

РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ТРЁХВОЛНОВОГО ДИФРАКЦИОННОГО ФОКУСИРУЮЩЕГО ДУБЛЕТА

С.В. Карпеев^{1,2}, А.В. Устинов^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Аннотация

Исследованы возможности создания чисто дифракционного фокусирующего дублета, состоящего из двух разнесённых в пространстве элементов и обеспечивающего фокусировку в один и тот же фокус для трех монохроматических источников с разными длинами волн. Проанализированы характеристики рассчитанного дублета. Путём численного моделирования получены полихроматические фокальные распределения для разработанной системы.

Ключевые слова: хроматизм, дифракционная линза, аксикон, сегментированный фокусирующий элемент.

Цитирование: Карпеев, С.В. Расчёт и анализ трёхволнового дифракционного фокусирующего дублета / С.В. Карпеев, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 173-178. – DOI: 10.18287/2412-6179-2015-40-2-173-178.

Введение

Достоинства и недостатки, сопровождающие применение ДОО, хорошо известны [1]. Основной проблемой, возникающей при использовании ДОО в полихроматическом излучении, является их высокий хроматизм, делающий практически невозможным использование одиночной дифракционной линзы в изображающих системах [2, 3], хотя для других применений [4, 5] это может и не быть препятствием. Наибольшее внимание исследователей привлекали гибридные дифракционно-рефракционные оптические системы [6, 7], обеспечивающие эффективную коррекцию хроматических aberrаций. Однако с точки зрения использования главного преимущества дифракционной оптики – её малого веса, такие системы представляли собой определённый компромисс, так как включали силовые рефракционные элементы весьма больших габаритов и, следовательно, веса. Создание же чисто дифракционных изображающих систем наталкивается на определённые трудности, поскольку очевидно, что невозможно корректировать хроматизм путём комбинации собирающих дифракционных линз, распределяя оптическую силу на несколько элементов.

Известен подход к коррекции хроматизма путём комбинирования двух чисто дифракционных элементов: рассеивающего и собирающего – с разными оптическими силами [8, 9]. Ахроматизация дифракционного дублета достигается за счет дифракционных оптических элементов с модифицированным законом изменения пространственной частоты. В работах [10–13] ахроматизация достигается за счет использования дифракционных линз с разными оптическими силами, что приводит к увеличению оптических сил входящих в него линз по сравнению с эквивалентной одиночной линзой и порождает дополнительные технологические проблемы. К тому же такой метод позволяет проводить ахроматизацию для достаточно узкого спектрального интервала. Например, космический телескоп [14], рассчитанный по такой методике,

имеет полосу частот всего 20 нм (522–542 нм). Наиболее перспективным выглядит применение ДОО при работе с линейчатыми спектрами, когда в спектре имеется несколько узких линий, причём не очень близко расположенных. Такими спектрами обладают, например, двух- или трёхволновые светодиоды или переключаемые по длине волны полупроводниковые лазеры. Именно решению такой задачи и посвящена данная статья.

1. Хроматическая aberrация дифракционных линз

Хроматическая aberrация дифракционной линзы физически объясняется зависимостью угла отклонения света дифракционной решёткой от длины волны. В отличие от дифракционной линзы причиной хроматической aberrации рефракционной линзы является зависимость показателя преломления от длины волны. Данный факт объясняет принципиальное отличие методов коррекции хроматических aberrаций для дифракционных и рефракционных линз. Для рефракционных линз существует широкая номенклатура марок оптического стекла с разными показателями преломления и коэффициентами дисперсии. Расчёт ахроматизированных объективов из рефракционных компонент [15] основан на использовании для разных линз разных марок стекла. Показано, что рефракционный дублет (состоящий из двух линз) обеспечивает ахроматизацию для двух длин волн. К сожалению, подобных способов управления хроматической aberrацией для дифракционных линз не существует. Хроматическая aberrация дифракционной линзы [1] зависит от высоты рельефа (сколько целых длин волн составляет оптическая длина пути), но технологические ограничения на сегодняшний день таковы, что создать сколь угодно светосильную линзу с высоким рельефом не представляется возможным. Поэтому мы сосредоточимся на рассмотрении способов ахроматизации дифракционных оптических систем с высотой рельефа, создающего разность хода в одну длину волны. Конкретная форма профиля будет уточняться позже на основе результатов моделирования.

