

9. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе кольцевой гармонической линзы

Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипнов

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

Самарский национальный исследовательский университет имени академика

С. П. Королева, Самара, Россия

Экспериментально показано, что возможно создание компактного изображающего объектива, который в пределе может быть реализован как почти плоская структура с нулевым рабочим отрезком. Методом прямой лазерной записи изготовлена кольцевая гармоническая отражающая линза, на основе которой собран предложенный объектив. Проведено экспериментальное исследование объектива в режиме построения изображений источников света и светотехнической миры для тестирования объективов. Показано, что предложенная схема изображающего объектива на основе отражающей кольцевой гармонической линзы является работоспособной.

Ключевые слова: Гармоническая линза, Кольцевая апертура, Прямая лазерная запись, Компактный объектив.

Цитирование: Скиданов, Р. Н. Экспериментальное исследование изображающего объектива на основе кольцевой гармонической линзы / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипнов // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 60–65.

Введение

Характерная тенденция к минимизации систем регистрации изображений осуществляется в основном за счет минимизации электронного блока. Столь же сильно уменьшить размер оптической части с использованием классической рефракционной оптики натывается на ряд фундаментальных ограничений. Так оптические системы, используемые в современных смартфонах, формируют довольно качественное изображение, но ограничения по толщине вынуждают производителей использовать короткофокусные объективы. Поместить в корпус смартфона длиннофокусный объектив невозможно. Однако необходимость снимать на больших расстояниях периодически возникает как с использованием смартфона, так и при съемках с малых БПЛА. В идеале, желательно чтобы объектив с большой апертурой и фокусным расстоянием имел бы почти нулевую длину.

Для минимизации изображающих систем целесообразно использовать дифракционную оптику. Изображающие системы на основе дифракционных линз пригодны для практического использования: такие системы обладают существенно меньшей массой и более ком-

пактны, по сравнению с системами на основе рефракционных линз. Препятствием для широкого использования дифракционных линз является их высокий хроматизм [1]. Однако это возможно частично компенсировать путем использования так называемых гармонических линз [2–5]. Часть хроматических искажений можно компенсировать дополнительной цифровой обработкой [6]. Изображающие системы на основе гармонических линз позволяют существенно уменьшить массу объектива, поскольку толщина гармонической линзы — это толщина пластины, на которой нанесен микрорельеф [3]. Гармонические линзы могут использоваться не только в видимом, но и в среднем ИК диапазоне [7], но существенно уменьшить геометрические размеры, например, телескопического объектива, с помощью гармонических линз невозможно (требуется принципиально иное техническое решение). Кардинальное уменьшение размера изображающего объектива можно получить, развив идею одной из двухзеркальных телескопических систем [8].

Основные схемы двухзеркальных телескопов были предложены Никола Кассегреном и Джеймсом Грегори ещё в XVII веке. В классических версиях систем главное зеркало представляет собой параболоид вращения. В системе Кассегрена вторичное зеркало расположено между главным зеркалом и его фокусом для сохранения нулевой сферической аберрации, поверхность этого зеркала должна иметь форму выпуклого гиперboloида, фокус которого совмещен с фокусом F . В работе [10] предложена идея изображающей системы, состоящей из двух зеркал и кольцевой отражающей гармонической линзы, которая при сохранении большого фокусного расстояния имеет продольный размер порядка нескольких миллиметров.

В настоящей работе рассматривается экспериментальная проверка работы этой изображающей системы, состоящей из двух зеркал и кольцевой отражающей гармонической линзы, которая при фокусном расстоянии в 100 мм имеет продольный размер порядка нескольких миллиметров.

1. Эксперимент

Для эксперимента по формированию изображений был изготовлен экспериментальный образец изображающей системы с кольцевой апертурой. Кольцевая линза была изготовлена методом прямой лазерной записи по фоторезисту с последующим нанесением слоя алюминия методом магнетронного напыления. Фокусное расстояние кольцевой линзы составило 100 мм, диаметр из-за технологических ограничений составил 25 мм, ширина кольца с микрорельефом — 0,75 мм. Линза рассчитывалась для основной длины волны 650 нм. На рисунок 1а представлен внешний вид получившейся кольцевой линзы, сечение профиля по всей ширине кольца микрорельефа (рисунок 1б) и общий вид системы в пластиковом корпусе. Второе зеркало расположено на расстоянии 10 мм от первого, таким образом, в системе должно быть 5 переотражений.

