

ГАРМОНИЧЕСКАЯ ЛИНЗА С КОЛЬЦЕВОЙ АПЕРТУРОЙ

Р.В. Скиданов^{1,2}, Ю.С. Стрелков^{1,2}, С.Г. Волотовский^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

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

Аннотация

Рассмотрена конструкция компактного изображающего объектива на основе отражающей кольцевой гармонической линзы. Проведено моделирование такого объектива в системе ZEMAX. Рассчитана функция рассеяния точки. Получен ряд соотношений, описывающих связь ключевых параметров такого объектива. Показано, что в этом случае возможно создание компактного изображающего объектива, длина которого может быть на порядок меньше, чем его фокусное расстояние.

Ключевые слова: гармоническая линза, изображающая система, объектив, кольцевая апертура.

Цитирование: Скиданов, Р.В. Гармоническая линза с кольцевой апертурой / Р.В. Скиданов, Ю.С. Стрелков, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 842-847. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.

Введение

Изображающие системы на основе плоских линз очень удобны для практического использования, такие системы обладают существенно меньшей массой и более компактны, чем системы на основе рефракционных линз. Высокий хроматизм дифракционных линз [1, 2] возможно компенсировать путем использования так называемых гармонических линз [3, 4]. При этом можно часть хроматических искажений компенсировать дополнительной цифровой обработкой [5]. Изображающие системы на основе гармонических линз позволяют существенно уменьшить массу объектива, поскольку толщина гармонической линзы – это толщина пластины, на которой нанесен микрорельеф [4]. Такие линзы могут использоваться не только в видимом, но и в среднем ИК-диапазоне [6]. Однако существенно уменьшить геометрические размеры, например, телескопического объектива с помощью этих линз уже не получится, для этого нужно принципиально иное техническое решение. Такое решение можно получить, разлив идею одной из двухзеркальных телескопических систем [7]. Основные схемы двухзеркальных телескопов были предложены Никола Кассегреном и Джеймсом Грегори ещё в XVII веке. В классических версиях этих систем главное зеркало представляет собой парабола вращения. Изображение бесконечно удаленной осевой точки, которое строит главное зеркало в своем фокусе F , переносится вторичным зеркалом в точку F_1 . В системе Кассегрена вторичное зеркало расположено между главным зеркалом и его фокусом; для сохранения нулевой сферической аберрации поверхность этого зеркала должна иметь форму выпуклого гиперболоида, фокус которого совмещен с F . В системе Грегори вторичное зеркало расположено за первичным фокусом F . Придавая этому зеркалу форму вогнутого эллипсоида с фокусами в точках F и F_1 , мы по-прежнему будем иметь резкое изображение на оптической оси. Схема Кассегрена более компактна как раз за счет того, что фокальный отрезок за счет отражения дважды укладывается в габариты телескопа.

В настоящей работе рассматривается развитие этой идеи в виде изображающей системы, состоящей

из двух зеркал и кольцевой отражающей гармонической линзы, которая при сохранении большого фокусного расстояния имеет продольный размер порядка нескольких миллиметров.

1. Схема изображающего объектива на двух сторонах плоской пластины

Рассмотрим телескопическую систему (с бесконечным предметным отрезком), которая по сути является развитием схемы Кассегрена. Сделаем вторичное зеркало плоским, а первичное зеркало плоским, но с отражающим микрорельефом на краю. Т.е. объектив состоит из кольцевой отражающей гармонической линзы, двух зеркал, в центре нижнего зеркала отверстие для выхода сфокусированного света (рис. 1а).

Эквивалент такой системы без перетражений действительно напоминает схему Кассегрена (рис. 1б). Очевидно, что в этой системе обе главные плоскости и входной зрачок будут совпадать с плоскостью гармонической линзы. Выходной зрачок, так же как и в схеме Кассегрена, будет мнимым и находится за вторичным зеркалом.

