

Оптический журнал

Голография
Holography

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-05-76-85

УДК 53.06

Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов

АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ МОРОЗОВ¹, СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ДУБЫНИН^{2✉},
АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПУТИЛИН³, СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ КОПЁНКИН⁴,
ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ БОРОДИН⁵

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

²Исследовательский центр Самсунг, Москва, Россия

^{4, 5}МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

¹morozovav@lebedev.ru

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

²dubyninse@lebedev.ru

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

³putilinan@lebedev.ru

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

⁴kopenkinss@yandex.ru

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

⁵yuri.borodin47@yandex.ru

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

Аннотация

Предмет исследования. Комбинированные оптические элементы на основе световодов и голографических оптических элементов. **Цель работы.** Создание компактных оптических систем для преобразования коллимированного пучка с гауссовым распределением энергии от когерентного источника излучения в равномерный и однородный пучок с увеличенными размерами и заданной формой поперечного сечения. **Метод.** Когерентное излучение вводится в световод и выводится из него с помощью голографических оптических элементов. Световод и согласованный рассеиватель формируют множество вторичных точечных источников, суммарное поле которых в результате интерференции имеет требуемые распределение энергии и апертуру. **Основные результаты.** Авторами предложены несколько модификаций комбинированных оптических элементов на основе световодов и голографических оптических элементов. Достигнута суммарная эффективность таких элементов 40–45% (дифракционная эффективность отдельных голографических оптических элементов порядка 80–85%) при однородности пучка около 80% и снижении контраста спеклов до уровня 20–30%. **Практическая значимость.** Предложенные в работе технические решения в части разработки комбинированных оптических элементов на основе световодов и голографических оптических элементов позволяют существенно снизить энергопотребление, габариты и массу систем визуализации и особенно устройств виртуальной и дополненной реальности.

Ключевые слова: голографический оптический элемент, расширитель пучка, когерентная система подсветки, дополненная реальность, голографический экран

Ссылка для цитирования: Морозов А.В., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копёнкин С.С., Бородин Ю.П. Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 5. С. 76–85. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-76-85>

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

Beam expander for coherent illumination and speckle reduction

ALEXANDER V. MOROZOV¹, SERGEY E. DUBYNIN^{2✉}, ANDREY N. PUTILIN³,
SERGEY S. KOPENKIN⁴, YURIY P. BORODIN⁵

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

²Samsung Research and Development Institute Russia, Moscow, Russia

^{4, 5}MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

¹morozovav@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>

²dubyninse@lebedev.ru <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>

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

⁴kopenkinss@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>

⁵yuri.borodin47@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>

Abstract

Subject of study. The combined optical elements based on holographic optical elements and a lightguide. **Aim of study.** Development of compact optical systems for converting a collimated beam with a Gaussian energy distribution from a coherent radiation source into a uniform and homogeneous beam with enlarged dimensions and a required cross-sectional shape. **Method.** Coherent radiation is coupled into the lightguide and out-coupled from it using holographic optical elements. The lightguide and the matched diffuser form a set of secondary point sources, the total field from which, as a result of interference, has the required energy distribution and aperture. **Main results.** The authors have proposed several modifications of the combined optical elements based on holographic optical elements and a light guide. The total efficiency of such elements was achieved by 40–45% (the diffraction efficiency of individual elements is about 80–85%) with a beam uniformity of about 80% and a decrease in speckle contrast to the level of 20–30%. **Practical significance.** The technical solutions proposed in the work regarding the development of combined optical elements based on light guides and holographic optical elements can significantly reduce energy consumption, dimensions and weight of visualization systems, especially wearable virtual and augmented reality devices.

Keywords: holographic optical element, lightguide, beam expander, beam shaper, speckle reducing

For citation: Morozov A.V., Dubynin S.E., Putilin A.N., Kopenkin S.S., Borodin Y.P. Beam expander for coherent illumination and speckle reduction [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 5. P. 76–85. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-76-85>

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

ВВЕДЕНИЕ

К голограммическим средствам визуализации информации, а также входящим в их состав системам подсветки и расширения пучка предъявляются такие требования как минимизация размера устройства (особенно важно уменьшение толщины устройства), повышение эффективности при придании однородности и создании определенной формы поперечного сечения (апertureы) пучка оптического излучения, а также снижение контраста (подавление) спектров [1, 2].

