

21. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе асферических гармонических линз

С. В. Ганчевская¹, С. В. Скиданов², В. С. Васильев^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Рассматривается возможность использования асферических гармонических линз для построения изображения. Гармонические линзы изготовлены методом прямой лазерной записи по фоторезисту с итеративной коррекцией параметров записи, что обеспечило погрешность формирования высоты микрорельефа менее 30 нм. Для тестирования системы использовалась светотехническая таблица, позволяющая определить основные оптические характеристики.

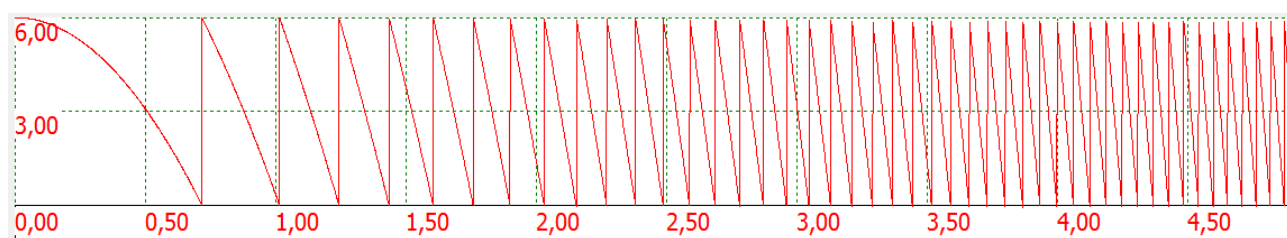
Ключевые слова: Гармоническая линза, Изображающая оптическая система, Обобщённая линза, Микрорельеф, Профиль линзы.

Цитирование: Ганчевская, С. В. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе асферических гармонических линз / С. В. Ганчевская, С. В. Скиданов, В. С. Васильев // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 133–137.

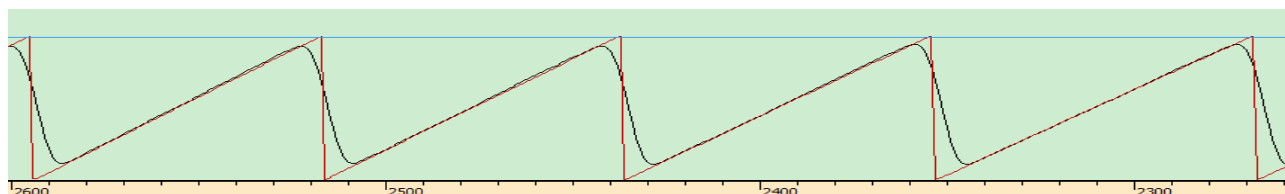
Введение

Классическая изображающая оптическая система состоит из сферических линз и зеркал. Конструкция оптических изображающих систем на основе асферических линз намного компактнее и проще, поскольку содержат меньше элементов. 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). Основные типы асферических поверхностей для линз, которые используются в настоящий момент времени описаны в [1].

Схема использования асферических линз в изображающих оптических системах: группа сферических линз в объективе заменяется на один асферический элемент, который проводит исправление волнового фронта, формируя практически идеальный гомоцентрический пучок. 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, 5]. Для оптической системы, состоящей из нескольких элементов, можно подобрать фазовую функцию одного из элементов таким образом, чтобы на выходе



а) Расчетный профиль



б) Участок расчетного профиля с наложенным профилем изготовленного элемента

Рис. 1. Профиль гармонической линзы

оптической системы формировался гомоцентрический пучок [6]. В работе [6] рассматривается метод компенсации негомоцентричности фокусируемого пучка, где вместо параболических линз установлены обобщенные линзы.

Развитие технологий формирования микрорельефов с высотой существенно больше микрометра дает возможность изготовления дифракционных [5, 6] или гармонических линз [7], аппроксимирующих любую асферическую поверхность [8]. Трудоемкость этой технологии не зависит от формы поверхности, которая аппроксимируется микрорельефом. Использование асферических линз со свободной формой поверхности дает дополнительную степень свободы при проектировании многолинзовых объективов. Разработчики освобождаются от ограничений на форму используемых асферических линз. Возможно использование элементов, которые в отдельности не являются изображающими. Вследствие этого практически нет ограничения на траекторию лучей в оптической системе, что потенциально может позволить получить большую светосилу оптической системы при существенно меньшей длине оптической системы.

В рамках работы рассматривается функциональность оптической системы, состоящей из двух гармонических линз: технологичность и распределение оптической силы системы по двум элементам.