В качестве линзы была использована гармоническая параболическая линза. Форма поверхности пропускающей гармонической линзы согласно [2] определяется формулой

$$h(r, \lambda_0) = \frac{1}{n-1} \text{MOD}_{m\lambda_0} \left(\frac{k}{2f} r^2 \right), m = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (1)$$

где λ_0 – центральная расчетная длина волны, m – число гармоник, операция $\text{MOD}_{m\lambda_0}$ означает, что максимальная разность хода лучей в этой линзе $m\lambda_0$.

Для отражающей линзы формула немного видоизменяется

$$h(r, \lambda_0) = \frac{1}{2n} \text{MOD}_{m\lambda_0} \left(\frac{k}{2f} r^2 \right), m = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (2)$$

Таким образом, при относительно небольшой высоте микрорельефа количество гармоник отражающей линзы будет достаточно велико, чтобы ее хроматические аберрации, связанные с дифракцией света,

не превышали классические хроматические aberrации, вызываемые дисперсией материала линзы.

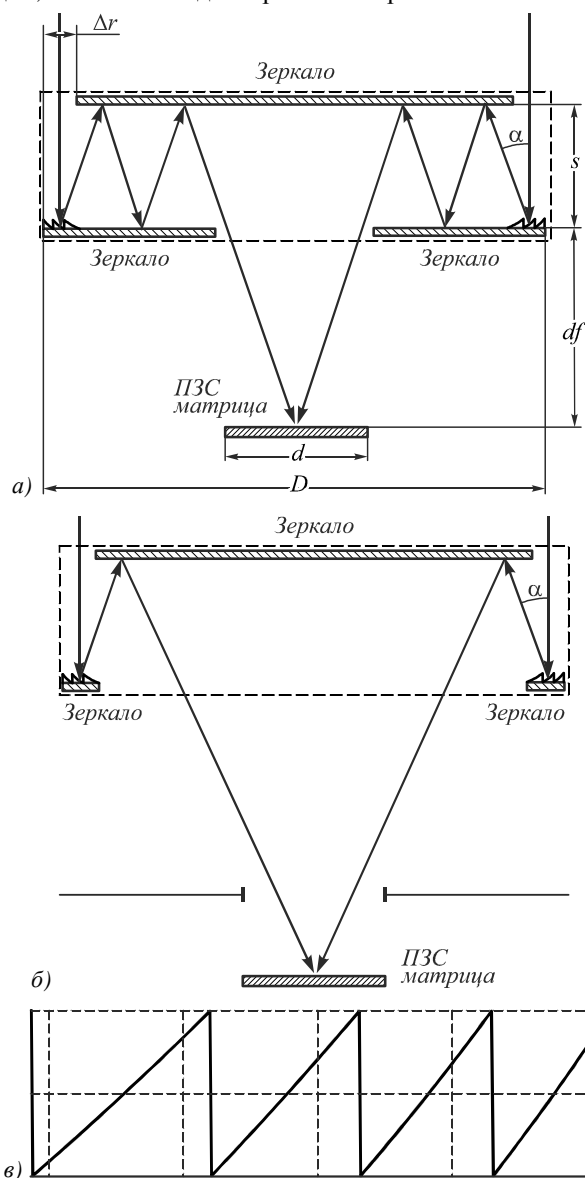


Рис. 1. Планарный кольцевой изображающий объектив (а), его эквивалент без повторных отражений (б), сечение микрорельефа гармонической параболической линзы с высотой 10 мкм (в)

Для моделирования была использована параболическая линза диаметром 50 мм с фокусным расстоянием 100 мм. Высота микрорельефа – 10 мкм была выбрана исходя из возможностей технологии для изготовления таких линз. При центральной длине волны $\lambda_0 = 0,5$ мкм такая линза будет иметь $m = 30$. Сечение микрорельефа такой линзы для указанных параметров представлено на рис. 1в.

Такая система за счет большого количества последовательных отражений «сжимает» телеобъектив почти до размеров пластины толщиной 2–10 мм, при этом можно получать изображающие системы с фокусными расстояниями до нескольких сотен миллиметров. Длина же самого объектива, с учетом расстояния до светочувствительной матрицы, при этом явля-

ется регулируемым параметром и может составлять всего 5–10 % от величины фокусного расстояния.