Перечисленные комбинированные оптические элементы входят в состав модуля когерентной подсветки голограммического дисплея

[3–7]. Основным их назначением является преобразование пучка от компактного источника когерентного излучения в пучок заданных формы и размера поперечного сечения (рис. 1) с тем, чтобы после многократного переотражения в световоде осветить пространственно-временной модулятор света (ПВМС) однородным, плоским волновым фронтом и сформировать четкое изображение без искажений.

В качестве источника излучения предлагаются использование полупроводниковых лазерных диодов, пучок которых после коллиматора, как правило, имеет эллиптическое сечение и гауссово распределение энергии. В качестве

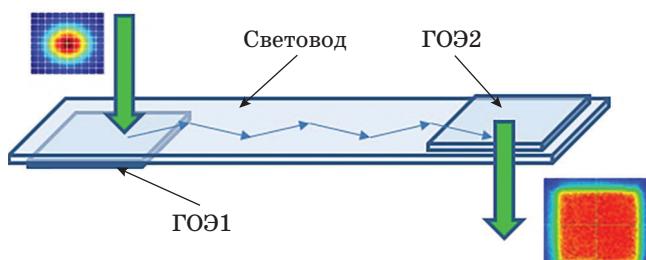


Рис. 1. Принципиальная схема расширителя пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов. Пояснения в тексте

Fig. 1. Principal scheme of beam expander for coherent illumination and speckle reduction. Explanations are in the text

регистрирующей среды для голограммических оптических элементов (ГОЭ) в работе использована голограммическая фотополимерная пленка *Covestro Bayfol* с толщиной фоточувствительного слоя 5–40 мкм. Наиболее оптимальными были выбраны толщины 16 и 25 мкм, поскольку при меньших значениях существенно снижается дифракционная эффективность (ДЭ), а при больших — значительно возрастают шумовая составляющая и влияние усадки.

Целью данной работы является создание компактных оптических систем для преобразования коллимированного пучка с гауссовым распределением энергии от когерентного источника излучения в равномерный и однородный пучок увеличенного размера и заданной формы поперечного сечения.

МОНОХРОМНЫЙ ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ

На первом этапе была реализована оригинальная идея со световодным перископом, в который был интегрирован рассеиватель. Длина

световодов составляла 100 или 70 мм между центрами ГОЭ1 и ГОЭ2. Голограммический оптический элемент ГОЭ1 (рис. 2) представляет собой отражательную объемную решетку, зарегистрированную на материале непосредственно на световоде (без последующего переноса), и осуществляет ввод излучения в световод и фокусировку излучения после 17 переотражений в плоскости ГОЭ2.

Затем с помощью оптического полимера, отверждаемого ультрафиолетом, на поверхности световода напротив ГОЭ1 фиксировался рассеиватель. В качестве рассеивателя используются матовые рассеиватели с индикаторами 0,5, 1,0, 2,0, 5,0° и микролинзовыми растры, диаметр которых равен фокусному расстоянию и составляет 300 и 500 мкм. Со стороны рассеивателя на другом конце световода наносился фотоматериал и через рассеиватель и ГОЭ1 регистрировался согласованный ГОЭ2 в виде отражательной объемной решетки. В качестве опорного использовался коллимированный пучок (рис. 3). Таким образом, рассеиватель и ГОЭ1 формируют в плоскости ГОЭ2 множество точечных источников, а ГОЭ2 в свою очередь выводит излучение из световода, формирует коллимированный пучок от каждого такого источника и объединяет их (рис. 4). Наилучший результат получен при использовании матовых рассеивателей с индикаторами 2,0 и 5,0° (рис. 5).