Рассмотрим освещение бинарной дифракционной линзы радиусом 2 мм с фокусным расстоянием $f = 100$ мм точечным источником света, расположенным от линзы на расстоянии 50 000 мм на оптической оси. На рис. 1 показаны результаты численного моделирования распределения интенсивности на оптической оси для света разных длин волн ($\lambda_0 = 0,55$ мкм, $\lambda_1 = 0,45$ мкм, $\lambda_2 = 0,65$ мкм).

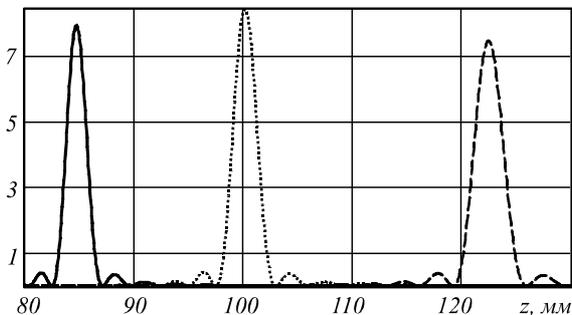


Рис. 1. Фокусировка с помощью бинарной линзы при длинах волн излучения $\lambda_0 = 0,55$ мкм (точечная линия), $\lambda_1 = 0,45$ мкм (пунктирная линия), $\lambda_2 = 0,65$ мкм (сплошная линия)

На рисунке хорошо видно, что разные длины волн фокусируются на расстояниях от линзы, обратно пропорциональных длинам волн, что давно хорошо известно (например, [1]). В результате ни в одной плоскости резкого полихроматического изображения точки не будет. Данный факт усугубляется ещё и тем, что данная высота рельефа (выбранная, например, для длины волны 555 нм) для других длин волн не является оптимальной, что хорошо видно на рис. 1.

2. Основные принципы расчёта трёхволнового фокусирующего дифракционного дублета

Основная идея, заложенная при расчёте ахроматического дифракционного дублета (состоящего из двух дифракционных линз), состоит в раздельной фокусировке разных длин волн. Очевидно, что для этого необходимо пространственное разделение по длинам волн. Разделяющим элементом может быть дифракционная решётка, причём для центрированных оптических систем эта решётка должна быть круговой. Такой элемент хорошо известен – это дифракционный аксикон с периодом d . Аксикон в данном случае играет роль диспергирующего элемента.

Схема расчёта дифракционного дублета [6], основанного на диспергирующем действии аксикона, с указанием хода лучей двух разных длин волн приведена на рис. 2.

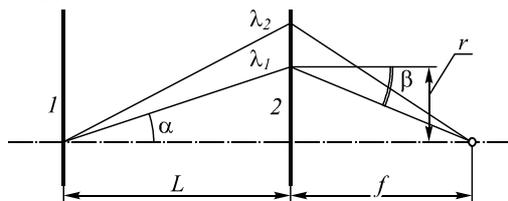


Рис. 2. Схема расчета дифракционного дублета, включающего аксикон

В зависимости от длины волны лучи, падающие на аксикон 1, дифрагируют под разными углами α и

попадают в различные зоны элемента 2. Рассмотрим, каким образом можно сфокусировать падающее на дифракционный оптический элемент 2 излучение, разделённое по различным кольцам для разных длин, в общий фокус на оптической оси. Нужно рассчитать элемент 2 с периодом D , меняющимся по радиусу так, чтобы на оптической оси формировался фокус. Таким образом, элемент 2 выполняет функцию линзы, то есть фокусировки в точку, но в отличие от обычной дифракционной линзы в его фазовой функции должны учитываться меняющиеся по радиусу длины волны падающего излучения. Хроматические свойства некоторых асферических линз были также рассмотрены в работе [16].

