

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-73-81

УДК 53.06

Ахроматические изображающие линзы с несколькими фокусами

СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ДУБЫНИН¹, СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ КОПЁНКИН²,
АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПУТИЛИН³, АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ МОРОЗОВ⁴,
НИКОЛАЙ АНДРЕЕВИЧ ПУТИЛИН⁵, ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ БОРОДИН⁶,
ВЛАДИСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ ДРУЖИН⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

^{3, 5, 6}Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

⁷Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹dubyninse@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>

²kopenkinss@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>

³putilinan@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>

⁴morozovav@lebedev.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>

⁵nick.putilin.01@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>

⁶yuri.borodin47@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>

⁷druzhin@bmstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовались полноцветные голографические/дифракционные оптические элементы, которые представляют собой ахроматические линзы с несколькими фокусами. Также были затронуты вопросы моделирования и записи таких элементов и их эффективности. **Цель работы.** Создание компактных оптических систем для устройств дополненной/смешанной реальности с большим полем зрения и большим выходным зрачком. **Метод.** Аналоговая схема регистрации голограмм с несколькими источниками в предметной ветви. Использование специализированного программного обеспечения MatLab и Optic Studio для моделирования и оценки параметров оптических систем устройств дополненной/смешанной реальности. **Основные результаты.** Авторами предложены несколько модификаций таких элементов, путём моделирования проведена оценка возможностей и ограничений каждого варианта, а также экспериментальное исследование параметров изготовленных образцов, на основании чего была выбрана наиболее оптимальная реализация. Была получена суммарная для всех выходных зрачков дифракционная эффективность таких элементов 30–40% на каждой из трёх длин волн в цветовой модели Красный/Зелёный/Синий. **Практическая значимость.** Предложенные в работе технические решения в части регистрации голограмм с несколькими источниками в предметной ветви позволяют существенно увеличить размеры выходного зрачка при сохранении большого углового поля зрения, снизить габариты и массу устройства виртуальной и дополненной реальности.

Ключевые слова: голографический оптический элемент, многофокусная линза, размножитель зрачка

Ссылка для цитирования: Дубынин С.Е., Копёнкин С.С., Путилин А.Н., Морозов А.В., Путилин Н.А., Бородин Ю.П., Дружин В.В. Ахроматические изображающие линзы с несколькими фокусами // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 73–81. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-73-81>

Коды OCIS: 030.6140, 050.1950, 050.1970, 050.7330, 090.1970, 090.2820, 090.2870, 090.2890, 090.7330.

Multifocal achromatic imaging lenses

SERGEY E. DUBYNIN¹, SERGEY S. KOPENKIN², ANDREY N. PUTILIN³, ALEKSANDR V. MOROZOV⁴,
NIKOLAY A. PUTILIN⁵, YURIY P. BORODIN⁶, VLADISLAV V. DRUZHIN⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{3, 5, 6}Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

⁷Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹dubyninse@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>

²kopenkinss@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>

³putilinan@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>

⁴morozovav@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>

⁵nick.putilin.01@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>

⁶yuri.borodin47@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>

⁷druzhin@bmstu.ru <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>

Abstract

Subject of study. The full-color holographic/diffraction optical elements inherently representing the multifocal achromatic imaging lenses were investigated. The tasks of modeling and recording of these elements were also discussed. **Aim of study.** The research and development of compact optical systems for Augmented Reality/Mixed Reality/Extended Reality devices with wide field of view and eye-box is the main target. **Method.** The analog recording scheme with several sources in signal branch was used. The specialized software MatLab and Optic Studio was used for modeling and evaluation of parameters of the optical systems of the Augmented Reality/Mixed Reality/Extended Reality devices. **Main results.** The authors have proposed several modifications of such elements; the possibilities and limitations of each variant, and also the parameters of the prepared samples were evaluated by means of simulation, on the bases of which the best sample was chosen. The total efficiency of 30–40% for such elements was achieved for each wavelength in Red-Green-Blue color model (460, 514/532, 640 nm). **Practical significance.** The technology for registration of holograms with several sources in signal branch allows to significantly enlarge the size of the eye-box without sacrificing the width of the angular field of view, to downsize the device of virtual and augmented reality.

Keywords: holographic optical element, multifocal lens, eye-box multiplier

For citation: Dubynin S.E., Kopenkin S.S., Putilin A.N., Morozov A.V., Putilin N.A., Borodin Y.P., Druzhin V.V. Multifocal achromatic imaging lenses [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 4. P. 73–81. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-73-81>

OCIS codes: 030.6140, 050.1950, 050.1970, 050.7330, 090.1970, 090.2820, 090.2870, 090.2890, 090.7330.

ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии развиваются ускоренными темпами и также быстро и всё сильнее внедряются в нашу повседневную жизнь: многими процессами управляет искусственный интеллект, а человек всё чаще погружается в виртуальный мир. Более широкое и частое применение находят в нём технологии виртуальной реальности, а также дополненная/смешанная/расширенная реальность, которые удачно вписываются в современные многозадачность и темп [1–3].

В сегменте очков для виртуальной реальности представлено множество устройств различ-

ной ценовой категории, качества и удобства, но, как правило, все они имеют центрированную оптическую систему без или с изломом оптической оси. Не в таком количестве, но и на рынке устройств дополненной/смешанной реальности также представлены успешные коммерческие образцы, такие как HoloLens 1 и 2, Magic Leap, WaveOptics. Они все в своей основе имеют световоды, причём несколько — для ахроматизации, что усложняет сборку и повышает стоимость, большие габариты (не у всех), ограниченное поле зрения (у большинства устройств составляет 40°, а максимально достигнутое значение не превышает 60°).

Решая задачу удобства и компактности устройств дополненной реальности, коллективом была собрана схема записи и изготовлены полноцветные (для кодирования цвета в цветовой модели в качестве красной компоненты выбрана длина волны 640 нм, в качестве зелёной компоненты — длина волны 532 нм и в качестве синей компоненты — длина волны 460 нм) образцы голографического оптического элемента (ГОЭ) для подобных устройств. Поле зрения ГОЭ составляет 90° , дифракционная эффективность — порядка 45%, однородность по полю — свыше 80% на каждой длине волны, но размер зрачка всего лишь 1,5 мм, что при таком огромном поле является существенной проблемой, поскольку при попытке перевести взгляд на объект вне оси картинка тут же полностью пропадает. Любые попытки увеличить зрачок приводят к снижению поля зрения, существенным искажениям и значительным потерям по яркости. Размножение

зрачка было выбрано как наиболее оптимальный вариант решения данной задачи: в этом случае aberrации не будут превышать значений для ранее полученных образцов, поле зрения не сократится, степень снижения яркости напрямую зависит от количества зрачков и является компромиссом, а не просто «размывается» по большей площади. Это заключение подтверждается рядом публикаций [4–8].

РАЗМНОЖЕНИЕ ЗРАЧКА

В ходе экспериментов по записи высокоопертурных голографических линз для различных задач были получены голографические ахроматические внеосевые линзы с большим полем зрения (более 90°) и хорошим качеством, требовалась лишь программная коррекция трапеции. Ограничением служил маленький выходной зрачок, который обратно пропорционален размерам поля зрения. Размножители

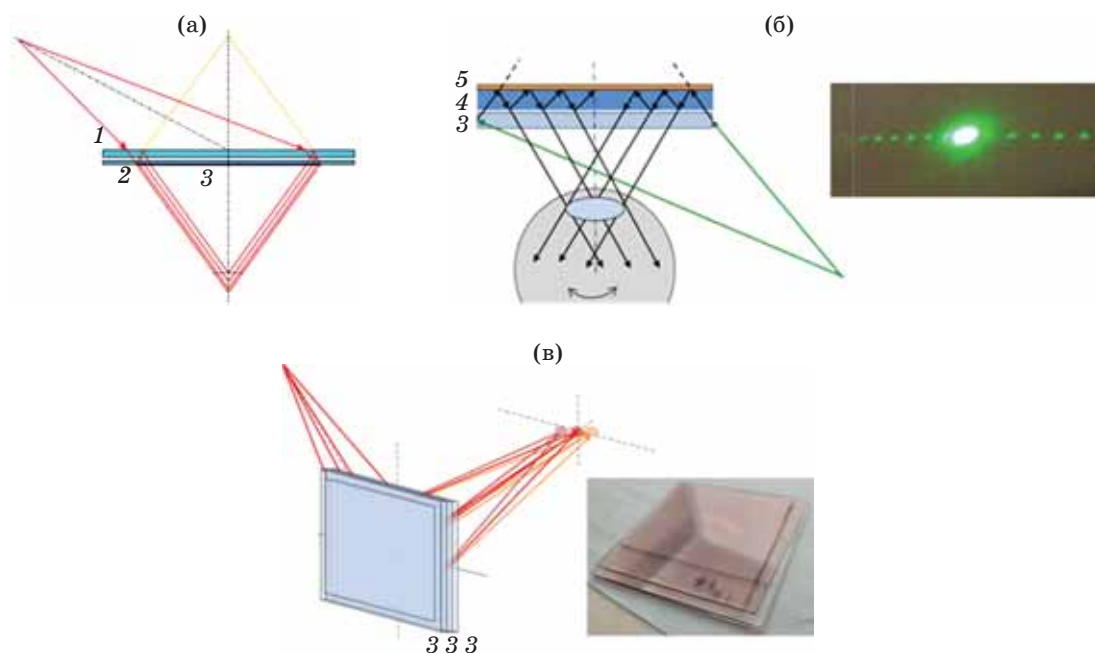


Рис. 1. Варианты размножения выходного зрачка оптической системы. Световодный режим между двумя полупрозрачными зеркалами (а), комбинация голографического оптического элемента в качестве линзы и дифракционной решётки для размножения зрачка (б), многослойная структура из нескольких одинаковых ГОЭ со смещением для разнесения зрачков в пространстве (в): 1, 2 — зеркала с различным коэффициентом отражения, 3 — голографический оптический элемент, 4 — световод, 5 — дифракционный оптический элемент