Данный вариант расширителя пучка эффективно справляется с поставленной задачей, однако он обладает целым рядом недостатков, к которым можно отнести следующие:

— низкая энергетическая эффективность: ГОЭ2 для моноцвета имеет ДЭ всего около 20% при высокой ДЭ ГОЭ1 и малых потерях световода,

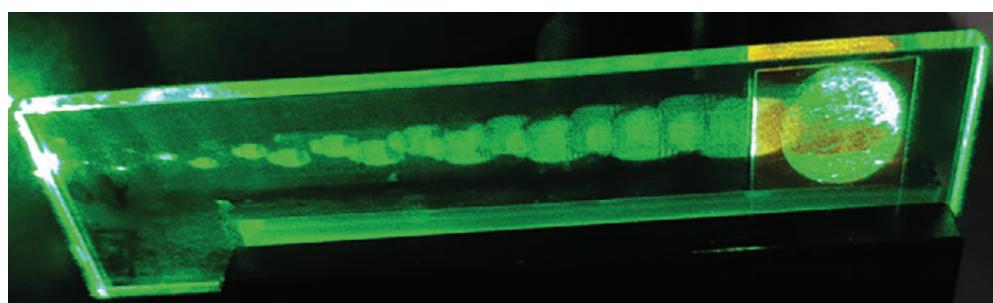


Рис. 2. Фотография голограммического оптического элемента ГОЭ1

Fig. 2. Image of holographic optical element ГОЭ1

– на каждую длину волны излучения требуется свой расширитель пучка, если речь идет о полноцветном голограммическом экране,

– запись объемных решеток на нескольких длинах волн возможна, но ДЭ в этом случае кратно снижается и появляются шумы от дифракции излучения одной длины волны на каждой из решеток,

– усадка материала легко компенсируется в случае ГОЭ1, но проблемы начинаются из-за усадки ГОЭ2, в результате чего возникает рас согласование ГОЭ2 и рассеивателя.

ПОЛНОЦВЕТНЫЙ ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ

Поскольку переход к полноцветному варианту в данном случае ведет к незначительному, но все же увеличению толщины, была предложена новая более простая и эффективная идея — использовать многослойный волновод с различной толщиной слоев и разделительными дихроичными покрытиями между ними.

Голографические оптические элементы ГОЭ1 и ГОЭ2 в данном случае выполнены как объемные отражательные решетки и работают как элементы связи с волноводом для ввода/вывода излучения. Такое решение предполагает широкий выбор вариантов реализации: дихроичные покрытия могут быть с частичным пропусканием или полностью зеркальным, а также селективными по длине волны (рис. 6).

Результат работы расширителей пучка, выполненных один по схеме с рассеивателем 5° (рис. 5а) и второй по схеме с частично пропускающим дихроичным покрытием (рис. 6б), представлен на рис. 7.

Количество слоев позволяет существенно сократить продольный размер: при использовании нескольких слоев разной толщины при одинаковой длине оптического хода, но с разным количеством переотражений выравнивание однородности происходит эффективнее. На рис. 8 иллюстрируется выигрыш в габаритах при тех же выходных параметрах