Гармоническая линза при достаточно большой высоте микрорельефа и малых технологических погрешностях (при изготовлении) позволяет формировать изображение, которое при дополнительно цифровой обработке сопоставимо по качеству с изображением, получаемом в классическом объективе на основе рефракционных линз [7]. Однако любая технология изготовления: алмазное точение, прямая лазерная запись и т. д. — не свободна от целого ряда технологических отклонений, которые приводят к тому, что формируемое гармонической линзой изображение существенно менее качественное, чем могло бы быть.

Рассмотрим, какие основные проблемы с формированием микрорельефа гармонической линзы возникают в технологии прямой лазерной записи по фоторезисту. На рисунке 1а представлен расчетный профиль гармонической линзы с высотой микрорельефа 6 мкм, фокусным

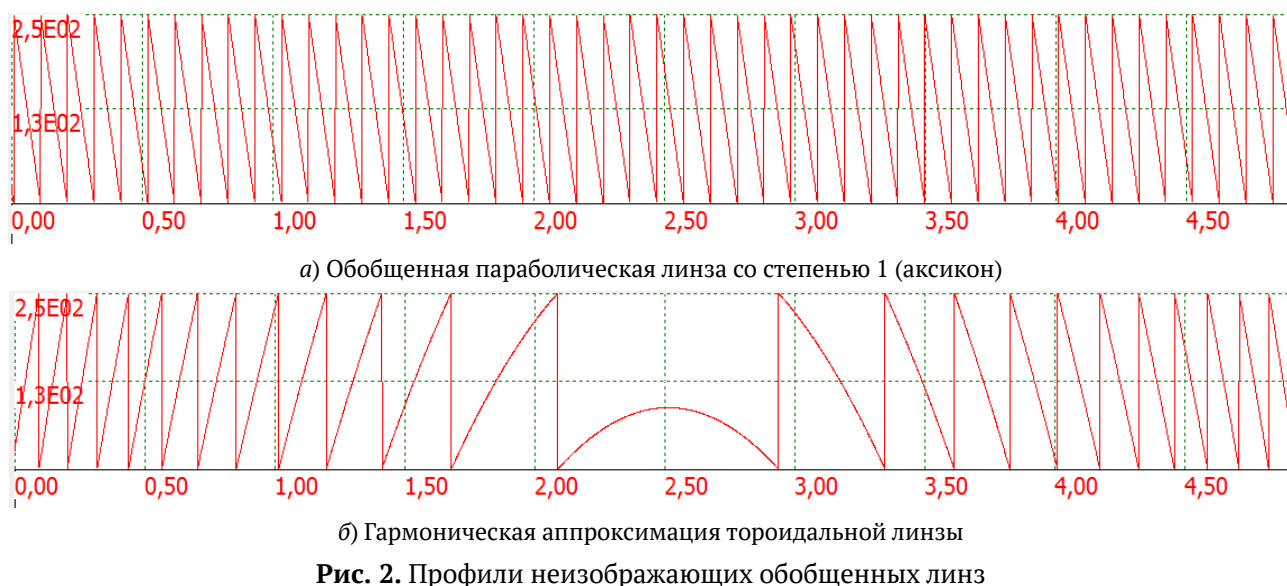


Рис. 2. Профили неизображающих обобщенных линз

расстоянием 100 мм и диаметром 10 мм, на рисунке 1б — участок профиля с наложенным на него реальным профилем изготовленного элемента.

Как видно из рисунка 1б, реальный профиль отличается от расчетного отсутствием вертикальных поверхностей. Вместо вертикальной поверхности при записи образуется поверхность с углом наклона максимум в 40° . Это ограничение связано с тем, что для фокусировки используется довольно мощный микрообъектив, который формирует световой конус с углом примерно в 40° . Частично это можно исправить записью наклонным пучком [8], но тогда возникнут другие технологические проблемы: уменьшение разрешения, скорости записи, глубины записи. Если посмотреть на рисунок 1а, то видно, что размер крайней зоны линзы составляет около 50 мкм, тогда как ширина области обратного наклона в профиле около 10 мкм. Таким образом, около 20% световой энергии крайней зоны не будут участвовать в формировании изображения. При увеличении относительного отверстия линзы этот эффект только усиливается, поскольку размер крайних зон уменьшается, а ширина зоны обратного наклона остается постоянной. Кроме этого, при сужении ширины записываемых зон наблюдается эффект увеличения нелинейности записи: зоны, которые вносят наибольший вклад в формирование изображения, записываются с максимальными технологическими погрешностями. Проблему можно решить за счет использования двух неизображающих обобщенных гармонических линз, поставленных вблизи друг от друга [6]. На рисунке 2 представлены профили двух таких элементов — обобщенной параболической линзы со степенью 1 (аксикон, рисунок 2а), и элемента, который представляет собой гармоническую аппроксимацию тороидальной линзы (рисунок 2б).