Fig. 1. Solutions for multiplication of exit pupil. (a) Lightguide mode between two semitransparent mirrors, (б) the combination of holographic lens and diffraction grating for multiplication of exit pupil, (в) multilayer structure from several identical holographic optical elements with shifting for spatial displacement of exit pupil: 1, 2 — the mirrors with different reflection coefficient, 3 — the holographic optical element, 4 — the lightguide, 5 — the diffraction optical element

зрчка на основе световодов в большинстве своём работают с коллимированными пучками, а требовалось найти наиболее простое решение для размножения сфокусированного изображения. Начали с попытки размножить уже имеющийся зрчок. Данный случай имеет несколько возможных реализаций: световодный режим (между двумя полупрозрачными зеркалами (рис. 1а) или комбинация голографического оптического элемента в качестве линзы и дифракционной решётки для размножения зрчка (рис. 1б)); многослойная структура из нескольких одинаковых ГОЭ со смещением для разнесения зрчков в пространстве (рис. 1в).

Каждый из этих вариантов обладает своими существенными недостатками: в первом случае происходит размножение зрчка вдоль оси визирования, а также происходит снижение яркости от зрчка к зрчку; во втором варианте размножение происходит в нужной плоскости, но за счёт фиксированного фокуса ГОЭ-линзы зрчки также имеют и продольное смещение. Главный недостаток третьего варианта — попадание в зрчок одновременно нескольких изображений (рис. 2), а продольный сдвиг зрчков может быть скомпенсирован за счёт использования ГОЭ с разными фокусными расстояниями.

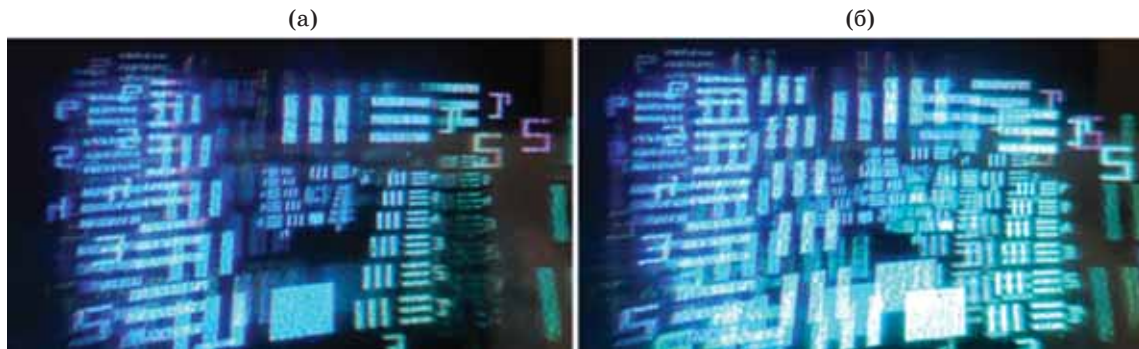


Рис. 2. Переналожение размноженных изображений. На краю поля зрения (а), в центре поля зрения (б)
Fig. 2. Cross-talks between multiplied images. (a) On the edge of the field of view, (b) in the center of the field of view