Для проведения эксперимента использовалась простейшая оптическая схема (рисунок 2), в которой задействована камера TourCam UCMOS03100KPA с размером пикселя 5,5 мкм. Плоскость фокусировки системы расположена непосредственно в плоскости гармонической

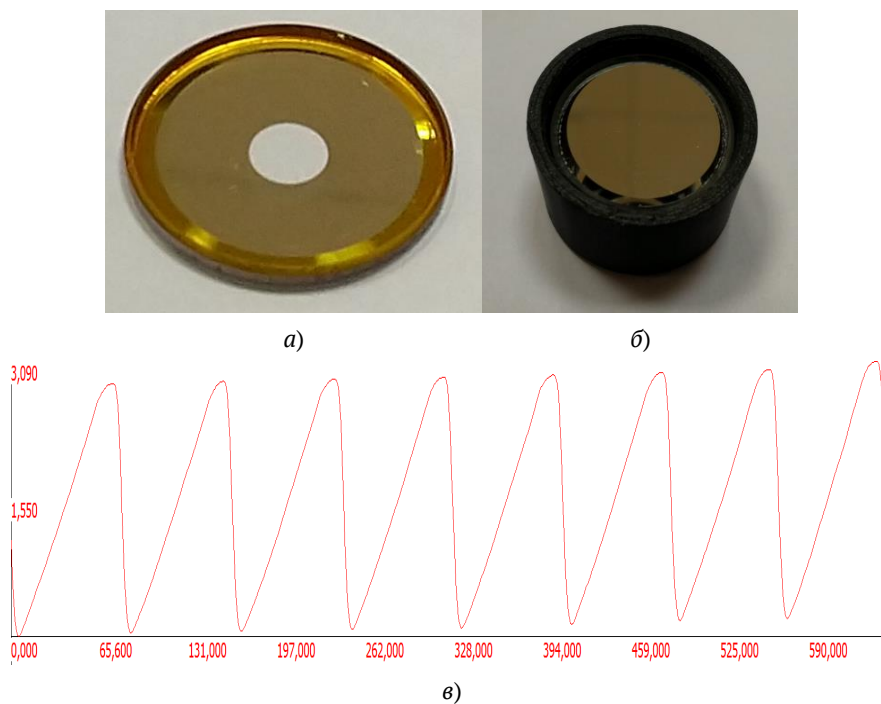
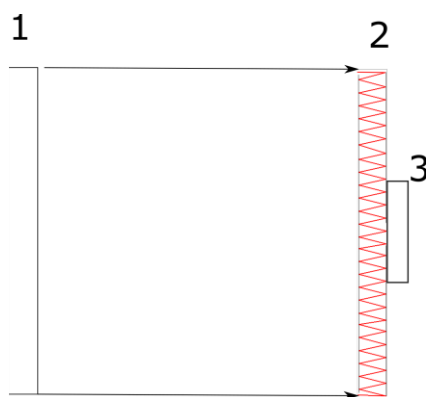


Рис. 1. Внешний вид изготовленной отражающей кольцевой гармонической линзы, по краю видна кольцевая зона с микрорельефом (а), сечение профиля микрорельефа (б), внешний вид системы формирования изображений с кольцевой апертурой со стороны второго зеркала (в)



1 — мира, освещаемая плоским равномерным источником света, 2 — кольцевая изображающая система, 3 — регистрирующая камера TourCam UCМOS03100KPA

Рис. 2. Оптическая схема для формирования изображений оптической системой с кольцевой апертурой

линзы, но из-за расположения объекта на конечном расстоянии (800 мм), которое сопоставимо с фокусным расстоянием линзы, плоскость формирования изображения оказалась вынесена за пределы конструкции объектива на 12 мм, и с учетом расположения матрицы внутри корпуса камеры для получения четкого изображения объектив располагался практически вплотную к корпусу камеры. При наблюдении бесконечно удаленного объекта объектив надо было бы располагать непосредственно возле светочувствительной матрицы.