На элемент 2 лучи падают под углом α , который определяется из угла дифракции на аксиконе $\sin \alpha = m\lambda/d$, где m – номер порядка дифракции на аксиконе. Угол β между оптической осью и лучом, выходящим из точки элемента 2 на высоте r , определяется из рис. 2:

$$\operatorname{tg} \beta = r / f , \tag{1}$$

где f – фокусное расстояние.

В таком случае направления на максимумы амплитуды после прохождения элемента 2 получаются из равенства:

$$D(\sin \beta - \sin \alpha) = M \lambda , \tag{2}$$

где M – номер порядка дифракции на элементе 2. Так как надо отклонить луч в другую сторону по сравнению с первым элементом, надо считать M отрицательным. Далее везде в формулах M положительно, но знак минус поставлен перед M .

Из (2) имеем $\sin \beta = \sin \alpha - M\lambda/D$; подставив $\sin \alpha = m\lambda/d$, получим

$$\sin \beta = \lambda \left(\frac{m}{d} - \frac{M}{D} \right) . \tag{3}$$

Так как угол предполагается отрицательным, то должно выполняться неравенство

$$M > m(D / d) . \tag{4}$$

Предположим, что это неравенство выполнено, тогда сменим отсчёт поворота и сделаем угол положительным: $\sin \beta = \lambda(M/D - m/d)$. Выражая тангенс через синус, после приравнивания к величине (1) получим выражение для мгновенного периода:

$$D(r) = M \lambda \frac{d \sqrt{r^2 + f^2}}{dr + m \lambda \sqrt{r^2 + f^2}} . \tag{5}$$

Зная период, находим фазовую функцию элемента:

$$\psi(r) = - \frac{2\pi}{\lambda M} \cdot \left\{ \frac{r^2}{\sqrt{r^2 + f^2}} + \frac{m\lambda r}{d} \right\} . \tag{6}$$

Единственное направление, в котором просматривается использование такой системы, – это работа с линейчатыми спектрами, когда в спектре имеется несколько узких линий, причём не очень близко распо-

ложенных. Необходимый спектральный интервал между линиями зависит от диаметра входного зрачка системы. Простой расчёт показывает, что для длин волн, показанных на рис. 1, радиус входного зрачка может быть не более 2 мм. В этом случае можно создать сегментированный элемент 2, внутри каждого сегмента которого фазовая функция будет описываться выражением (6) для своей длины волны. При этом сегменты не будут перекрываться.

3. Численное моделирование работы дифракционного дублета

Моделирование работы дифракционного дублета проводилось для указанных выше параметров. Картины дифракции, приведённые на рис. 3, дают представление о структуре пучков разных длин волн в плоскости на расстоянии 100 мм от плоскости аксикона.

На рис. 3 показаны результаты действия дифракционных аксиконов диаметром 4 мм для света разных длин волн ($\lambda_0 = 0,55$ мкм, $\lambda_1 = 0,45$ мкм, $\lambda_2 = 0,65$ мкм).