При указанных выше параметрах угол α , под которым пучок отражает крайняя зона линзы, будет составлять около 14° ($\alpha = \arctg(D/2f)$).

Рассмотрим основные соотношения, которые описывают данную систему. Существует ряд объективных ограничений, которые накладываются на параметры предлагаемой системы. Для начала рассмотрим ограничения при работе этой системы с точечным объектом на оптической оси.

Первое ограничение следует из того, что радиус центрального отверстия должен быть не меньше фокусного расстояния, умноженного на тангенс максимального угла поля зрения, если же отверстие становится меньше, то оно само является апертурной диафрагмой. Минимальная длина такой системы определяется толщиной пластины s и величиной df , которая, в свою очередь, связана с минимальным размером центрального отверстия по формуле

$$df = f \frac{d}{D}, \tag{3}$$

где D – диаметр линзы, d – диаметр центрального отверстия.

Существует также ограничение на максимальную ширину кольцевой апертуры Δr , которое определяется по следующей формуле

$$\Delta r = s \frac{D}{2f}, \tag{4}$$

где s – толщина линзы. Как видно из этой формулы, ширина апертурного кольца пропорциональна толщине пластины s . Поэтому делать такую систему на очень тонких пластинах нельзя из-за сильного снижения светосилы.

Большое количество отражений в системе приводит к повышенным требованиям к коэффициенту отражения. Количество отражений света в системе определяется по формуле

$$N = \left[\frac{D - d}{2D} \frac{f}{s} \right], \tag{5}$$

где $[\]$ – означают целую часть числа.

Таким образом, энергетическая эффективность системы η при коэффициенте отражения β будет определяться формулой

$$\eta = \beta^N = \beta^{\frac{D-d}{2D} \frac{f}{s}}. \tag{6}$$

Чем тоньше пластина, тем большее количество отражений, тем меньше будет проходить света через такую оптическую систему. Так, в качестве оценочного расчета для $s = 10$ мм, $D = 50$ мм, $d = 5$ мм, $f = 100$ мм, $\beta = 0,95$ получается значение $\eta = 0,63$, при этом общая длина такого объектива составит всего 20 мм.

Еще целый ряд ограничений появляется при работе такой системы с внеосевым точечным объектом (рис. 2).

Рассмотрим прохождение наклонного параллельного пучка через эту систему (рис. 2). Хорошо видно,

что при наклоне пучка появляются две проблемы: часть лучей (слева) просто проходит мимо отражающей линзы, а справа при угле наклона пучка более $\alpha/2$ свет просто не входит в оптическую систему. И если первую проблему легко решить, сделав шире область с микрорельефом, то второе ограничение является непреодолимым и таким образом поле зрения ограничивается углом $\alpha/2$. Для указанных в задаче параметров это примерно 7° . Это довольно хорошее значение, однако это ограничение не самой системы (рис. 1а), а её эквивалента, изображенного на рис. 1б. В самой же системе появляется более жёсткое ограничение на угол поля зрения, которое связано с разным количеством отражений для лучей, вошедших в систему с разных сторон (рис. 3).

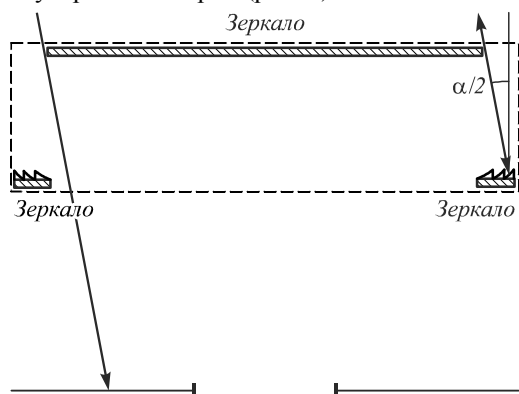


Рис. 2. Прохождение через объектив пучка под наклоном $\alpha/2$ к оптической оси