В качестве объектов для построения изображения использовались светотехническая мира (рисунок 3), два светодиодных источника с малыми излучающими площадками: один —

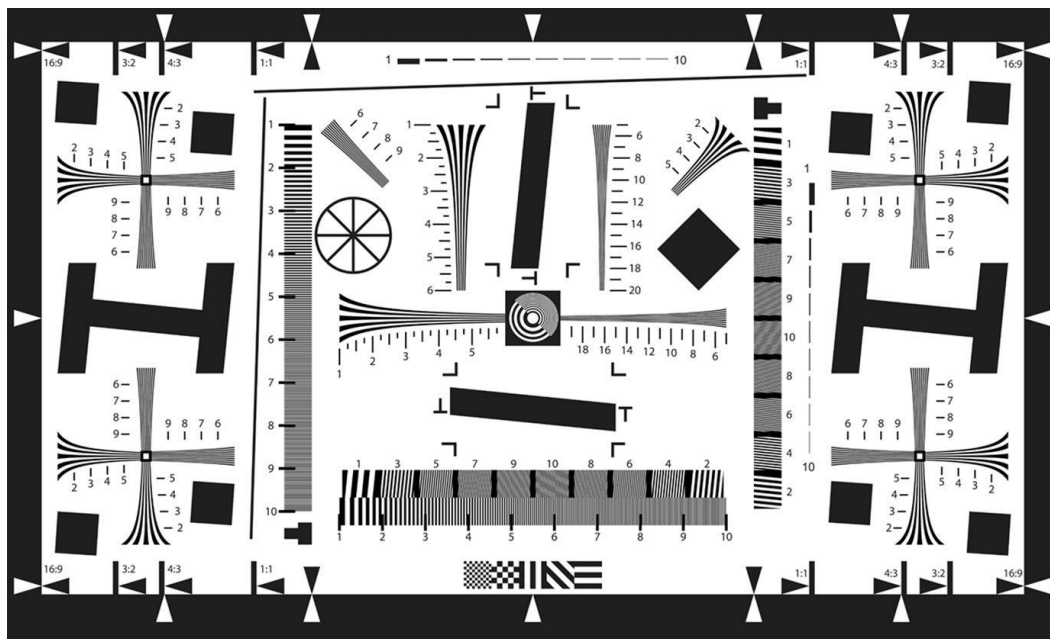


Рис. 3. Изображение черно-белой миры для тестирования объективов

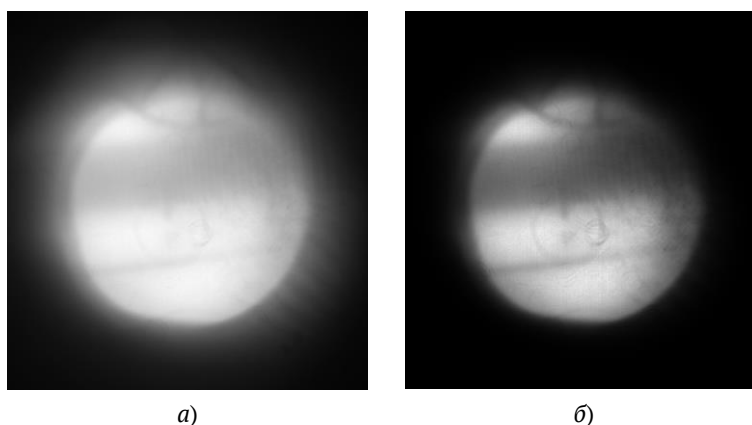
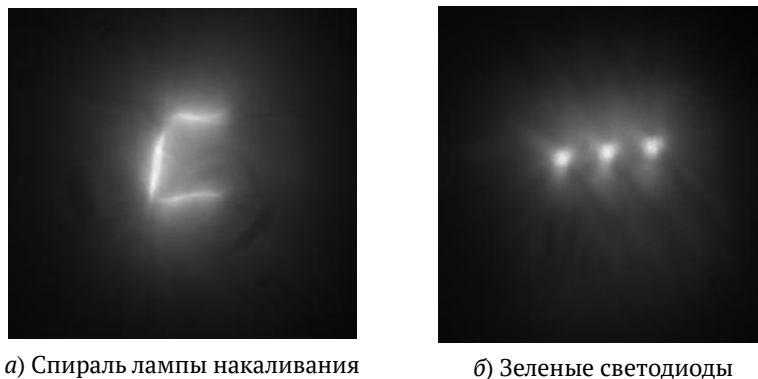


Рис. 4. Изображение участка светотехнической миры без обработки (а), с удаленной фоновой засветкой (б)

цветной (RGB) по три красных, зеленых и синих светодиода, второй — с 16 белыми светодиодами, расположенными по кольцу, а также лампа накаливания.