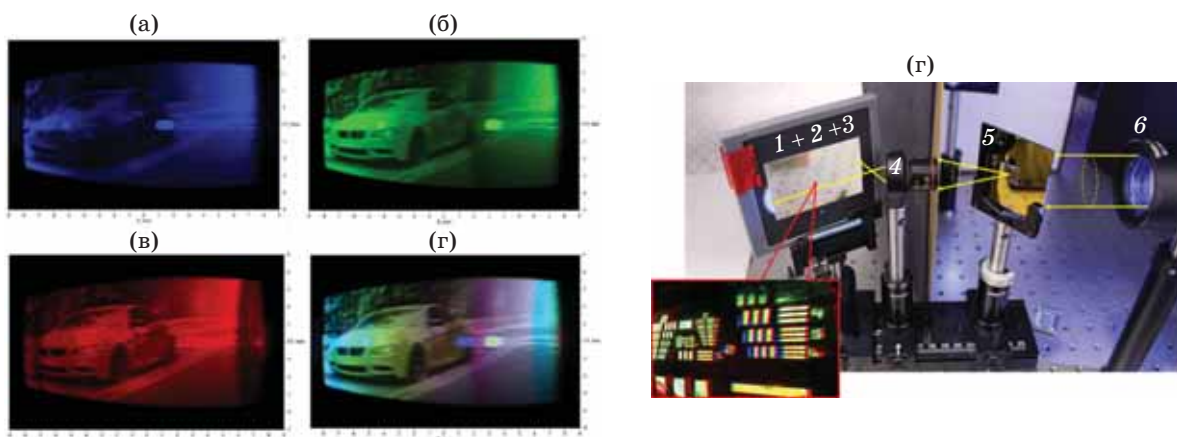


Рис. 3. Комбинация из голографической линзы с одним фокусом, световода и дифракционной решётки. Результат моделирования для длины волны 460 нм (а), для длины волны 532 нм (б), для длины волны 640 нм (в), для трёх длин волн (г), экспериментальная установка (д): 1 — голографический оптический элемент, 2 — световод, 3 — дифракционный оптический элемент, 4 — микроскопический объектив, 5 — тест-объект, 6 — расширитель пучка
Fig. 3. The combination of holographic lens with single focus + lightguide + diffraction grating. (a) The results of modeling for wavelength 460 nm, (б) for wavelength 532 nm, (в) for wavelength 640 nm, (г) for three wavelengths, (д) the experimental setup: 1 — the holographic optical element, 2 — the lightguide, 3 — the diffraction optical element, 4 — the microscope objective, 5 — the test-object, 6 — the beam-expander

Fig. 3. The combination of holographic lens with single focus + lightguide + diffraction grating. (a) The results of modeling for wavelength 460 nm, (б) for wavelength 532 nm, (в) for wavelength 640 nm, (г) for three wavelengths, (д) the experimental setup: 1 — the holographic optical element, 2 — the lightguide, 3 — the diffraction optical element, 4 — the microscope objective, 5 — the test-object, 6 — the beam-expander

В ходе экспериментов для записи ГОЭ использовался фоточувствительный материал Bayfol компании Covestro марок НХ 200 и НХ 120, а ДОО регистрировался как интерференция двух плоских волн от гелий-кадмиевого лазера на фоторезисте Shipley с последующим снятием полимерной копии, отверждаемой под действием ультрафиолета, для последующей работы с полноцветным изображением. Из перечисленных вариантов было решено остановиться на использовании световода и ДОО для размножения зрачка, формируемого ГОЭ (голографической линзой). Для выравни-

вания яркости в каждом из мультиплицированных зрачков и получения оптимального расстояния между зрачками было проведено моделирование в программном комплексе MatLab (рис. 3а) и проведён эксперимент (рис. 3б). Распределение энергии в равных долях предполагалось за счёт переменной дифракционной эффективности размножающей решётки. Оптимальное расстояние было выбрано равным 3–4 мм исходя из размеров зрачка человеческого глаза при нормальной освещённости, так, чтобы наблюдатель всегда видел изображение, но не более одного для