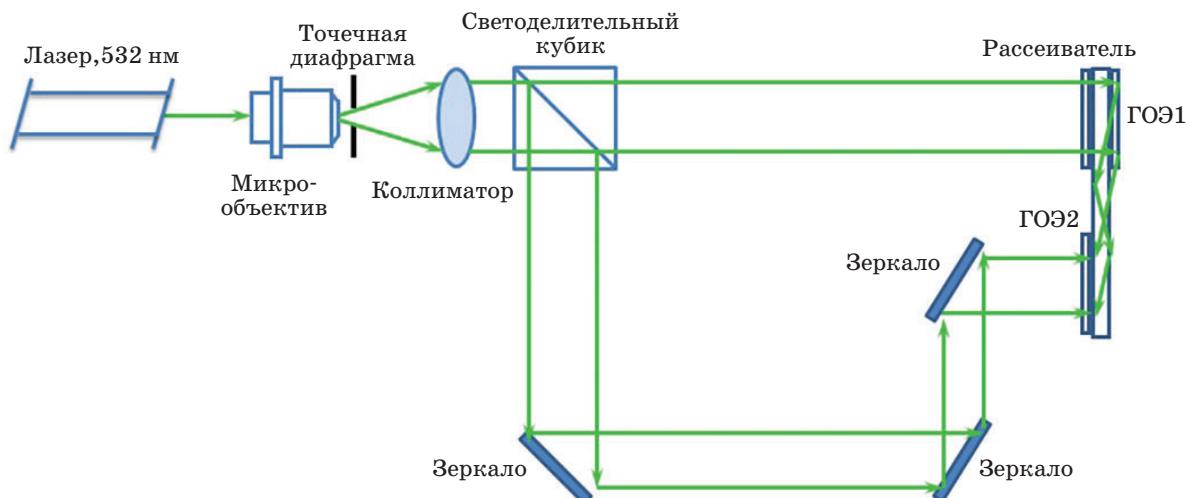


Рис. 3. Принципиальная схема записи ГОЭ2 отражательного типа. Лазерный пучок расширяется с помощью микрообъектива, претерпевает пространственную фильтрацию точечной диафрагмой для повышения однородности пучка и преобразуется коллиматором в пучок параллельных лучей. Пучок по энергии делится светоделительным кубиком на два пучка: первый без изменений после нескольких переотражений от плоских зеркал освещает регистрирующую среду под углом, под которым необходимо, чтобы излучение выходило из создаваемого расширителя; второй пучок после прохождения через рассеиватель освещает ГОЭ1, дифрагирует под углом больше угла полного внутреннего отражения, распространяется по световоду и освещает регистрирующую среду с противоположной стороны

Fig. 3. The principal recording scheme for ГОЭ2 reflective type. The laser beam is expanding by microscope objective, has spatial filtering by pin-hole to increase of uniformity and collimating by lens. The beam is splitting on two beams by beam-splitter cube: first beam is illuminating photo material under angle, which required to output; second beam is propagating through diffuser, diffracting on ГОЭ1, propagating in lightguide with angle, which more than angle of total internal reflection, and illuminating photo material

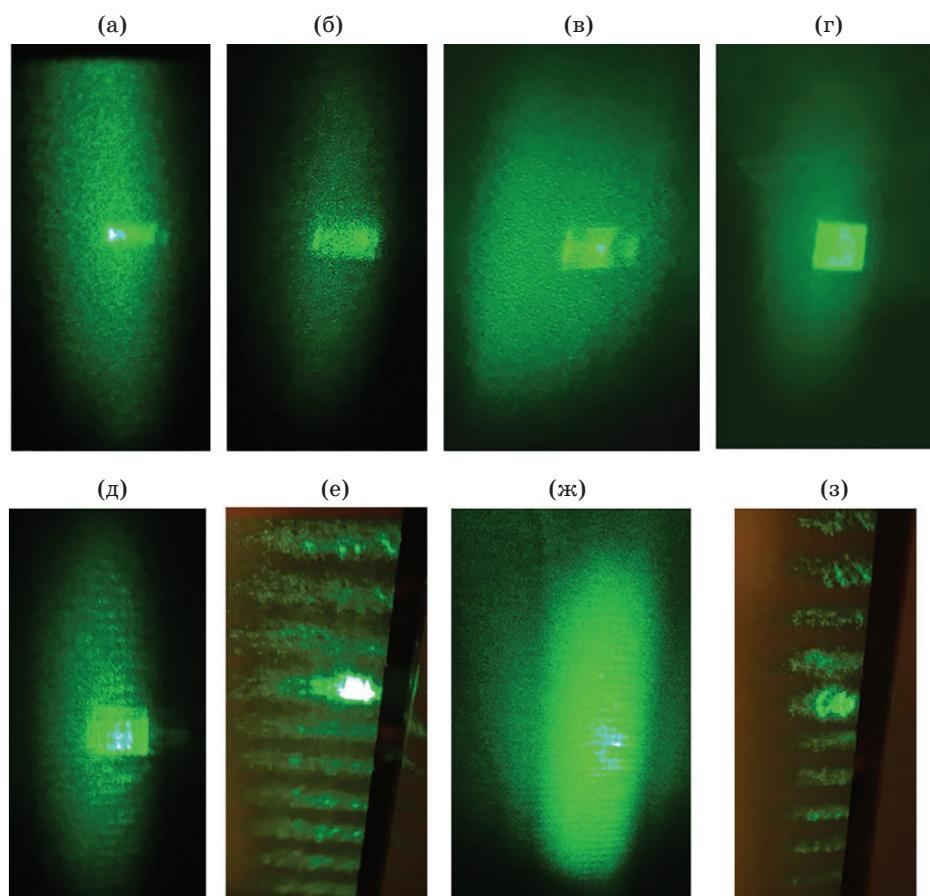


Рис. 4. Поперечное сечение пучков на выходе из расширителя пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов с использованием в качестве рассеивателя рассеивателей с индикатрисами $0,5^\circ$ (а), $1,0^\circ$ (б), $2,0^\circ$ (в), $5,0^\circ$ (г), микролинзового растра диаметром 300 мкм, экран на дистанции 200 мм (д) и на дистанции 1000 мм (е), микролинзового растра диаметром 500 мкм, экран на дистанции 200 мм (ж) и на дистанции 1000 мм (з)