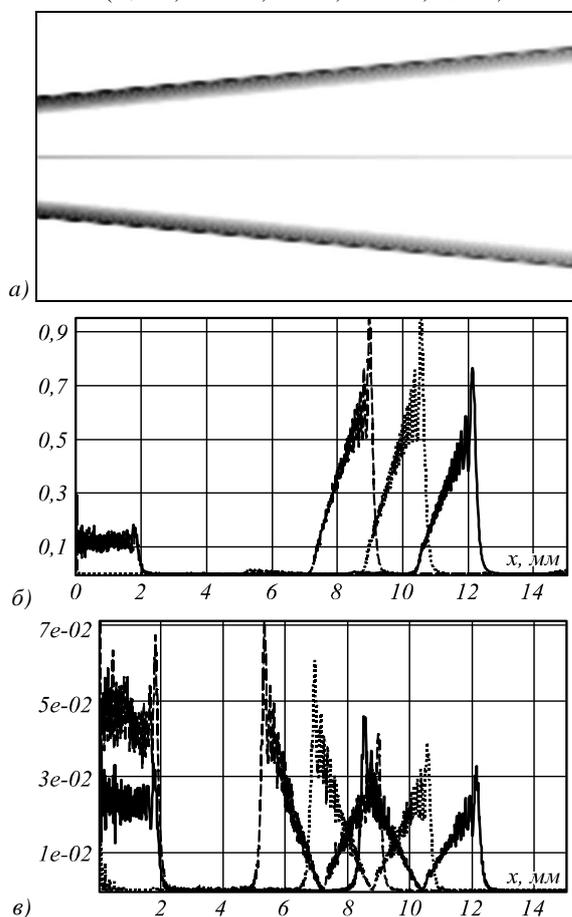


Рис. 3. Действие дифракционного аксикона: распределение на расстоянии $z=100$ мм от аксикона для многоуровневого рассеивающего аксикона (б) и бинарного аксикона (в) (типы линий в соответствии с рис. 1)

На рис. 3а показан ход расходящихся лучей для базовой длины волны λ_0 в сагиттальной плоскости (размер по вертикали – 30 мм, размер по горизонтали – от 50 мм до 110 мм от плоскости аксикона). На рис. 3б показано распределение интенсивности в плоскости, перпенди-

кулярной оптической оси на расстоянии 100 мм от аксикона для рассеивающего аксикона с профилем зоны, близким к непрерывному, на рис. 3в – то же для бинарного аксикона (видны расходящаяся и сходящаяся волны). Видно, что из-за различия углов дифракции на рис. 3б произошло почти полное пространственное разделение пучков разных длин волн. Незначительное перекрытие максимального радиуса пучка одной длины волны с минимальным радиусом другой не может оказывать сильного влияния, на рис. 3 хорошо видно, что интенсивность для минимальных радиусов невелика вследствие малой площади соответствующих центральных колец на аксиконе.

На рис. 3б,в вокруг оптической оси хорошо виден нулевой порядок, причём для бинарного аксикона его интенсивность существенно зависит от длины волны (выше уже обращалось внимание на это явление). Моделирование (см. рис. 3в) показывает, что у бинарного аксикона даже для указанных длин волн, расстояние между которыми 100 нм, происходит перекрытие порядков (красного и синего цветов), и использовать такой аксикон невозможно. Перекрытие порядков можно устранить, если закрыть центральную зону аксикона диафрагмой, радиус которой определяется углами дифракции максимальной и минимальной длин волн. Но и в этом случае можно использовать только один порядок. Из геометрических соображений ясно, что наиболее компактная система получается, если использовать расходящийся волновой фронт после аксикона. Учитывая пространственное разделение по длинам волн кольцевых распределений, падающих на элемент 2 (см. рис. 3б), можно сделать сегментированный фокусирующий элемент (рис. 4), каждый сегмент которого будет иметь фазовую функцию (6) и высоту рельефа, рассчитанную для соответствующей длины волны.

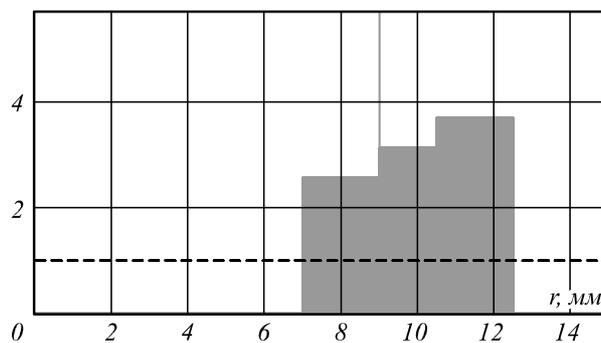


Рис. 4. Высота рельефа сегментированного элемента

Здесь важно отметить, что «платой» за устранение хроматизма будет зависимость числовой апертуры дублета от длины волны. Действительно, легко видеть, что распределение длин волн по радиальной координате приводит к тому, что для больших длин волн (которые дальше от оптической оси) числовая апертура будет больше. Как видно из результатов моделирования (рис. 5), продольная хроматическая aberrация не превышает 0,2 мм для выбранных параметров, а энергетическая эффективность различается не более чем на 20%.