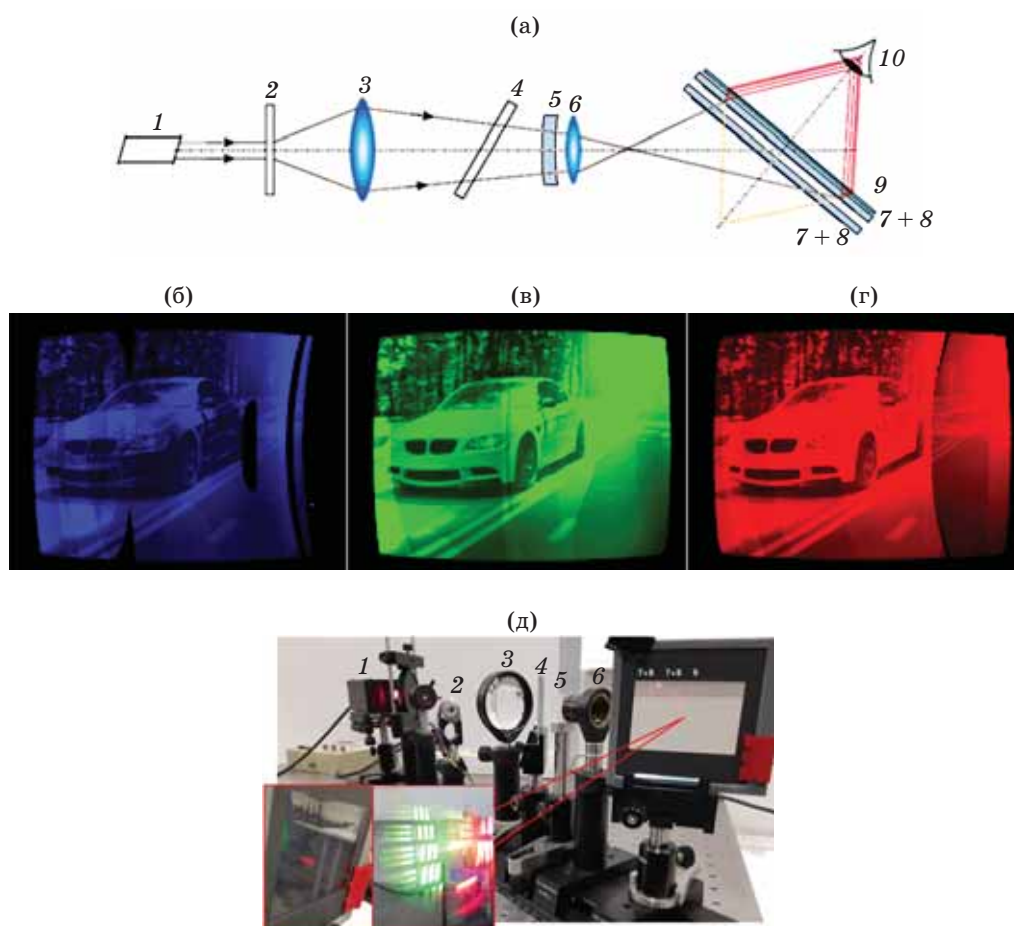


Рис. 4. Комбинация из голографической линзы с одним фокусом, двух световодов и двух дифракционных решёток. Принципиальная схема (а), результат моделирования для длины волны 460 нм (б), для длины волны 532 нм (в), для длины волны 640 нм (г), экспериментальная установка (д): 1 — лазер, 2 — рассеиватель, 3 — линза, 4 — тест-объект, 5 — цилиндрическая линза, 6 — микроскопический объектив, 7 — дифракционный оптический элемент, 8 — световод, 9 — голографический оптический элемент, 10 — глаз наблюдателя

Fig. 4. The combination of holographic lens with single focus + 2 lightguides + 2 diffraction gratings. (a) The principal scheme, (б) the results of modeling for wavelength 460 nm, (в) for wavelength 532 nm, (г) for wavelength 640 nm, (д) the experimental setup: 1 — the laser, 2 — the diffuser, 3 — the lens, 4 — the test-object, 5 — the cylindrical lens, 6 — the microscope objective, 7 — the diffraction optical element, 8 — the lightguide, 9 — the holographic optical element, 10 — eye

исключения переналожений. Результат получился неудовлетворительный из-за значительного хроматизма и дисторсии.

Дальнейшая оптимизация с помощью MatLab показала, что ситуацию может исправить использование двух световодов с рельефной дифракционной решёткой и зазором между элементами в 3,5 мм (рис. 4а). Данный вариант не является уже столь привлекательным ввиду того, что увеличиваются габариты системы и выгода становится не столь очевидна, а также усложняется юстировка такой структуры. При этом результаты моделирования (рис. 4б–4г) показывают значительное улучшение качества формируемого изображения.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЗРАЧКОВ

Было решено осуществить запись многофокусного ГОЭ: когда оптический элемент стро-

ит на конечном расстоянии несколько одинаковых изображений от одного источника. Для этой цели разработана принципиальная оптическая схема (рис. 5), где в предметной ветви сформировано 4 отдельных канала с наклоном оптической оси, соответствующим повороту глаза при смене направления наблюдения. Геометрические параметры ГОЭ выбирались с учётом эргономики и компоновки создаваемого прототипа системы дополненной реальности, а также результатов промежуточного моделирования с помощью программного обеспечения OpticStudio. Таким образом был собран стенд для записи ГОЭ со следующими параметрами: угол между оптической осью проекционного модуля и осью визирования составляет 60° , подложка ГОЭ плоская и нормаль к подложке совпадает с осью визирования, расстояние между плоскостью промежуточного изображения, формируемого проекционным модулем, и цен-