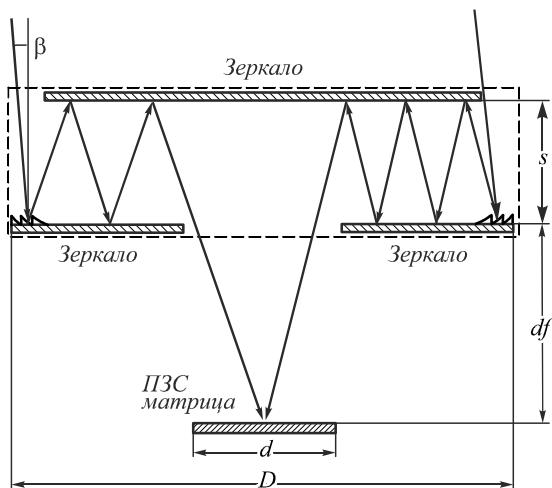


Рис. 3. Падение наклонного пучка с разным количеством отражений

Таким образом, главное ограничение на угол поля зрения рассматриваемой системы вытекает из необходимости равенства числа отражений для света, вошедшего с разных сторон объектива.

Если угол отражения от крайней области – α , а угол наклона пучка β , то с левой стороны свет будет проходить, отражаясь под углом $\alpha + \beta$, а с правой стороны $\alpha - \beta$ (рис. 3).

Тогда число отражений с левой стороны

$$N_1 = \left[\frac{D-d}{4s \cdot \text{tg}(\alpha + \beta)} \right], \tag{7}$$

где $[\]$ – означает целую часть числа, а число отражений с правой стороны

$$N_2 = \left[\frac{D-d}{4s \cdot \text{tg}(\alpha - \beta)} \right]. \tag{8}$$

Подстановка указанных выше параметров в (7) и (8) даёт следующий результат: равенство числа отражений соблюдается при углах менее 1° .

2. Вычислительный эксперимент

Для доказательства работоспособности предлагаемого объектива была построена его математическая модель в ZEMAX. На рис. 4 приведены изображения трассировки параллельного оптической оси пучка лучей через систему в двумерном (рис. 4а) и в трехмерном виде (рис. 4б).

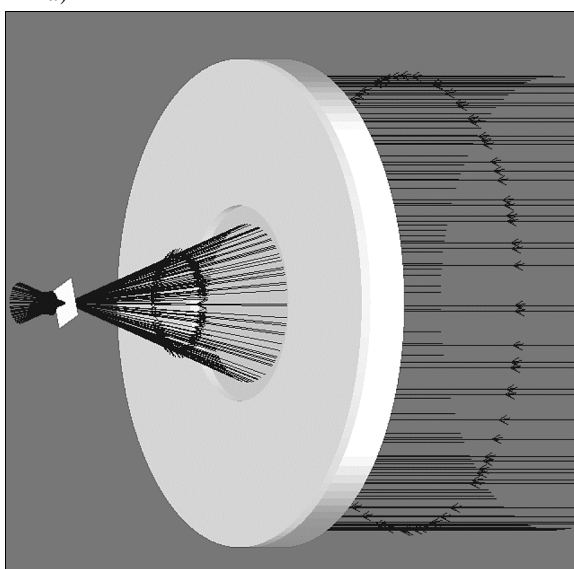
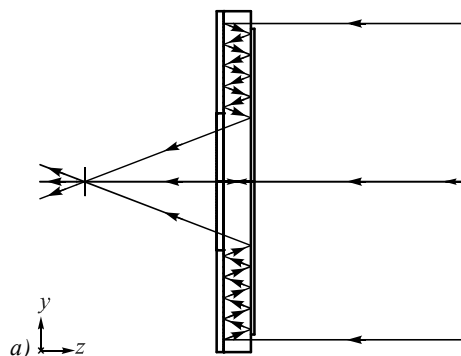


Рис. 4. Трассировка лучей через планарный кольцевой изображающий объектив: двумерная схема (а), трехмерная схема (б)

Из рис. 4 видно, что система действительно имеет фокальную точку, следовательно, является изображающей, по крайней мере для осевых точек. Далее была построена функция рассеяния точки. Для этого регистрирующей поверхностью был просканирован

небольшой отрезок вдоль оптической оси. Распределение интенсивности в любой плоскости, кроме фокальной, в такой системе представляет собой световое кольцо (рис. 5а). В найденной в ходе этого сканирования фокальной плоскости распределение интенсивности было довольно компактным (рис. 5б) и представляет собой функцию рассеяния точки изображающей системы классической формы.