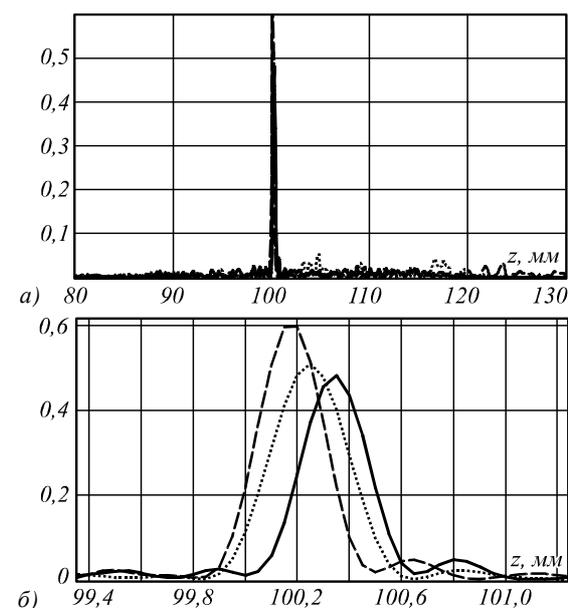


Рис. 5. Действие тандема из аксикона и 3-сегментного ахроаксикона с соответствующей частотой и высотой в каждом сегменте

Результат достаточно хороший, но он получен, к сожалению, для случая линейчатого спектра, который на практике, как уже указывалось, встречается достаточно редко. Из рис. 3б видно, что при уменьшении расстояния между спектральными линиями (что соответствует переходу к непрерывному спектру или с математической точки зрения переходу от ряда Фурье к интегралу Фурье) будет наблюдаться перекрытие спектральных зон в излучении, попадающем на «ахроаксикон», и, соответственно, станет невозможным точное сегментирование. Для компенсации этого явления можно лишь уменьшать размер входного зрачка.

Заключение

Проведён расчёт и исследование чисто дифракционного дублета с точки зрения коррекции хроматической aberrации. Показана возможность создания светосильного дублета для линейчатого спектра входного излучения. Предложено решение в виде зонированного элемента для линейчатого спектра. Разработана методика определения параметров компонент для реализации зонированного элемента. Проведено численное моделирование работы зонированного элемента, и показано полное устранение хроматизма для осевого пучка.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-31-00014).

Литература

1. **Бобров, С.Т.** Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.

2. **Грейсух, Г.И.** Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2005. – Вып. 28. – С. 60-65.

3. **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. – Т. 38, № 3. – С. 425-434.

4. **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. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.

5. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217.

6. **Грейсух, Г.И.** Высокорастворяющий дифракционно-градиентный объектив / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 3. – С. 59-62.

7. **Грейсух, Г.И.** Коррекционные возможности гибридного объектива, состоящего из двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67, № 10. – С. 48-52.

8. **Farn, M.W.** Diffractive doublets corrected at two wavelengths / M.W. Farn, J.W. Goodman // Journal of the Optical Society of America A. – 1991. – Vol. 8, Issue 6. – P. 860-867.

9. **Грейсух, Г.И.** Анализ возможностей ахроматизации оптических систем, состоящих из дифракционных элементов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 187-193.

10. **Мустафин, К.С.** Расчёт ахроматизированных голограммных линзовых систем на основе принципа таутохронизма лучей / К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44, Вып. 1. – С. 164-167.

11. **Bennett, S.J.** Achromatic combinations of hologram optical elements / S.J. Bennett // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15, Issue 2. – P. 542-545.

12. **Sweatt, W.C.** Achromatic triplet using holographic optical elements / W.C. Sweatt // Applied Optics. – 1977. – Vol. 16, Issue 5. – P. 1390-1391.

13. **Weingärtner, I.** Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements / I. Weingärtner // Optics Communications. – 1986. – Vol. 58, Issue 6. – P. 385-388.

14. **Andersen, G.** Broadband antihole photon sieve telescope / G. Andersen, D. Tullson // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, Issue 18. – P. 3706-3708.

15. **Слюсарев, Г.Г.** Расчёт оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 641 с.