Fig. 4. Beam cross-section at the output of the beam expander for a coherent illumination system with low speckle contrast using diffusers with indicatrices (а) $0,5^\circ$, (б) $1,0^\circ$, (в) $2,0^\circ$, (г) $5,0^\circ$, (д) micro-lens array diameter 300 μm , screen at a distance of 200 mm and at (е) a distance of 1000 mm, (ж) micro-lens array diameter 500 μm , screen at a distance of 200 mm and at (з) a distance of 1000 mm

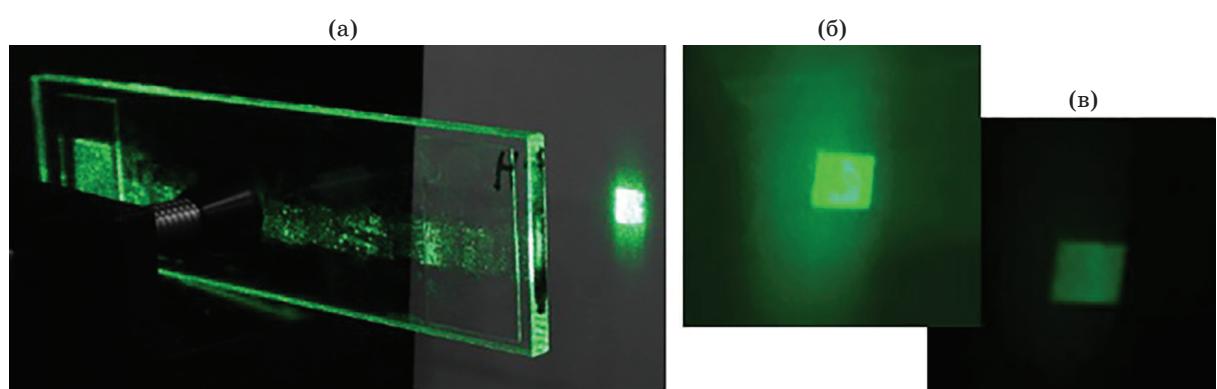


Рис. 5. Эффективность удаления шумов. Фотография монохромного варианта расширителя пучка (а), поперечное сечение пучка на выходе из расширителя для длины волны 532 нм без поляризатора (б) и с поляризатором (в)

Fig. 5. Effective noise reduction. (а) Image of monochromatic beam expander, output beam cross-sections at the expander exit for a wavelength of 532 nm (б) without a polarizer and (в) with a polarizer

за счет перехода от двухслойного к трехслойному световоду. Толщина слоев не является произвольной, а определяется в результате оптимизации, поскольку однородность выходного пучка и снижение спекловой структуры зависят в первую очередь от двух факторов — индикатрисы излучения рассеивателя и длины оптического хода. Широкая индикатриса приведет к снижению эффективности и шумов/фона, а также потерям при нарушении полного внутреннего отражения при распространении излучения в световоде. Поэтому

при сужении индикатрисы до приемлемого значения увеличивается продольный размер световода или его толщина. Второе условие, влияющее на толщину световода — это разные углы распространения излучения в световоде для каждой длины волны, так как оно должно либо оставаться строго в своем световоде, либо должна происходить контролируемая перекачка излучения из световода в световод для согласования однородности, размера и формы апертуры на выходе из комбинированного элемента излучений всех длин волн.