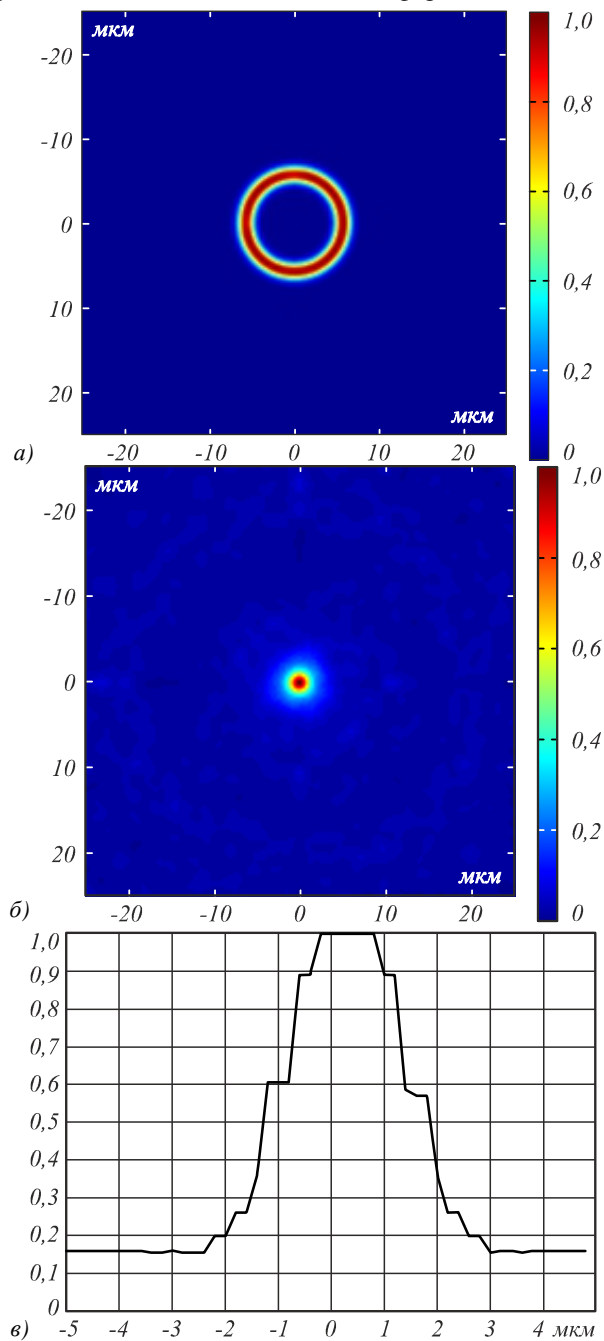


Рис. 5. Типичный вид распределения интенсивности на регистрирующей поверхности вне фокальной плоскости (а), функция рассеяния точки (б), сечение функции рассеяния точки (в)

Ширина функции рассеяния точки по полуспаду составила около 4 мкм, что является достаточно хорошим значением, и можно утверждать, что система пригодна для формирования изображения. Однако

следует помнить, что из-за сужения входной апертуры в такой системе должны присутствовать дифракционные эффекты, что неизбежно даст ухудшение частотно-контрастной характеристики.

Рассмотрим, как этот объектив будет работать с внеосевыми точками. Для этого сформируем на входе параллельный пучок лучей с наклоном $0,7^\circ$ к оптической оси, это еще находится в поле зрения объектива.