16. **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

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

Устинов Андрей Владимирович, 1968 года рождения, в 1991 году окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва (КуАИ) по специальности «Прикладная математика», работает ведущим программистом в Институте систем обработки изображений РАН; защитил кандидатскую диссертацию в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика, разработка программ моделирования работы оптических элементов; обработка изображений, в частности, гидродинамических и биомедицинских процессов. E-mail: andr@smr.ru.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Поступила в редакцию 28 марта 2016 г. Окончательный вариант – 7 апреля 2016 г.

DESIGN AND ANALYSIS OF A THREE-WAVE DIFFRACTION FOCUSING DOUBLET

S.V. Karpeev^{1,2}, A.V. Ustinov^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}

¹ *Samara State Aerospace University, Samara, Russia,*

² *Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia*

Abstract

We study the possibility of creating a purely diffractive focusing doublet consisting of two components that are spaced apart. This doublet is able to focus light from three monochromatic sources with different wavelengths into the same focal spot. We analyze the characteristics of the designed doublet. Polychromatic focal distributions generated by the developed system are numerically calculated.

Keywords: chromatism, diffractive lens, axicon, segmented focusing element.

Citation: Karpeev SV, Ustinov AV, Khonina SN. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet. *Computer Optics* 2016; 40(2): 173-8. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-173-178.

Acknowledgement: This work was financially supported by Russian Science Foundation (grant No. 14-31-00014).

References

- [1] Bobrov ST, Greysukh GI, Turkevich YuG. Optics of diffractive elements and systems [In Russian]. Leningrad: Mashinostroyeniye; 1986.
- [2] Greysukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Comparative analysis of the chromatism of diffractive and refractive lenses [In Russian]. *Computer Optics* 2005; 28: 60-65.
- [3] Kazanskiy NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multi-level diffractive lens. *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-434.
- [4] Karpeev SV, Alferov SV, Khonina SN, Kudryashov SI. Study of the broadband radiation intensity distribution formed by diffractive optical elements. *Computer Optics* 2014; 38(4): 689-694.
- [5] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on the convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217.
- [6] Greysukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. High-resolution diffractive-gradient lens. *Journal of Optical Technology* 2001; 68(3): 59-62.
- [7] Greysukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Correction possibilities of the hybrid lens composed of two diffractive lenses and lens glued Wood. *Journal of Optical Technology* 2000; 67(10): 48-52.
- [8] Farn MW, Goodman JW. Diffractive doublets corrected at two wavelengths. *J Opt Soc Am A* 1991; 8(6): 860-867.
- [9] Greysukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Optical systems with diffractive elements: ways of the chromatism correction [in Russian]. *Computer Optics* 2010; 34(2): 187-193.
- [10] Mustafin KS. Calculation of achromatic hologram lens systems based on the tautochronism principle of rays. *Optics and Spectroscopy* 1978; 44(1): 164-167.
- [11] Bennett SJ. Achromatic combinations of hologram optical elements. *Applied Optics* 1976; 15(2): 542-545.
- [12] Sweatt WC. Achromatic triplet using holographic optical elements. *Applied Optics* 1977; 16(5): 1390-1391.
- [13] Weingärtner I. Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements. *Optics Communications* 1986; 58(6): 385-388.
- [14] Andersen G, Tullson D. Broadband antihole photon sieve telescope. *Applied Optics* 2007; 46(18): 3706-3708.
- [15] Slusarev GG. Design of optical systems [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroyeniye" Publisher; 1975.

- [16] Khonina SN, Ustinov AV, Skidanov RV, Morozov AA. Comparative study of the spectral characteristics of aspheric lenses. *Computer Optics*. 2015; 39(3): 363-369.

Authors' information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@smr.ru .

Andrey Vladimirovich Ustinov, (b. 1968) graduated from Kuibyshev Aviation Institute named after academician S.P. Korolyov (KuAI), majoring in Applied Mathematics, works as the leading programmer in the Image Processing Systems Institute of the RAS; has defended candidate thesis at Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, software design for modeling of optical elements operating; images processing, particularly images of hydrodynamic processes and biomedical images. E-mail: andr@smr.ru .

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Main researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru .

Received March 28, 2016. The final version – April 7, 2016.
