A. Rosli, A. Manaf, T. Sugiyama, J. Yan // Optic Express. — 2017. — Vol. 25. — P. 1202–1220.
- [6] **Nikonorov, A.** Fresnel lens imaging with post-capture image processing / A. Nikonorov, R. Skidanov, V. Fursov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2015. — P. 33–41.
- [7] **Greisukh, G. I.** [Limiting spectral and angular characteristics of multilayer relief-phase diffraction microstructures](#) / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, A. I. Antonov, V. A. Danilov, B. A. Usievich // Quantum Electronics. — 2020. — Vol. 50. — № 7. — P. 623–628.
- [8] **Greisukh, G. I.** [Spectral and Angular Dependences of the Efficiency of Three-Layer Relief-Phase Diffraction Elements of the IR Range](#) / G. I. Greisukh, V. A. Danilov, S. A. Stepanov, A. I. Antonov, B. A. Usievich // Optics and Spectroscopy. — 2018. — Vol. 125. — № 2. — P. 232–237.
- [9] **Antonov, A. I.** [Diffractive elements for imaging optical systems](#) / A. I. Antonov, G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, S. A. Stepanov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2017. — Vol. 53. — № 5. — P. 421–430.
- [10] **Хонина, С. Н.** Линзакон: непараксиальные эффекты / С. Н. Хонина, Н. Л. Казанский, А. В. Устинов, С. Г. Вологовский // Оптический журнал. — 2011. — Том 78. — № 11. — С. 44–51.
- [11] **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.
- [12] **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. Вологовский // Компьютерная оптика. — 2014. — Том 38. — № 3. — С. 425–434.
- [13] **Sweeney, D. W.** [Harmonic diffractive lenses](#) / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — № 14. — P. 2469–2475.
- [14] **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.
- [15] **Скиданов, Р. В.** Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе дифракционных линз корректирующих аберрации / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, В. С. Васильев, В. В. Подлипов // Оптика и спектроскопия. — 2021. — Том. 29. — № 4. — С. 443–448.