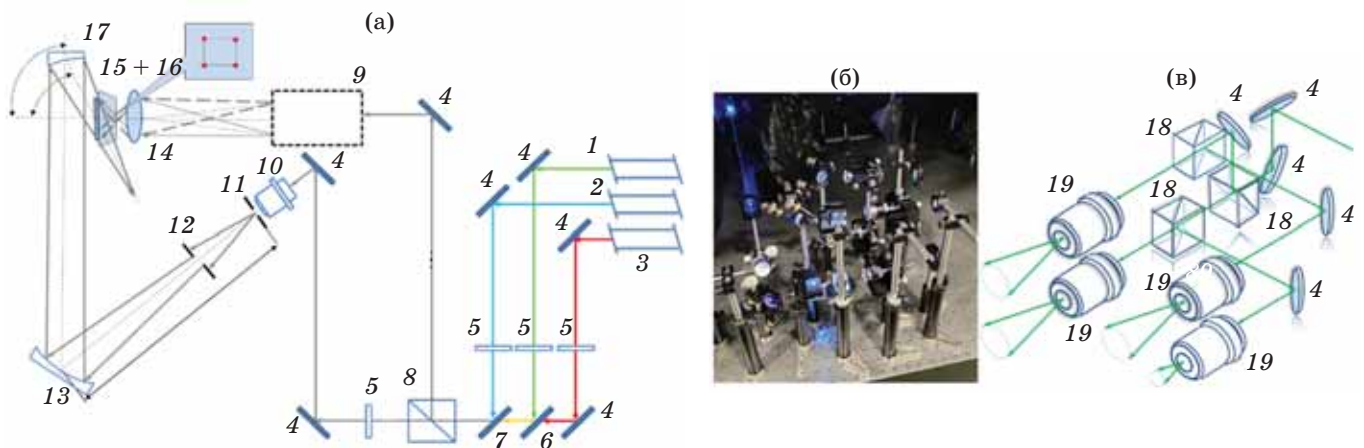


Рис. 5. Запись голографической ахроматической изображающей линзы с несколькими фокусами. Принципиальная оптическая схема (а), экспериментальная установка (б), светоделительная система на 4 канала (в): 1 — лазер с длиной волны 532 нм, 2 — лазер с длиной волны 460 нм, 3 — лазер с длиной волны 640 нм, 4 — плоское зеркало, 5 — ахроматическая полуволновая пластинка, 6, 7 — дихроичные зеркала для разных спектральных диапазонов, 8 — поляризационный светоделительный кубик, 9 — светоделительная система на 4 канала, 10 — микроскопический объектив, 11 — точечная диафрагма, 12 — ирисовая диафрагма, 13 — параболическое зеркало, 14 — светосильный объектив, 15 — призма, 16 — фотоматериал для записи голографического оптического элемента, 17 — внеосевое параболическое зеркало, 18 — светоделительный кубик, 19 — микроскопический объектив

Fig. 5. Recording of the holographic achromatic lens with several foci. (a) Principal optical scheme, (б) the experimental setup, (в) beam-splitter system for 4 channels: 1 — the laser with wavelength 532 nm, 2 — the laser with wavelength 460 nm, 3 — the laser with wavelength 640 nm, 4 — the flat mirror, 5 — the achromatic half-wave plate, 6, 7 — the dichroic mirrors for different spectral ranges, 8 — the polarized beam-splitter cube, 9 — the 4-channels beam-splitter system, 10 — the microscope objective, 11 — the pin-hole, 12 — the iris diaphragm, 13 — the parabolic mirror, 14 — the high-aperture objective, 15 — the prism, 16 — the photosensitive material for recording, 17 — the off-axis parabolic mirror, 18 — the non-polarized beam-splitter cubes, 19 — the microscope objectives

тром ГОЭ — 60 мм, удаление выходного зрачка от плоскости ГОЭ — 25 мм, расположение выходных зрачков — в вершинах квадрата со стороной 4 мм, апертура ГОЭ — $25 \times 50 \text{ мм}^2$, поле зрения — более 90° . Выбор расстояния между зрачками определяется следующими условиями:

- размер одиночного выходного зрачка ГОЭ 1 мм (это максимально достигнутый нами диаметр выходного зрачка в ходе экспериментов при заданных геометрических параметрах и качестве формируемого изображения);

- при размере зрачка глаза человека 2–8 мм, ориентировались на значение 3–4 мм, что характерно для нормальных условий освещённости;

- с одной стороны, человек постоянно должен наблюдать изображение, формируемое системой, с другой стороны, во избежание двоения и дискомфорта лишь один формируемый выходной зрачок системы должен совпадать со зрачком глаза.

В первой серии экспериментов была попытка записать каналы по отдельности, последо-