На рис. 6 представлены ход лучей в двумерном (рис. 6а) и трехмерном виде (рис. 6б), а также функция рассеяния точки для этого случая (рис. 6в).

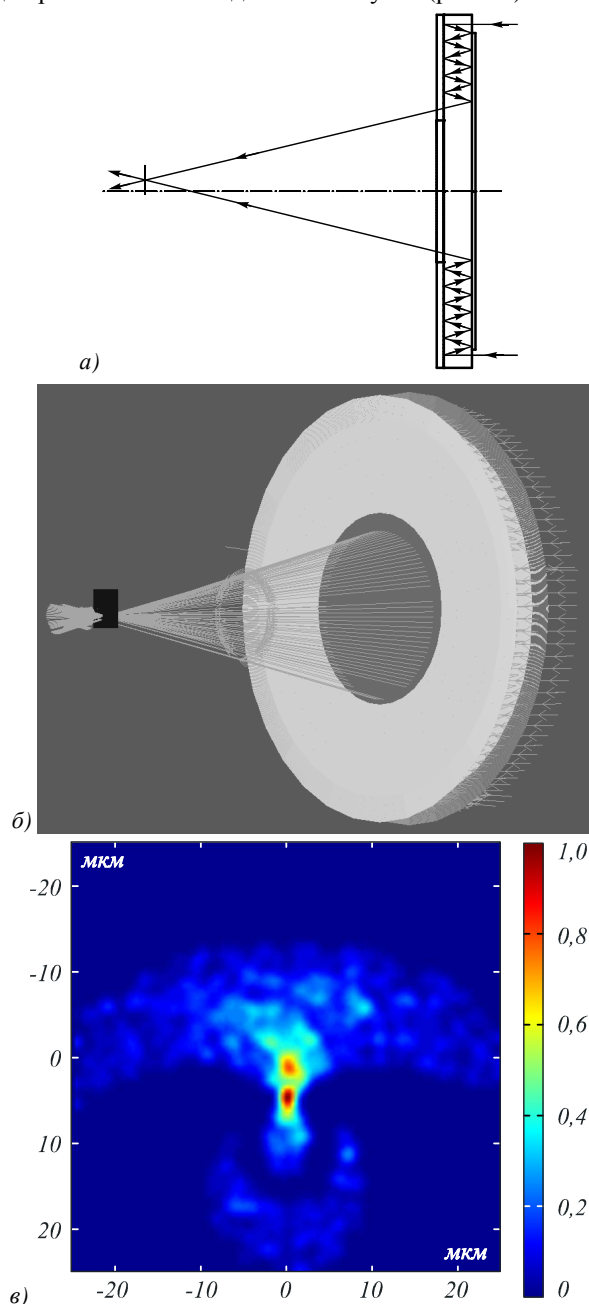


Рис. 6. Ход лучей в двумерном виде (а) и трёхмерном виде (б), функция рассеяния точки (в)

Как видно из рис. 2в, функция рассеяния точки в этом случае уширяется по сравнению с осевой точкой, однако в целом её ширина по полуспаду составляет около 10 мкм, что означает существенное увели-

чение аберраций. Но такая функция рассеяния точки, дает основание говорить об объективе с разрешением порядка 50 л/мм. Т.е. такой объектив действительно является изображающей системой, более того, этот объектив можно использовать с современными светочувствительными матрицами.

Такая система может найти практическое использование там, где важна компактность и не очень важна светосила объектива.

Заключение

Рассмотрена концепция компактного кольцевого планарного объектива из гармонической линзы и двух зеркал на разных поверхностях пластины. На примере объектива с фокусным расстоянием 50 мм и диаметром 25 мм показано, что такой объектив можно сделать существенно более коротким по сравнению с величиной фокусного расстояния. Получена функция рассеяния точки такой системы как на оси (ширина около 4 мкм), так и по краю поля зрения под углом в $0,7^\circ$ (ширина около 10 мкм), параметры которой позволяют говорить о возможности практического использования представленного объектива.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6.