Поскольку поле зрения у рассматриваемой системы очень мало, на матрицу попадает небольшой участок миры (рисунок 4а и 4б).

На рисунке 13а, ожидаемо по результатам моделирования, наблюдается два участка поля зрения: центральный с большей яркостью и вокруг него с пониженной яркостью там, где фокусируется свет от части апертуры. Вторая область немного несимметрична, что связано, очевидно, с небольшим наклоном друг относительно друга двух зеркал. При обработке изображения путем удаления фоновой засветки, качество изображения становится немного лучше, но при этом область поля зрения с пониженной яркостью уже почти не видна. Из-за малой светосилы изображение довольно сильно зашумлено и получить характеристики системы по такому



а) Спираль лампы накаливания

б) Зеленые светодиоды

Рис. 14. Изображение разных источников света

изображению затруднительно. Поэтому для оценки ширины ФРТ были использованы изображения светодиодов и лампы накаливания (рисунок 14).

Как видно из рисунка 14, для ярких источников света формируются довольно контрастные изображения. Так, ширина изображения спирали в самом узком месте всего 2 пикселя матрицы (11–16,5 мкм), но все недостатки гармонических линз присущи и этой системе. Оценка ширины ФРТ производилась по спаду интенсивности на границе изображения источника света.

Если говорить о полихроматической ФРТ (по изображению лампы накаливания), оценочная ширина по полуспаду составляет 2–3 пикселя (11–16,5 мкм). Для зеленых светодиодов — 3 пикселя (16,5 мкм). Измерения проводились при нахождении объекта вблизи к оптической оси. Ширина осевой ФРТ намного больше предсказанной по результатам моделирования [10], однако, с учетом свойств гармонических линз [1], это вполне предсказуемый результат. С точки зрения практического использования получилась вполне работоспособная система, которую, конечно, нужно улучшать и совершенствовать. Уже на настоящем этапе понятно, что предложенная конфигурация имеет огромный потенциал для дальнейшего развития, как основа для компактных объективов.

Заключение

Продемонстрирована возможность создания длиннофокусного объектива, собственные размеры которого, как и его рабочий отрезок будут на 1–2 порядка меньше его фокусного расстояния. Теоретических ограничений на уменьшение длины такого объектива нет. Можно сформировать объектив с расстоянием между первым и вторым зеркалом менее 1 мм, с нулевой длиной рабочего отрезка и такая система будет работать. Таким образом, систему регистрации изображений можно превратить в плоский сенсор, в котором оптическая часть и светочувствительная матрица будут выглядеть, как две прижатые друг к другу пластины.

Список источников

- [1] **Dobson, S. L.** Diffractive lenses for chromatic confocal imaging / S. L. Dobson, P. Sun, Y. Fainman // Applied Optics. — 1997. — Vol. 36. — №20. — P. 4744–4748.
- [2] **Sweeney, D. W.** Harmonic diffractive lenses / D. W. Sweeney, G. E. Sommargren // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — №14. — P. 2469–2475.

- [3] **Sales, T. R. M.** [Diffractive-refractive behavior of kinoform lenses](#) / T. R. M. Sales, G. M. Morris // Applied Optics. — 1997. — Vol. 36. — №1. — P. 253–257. — DOI: 10.1364/AO.36.000253.
- [4] **Faklis, D.** Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, G. M. Morris // Applied Optics. — 1995. — Vol. 34. — P. 2462–2468.
- [5] **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.
- [6] **Nikonorov, A.** Fresnel lens imaging with post-capture image processing / A. Nikonorov, R. Skidanov, V. Fursov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Work. — 2015. — P. 33–41.
- [7] **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.
- [8] **Теребиж, В. Ю.** Современные оптические телескопы / В. Ю. Теребиж. — Москва : Физматлит, 2005. — 65 с.
- [9] **Хонина, С. Н.** Минимизация размера светового или теневого фокального пятна с контролируемым ростом боковых лепестков в фокусирующих системах с вы-сокой числовой апертурой / С. Н. Хонина, С. Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. — 2011. — Том 35. — №4. — С. 438–451.
- [10] **Skidanov, R. V.** [Harmonic lens with an annular aperture](#) / R. V. Skidanov, Y. S. Strelkov, S. G. Volotovskiy // Computer Optics. — 2017. — Vol. 41. — №6. — P. 842–847. — DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.