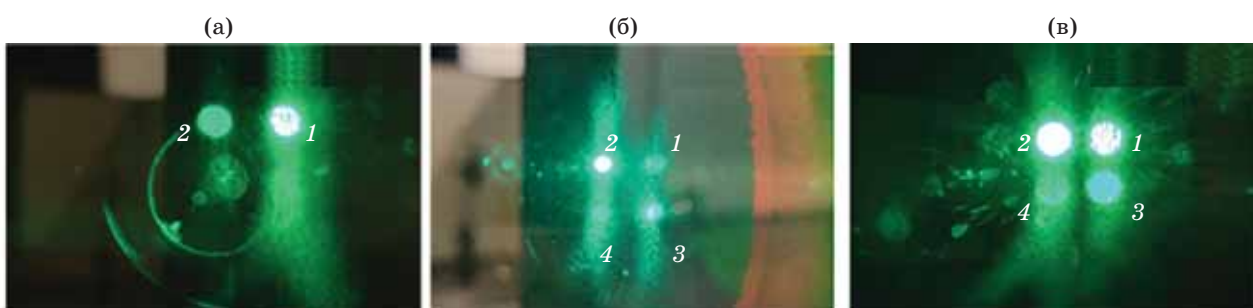


Рис. 6. Неравномерное распределение энергии между зрачками. Образец № 1 (а), образец № 2 (б), образец № 3 (в): 1–4 — выходные зрачки, формируемые голографическим оптическим элементом
Fig. 6. Uneven distribution of energy between the eye-boxes. (a) Sample № 1, (б) sample № 2, (в) sample № 3: 1–4 — exit pupils of the holographic optical element

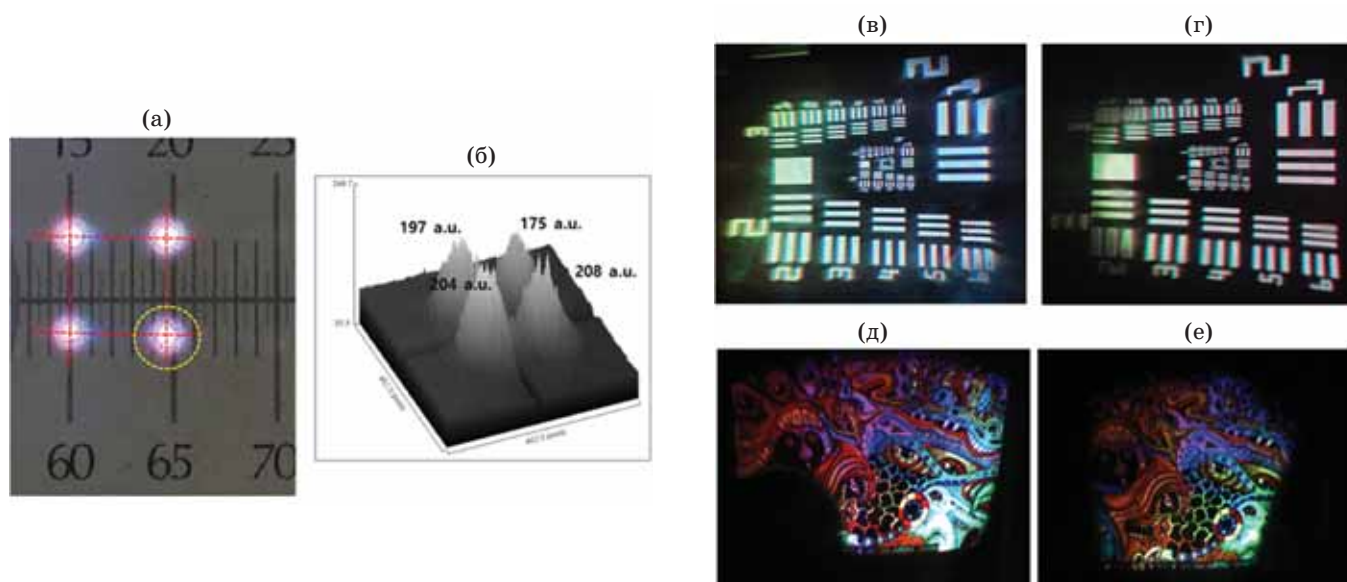


Рис. 7. Работа голографической ахроматической изображающей линзы с несколькими фокусами в прототипе. Формируемые ГОЭ зрачки (а) и их яркость (б), пример изображения тест-объекта в разных зрачках на стенде (в, г), пример изображения в разных зрачках в прототипе (д, е)

Fig. 7. The prototype based on the holographic achromatic lens with several foci: (a) the eye-boxes and (б) light distribution between them, (в, г) examples of test-object imaging by different eye-boxes in setup, (д, е) examples of test-object imaging by different eye-boxes in prototype

вательно перекрывая остальные 3, с целью избежать возможных шумов от взаимной интерференции между предметными каналами и поднять плотность энергии, сократив время экспонирования, но ввиду особенностей материала Covestro Bayfol после первой засветки происходила инициализация процессов в материале и не получалось достигнуть одинаковой яркости зрачков (рис. 6).