Литература

1. **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. – DOI: 10.1364/AO.36.004744.
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. Волотовский // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-434.
3. **Sweeney, D.W.** Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // *Applied Optics*. – 1995. – Vol. 34, Issue 14. – P. 2469-2475. – DOI: 10.1364/AO.34.002469.
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. – Т. 39, № 3. – С. 363-369.
5. **Nikonov, A.** Fresnel lens imaging with post-capture image processing / A. Nikonov, R. Skidanov, V. Fursov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich // *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. – 2015. – P. 33-41. – DOI: 10.1109/CVPRW.2015.7301373.
6. **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, Issue 2. – P. 1202-1220. – DOI: 10.1364/OE.25.001202.
7. **Теребиж, В.Ю.** Современные оптические телескопы / В.Ю. Теребиж. – М.: Физматлит, 2005. – 80 с. – ISBN: 5-9221-0586-8.

Сведения об авторах

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 – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, профессором кафедры технической кибернетики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 160 статей, 7 монографий. E-mail: romans@smr.ru.

Стрелков Юрий Станиславович, аспирант 2-го года обучения 6-го факультета Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. E-mail: StrelkovUS163@gmail.com.

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 ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: разработка программного обеспечения расчёта и моделирования работы элементов дифракционной оптики. E-mail: sv@smr.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 3 октября 2017 г. Окончательный вариант – 6 декабря 2017 г.

HARMONIC LENS WITH AN ANNULAR APERTURE

R.V. Skidanov^{1,2}, Y.S. Strelkov^{1,2}, S.G. Volotovskiy^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

²Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

We have considered the design of a compact imaging lens based on a reflective circular harmonic lens. The performance of such a lens has been numerically simulated in the ZEMAX program. A point spread function has been calculated. A number of formulae describing the relation-

ship between the key parameters of the lens have been obtained. We have shown that in this case it is possible to design a compact imaging lens whose length is by an order of magnitude smaller than its focal length.

Keywords: harmonic lens, imaging system, lens, circular aperture.

Citation: Skidanov RV, Strelkov YS, Volotovskiy SG. Harmonic lens with an annular aperture. *Computer Optics* 2017; 41(6): 842-847. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-842-847.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science task No. 3.3025.2017/4.6.

References

- [1] Dobson SL, Sun P, Fainman Y Diffractive lenses for chromatic confocal imaging. *Appl Opt* 1997; 36(20): 4744-4748. DOI: 10.1364/AO.36.004744.
- [2] Kazanskii NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multilevel diffractive lens // *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-434.
- [3] Sweeney DW, Sommargren GE Harmonic diffractive lenses. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2469-2475. DOI: 10.1364/AO.34.002469.
- [4] Khonina SN, Ustinov AV, Skidanov RV, Morozov AA Comparative study of the spectral characteristics of aspheric lenses [In Russian]. *Computer Optics* 2015; 39(3): 363-369.
- [5] Nikonov A, Skidanov R, Fursov V, Petrov M, Bibikov S, Yuzifovich Y. Fresnel lens imaging with post-capture image processing. *Proc CVPRW* 2015: 33-41. DOI: 10.1109/CVPRW.2015.7301373.
- [6] Rosli A, Manaf A, Sugiyama T, Yan J. Design and fabrication of Si-HDPE hybrid Fresnel lenses for infrared imaging systems. *Opt Express* 2017; 25(2): 1202-1220. DOI: 10.1364/OE.25.001202.
- [7] Terebizh VYu. Modern optical telescopes [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2005. ISBN: 5-9221-0586-8.

Authors' information

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 University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies laboratory of Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of professor at SSU’s Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 160 scientific papers, 7 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: romans@smr.ru.

Yurii Stanislavovich Strelkov (b. 1992), postgraduate of second year of study of 6th faculty of Samara National Research University. E-mail: StrelkovUS163@gmail.com.

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 IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: software design, modeling of systems with diffractive optical elements. E-mail: sv@smr.ru.

Received October 3, 2017. The final version – December 6, 2017.