Как видно из рисунка 2, ширина крайних зон линзы и период аксикона составляют около 130 мкм, что позволяет записывать их практически без нелинейных технологических ошибок, а общая площадь зон обратного наклона на самой узкой зоне всего 7% от площади зоны. Моделирование такой структуры на основе трассировки лучей показало, что функция рассеяния точки (ФРТ) не изменяется в сравнении с одиночной гармонической линзой (рисунок 3).

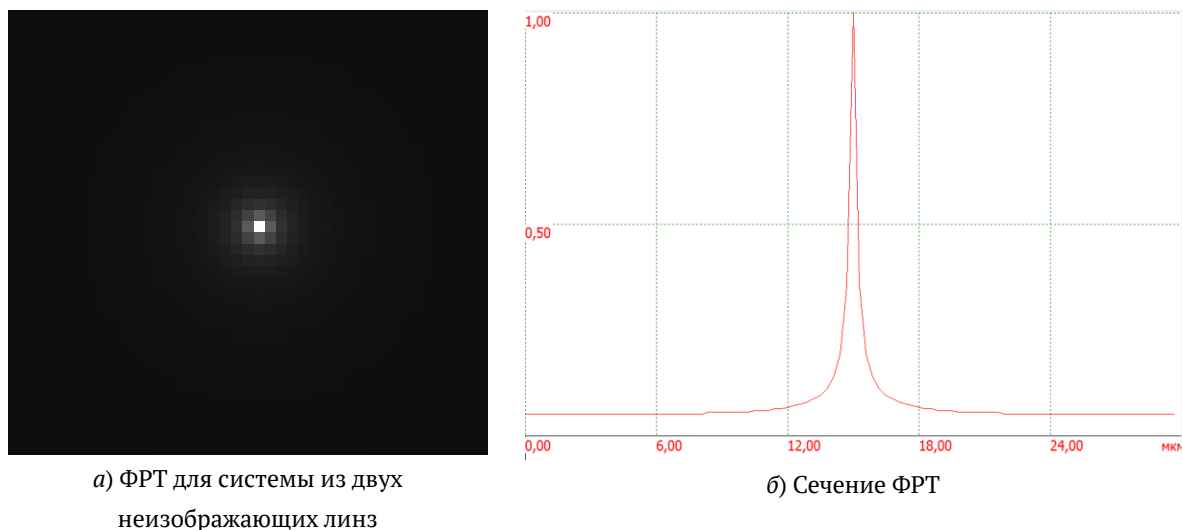


Рис. 3. ФРТ для системы из двух неизображающих линз (а) и ее сечение (б)

Таким образом, вместо одной гармонической линзы получается эквивалентный объектив, состоящий из двух неизображающих элементов, каждый из которых существенно проще при изготовлении, и, вследствие этого, содержит меньше технологических ошибок. Кроме того, использование двойных элементов позволяет снять ограничение на предельное относительное отверстие для изображающей системы на основе гармонических линз.

Заключение

Разделение микрорельефа гармонической линзы на два элемента, позволяет исключить критически сложные для технологии изготовления участки. В перспективе это позволит повысить качество формирования изображений объективами на основе гармонических линз. Проведенное моделирование показывает, что разделение микрорельефа на два практически не влияет на ширину ФРТ.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/ЧЗ363/26), а также при поддержке гранта РФФИ №18-29-20045мк.

Список источников

- [1] **Malacara, D.** Handbook of Optical Design / D. Malacara, Z. Malacara. — New York, Basel : Marcel Dekker, Inc., 2004. — 522 p.
- [2] **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.
- [3] **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.
- [4] **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.

- [5] **Скиданов, Р. В.** Экспериментальное исследование дифракционных линз для работы с излучением нескольких заданных длин волн / Р. В. Скиданов, Л. Л. Досколович, С. В. Ганчевская, В. А. Бланк, В. В. Подлипов, Н. Л. Казанский // Компьютерная оптика. — 2020. — Том 44. — № 1. — С. 22–28.
- [6] **Васильев, В. С.** Изображающие системы на основе обобщённых линз / В. С. Васильев, Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская // Компьютерная оптика. — 2019. — Том 43. — № 5. — С. 789–795.
- [7] **Nikonorov, A. V.** Toward ultralightweight remote sensing with harmonic lenses and convolutional neural networks / A. V. Nikonorov, M. V. Petrov, S. A. Bibikov, P. Y. Yakimov, V. V. Kutikova, Y. V. Yuzifovich, A. A. Morozov, R. V. Skidanov, N. L. Kazanskiy // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. — 2018. — Vol. 11. — № 9. — P. 3338–3348.
- [8] **Ganchevskaya, S. V.** Modified method of direct laser writing radially symmetric structures / S. V. Ganchevskaya, R. V. Skidanov, O. A. Titaev // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 1096. — № 1. — P. 012013.