Запись одновременно всех четырёх предметных каналов оказалась удачной, а шумы за счёт подобранных соотношений сигнал/опора и времени экспозиции удалось подавить и свести к минимуму их влияние. Итоговый результат представлен на рис. 7. Как и предполагалось, при переводе взгляда на периферию поля изображение не пропадает, а также при нормальной освещённости в помещении ни разу в глаз наблюдателей не попало изображение от двух или более зрачков одновременно. На рис. 7в представлено изображение, формируемое рабочим прототипом очков дополненной реальности на базе LCoS с лазерной подсветкой: ограничение изображения по полю связано с тем, что из-за компактности прототипа и малого выноса зрачка не удалось совместить со входным зрачком камеры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cheng D., Wang Q., Liu Y. et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // *Light: Advanced Manufacturing*. 2021. № 2. P. 350–369. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.024>
2. Kress B., Pace M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets // *Light: Advanced Manufacturing*. 2022. № 3. P. 771–801. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.042>
3. Cakmakci O., Rolland J. Head-worn displays: a review // *Journal of Display Technology*. 2006. № 2. P. 199–216. <https://doi.org/10.1109/JDT.2006.879846>
4. Ding Y., Yang Q., Li Y. et al. Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges // *eLight*. 2023. № 3. P. 1–34. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z>
5. Luo L., Wang Z., Li J. et al. Wide-field-of-view trans-reflective RGB-achromatic metalens for augmented reality // *Photonics*. 2023. № 10. P. 590–599. <https://doi.org/10.3390/photonics10050590>
6. Li G., Lee D., Jeong Y. et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element // *Optics Letters*. 2016. № 41. P. 2486–2489. <https://doi.org/10.1364/OL.41.002486>
7. Kim S., Park J. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox // *Optics Letters*. 2018. № 43. P. 767–770. <https://doi.org/10.1364/ol.43.000767>
8. Lin T., Zhan T., Zou J. et al. Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox // *Optics Express*. 2020. № 28. P. 38616–39625. <https://doi.org/10.1364/OE.413471>
9. Seo W., Yang D., Kim S. et al. Display apparatus providing expanded eye box // *US Patent 0 134 565 A1*. 2023. Publ. May 04, 2023.
10. Kim S., Druzhin V., Malinina P. et al. Display apparatus having wide viewing window // *US Patent 11 487 117 B2*. 2022. Publ. Nov. 01, 2022.

АВТОРЫ

Сергей Евгеньевич Дубынин — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>; dubyninse@lebedev.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами были предложены, промоделированы, экспериментально проверены несколько вариантов оригинальной идеи по увеличению зрачка системы за счёт использования ахроматической изображающей линзы с несколькими фокусами на основе ГОЭ для переноса изображения и одновременного их мультиплексирования. В этом случае сохраняется большое поле зрения (более 90°) при оптимальном снижении яркости (или при несущественном повышении требований к источнику, формирующему исходное изображение). Только один из вариантов был признан наиболее удачным и максимально соответствующим поставленным целям. В ходе эксперимента были записаны несколько образцов ахроматических ГОЭ на плоской подложке с дифракционной эффективностью от 37 до 45% суммарно для четырёх зрачков на каждой длине волны в отдельности, основные геометрические параметры выдержаны, апертура ГОЭ составила 38×57 мм², а поле зрения — 108° благодаря качественному высокоапертурному объёму, который был рассчитан и изготовлен на заказ специально для данной схемы записи. Данная схема была запатентована [9–10].

AUTHORS

Sergey E. Dubynin — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>; dubyninse@lebedev.ru

Сергей Сергеевич Копёнкин — инженер второй категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>; kopenkinss@yandex.ru

Андрей Николаевич Путилин — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия; доцент, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>; putilinan@lebedev.ru

Александр Викторович Морозов — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>; mavrus@gmail.com

Николай Андреевич Путилин — заведующий лабораторией, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Россия; лаборант, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>; nick.putilin.01@mail.ru

Юрий Петрович Бородин — инженер второй категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991, Россия; старший преподаватель, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>; yuri.borodin47@yandex.ru

Владислав Владимирович Дружин — канд. техн. наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>; druzhin@bmstu.ru

Sergey S. Kopenkin — Engineer, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>; kopenkinss@yandex.ru

Andrey N. Putilin — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia; Docent, Moscow State University of geodesy and cartography, Moscow, 105064, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>; putilinan@lebedev.ru

Alexander V. Morozov — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>; mavrus@gmail.com

Nikolay A. Putilin — Head of the Laboratory, Moscow State University of geodesy and cartography, Moscow, 105064, Russia; Assistant, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5363-3176>; nick.putilin.01@mail.ru

Yuriy P. Borodin — Engineer, Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia; Senior Lecturer, Moscow State University of geodesy and cartography, Moscow, 105064, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>; yuri.borodin47@yandex.ru

Vladislav V. Druzhin — PhD in Technical sciences, Docent, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-6653-7327>; druzhin@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2023
Одобрена после рецензирования 11.01.2024
Принята к печати 29.02.2024

The article was submitted to the editorial office 14.11.2023
Approved after review 11.01.2024
Accepted for publication 29.02.2024