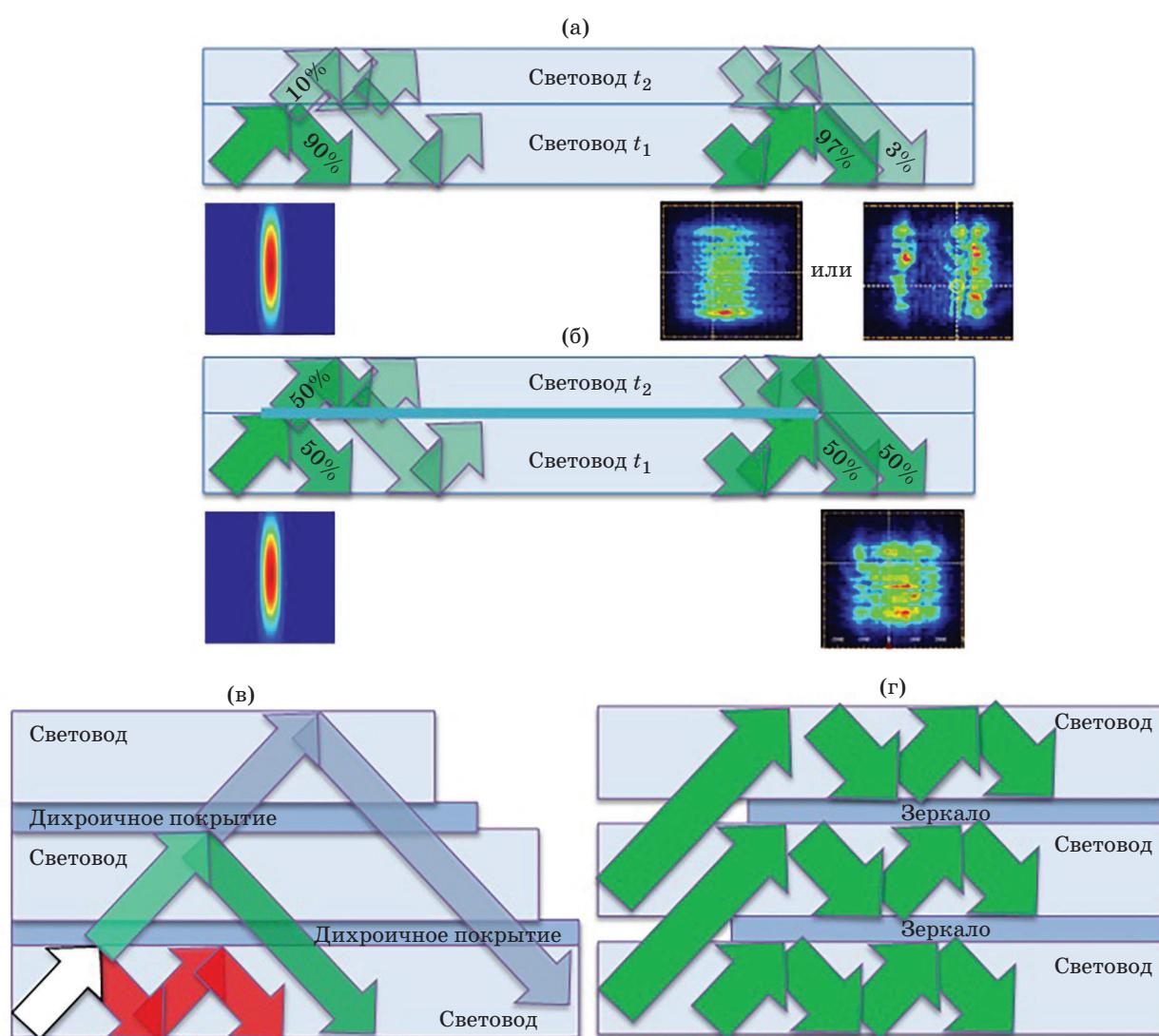


Рис. 6. Варианты реализации многослойного световода с толщиной слоев t_1 и t_2 без дихроичного покрытия между слоями (а), с использованием дихроичного покрытия с частичным пропусканием между слоями (б), с использованием дихроичного покрытия, селективного по длине волны (в), с использованием зеркального покрытия (г)

Fig. 6. Implementation variants of a multilayer lightguide with layer thicknesses t_1 and t_2 (a) without a dichroic coating between the layers, (b) using a dichroic coating with partial transmission between the layers, (c) using a wavelength-selective dichroic coating, (d) using a mirror coating

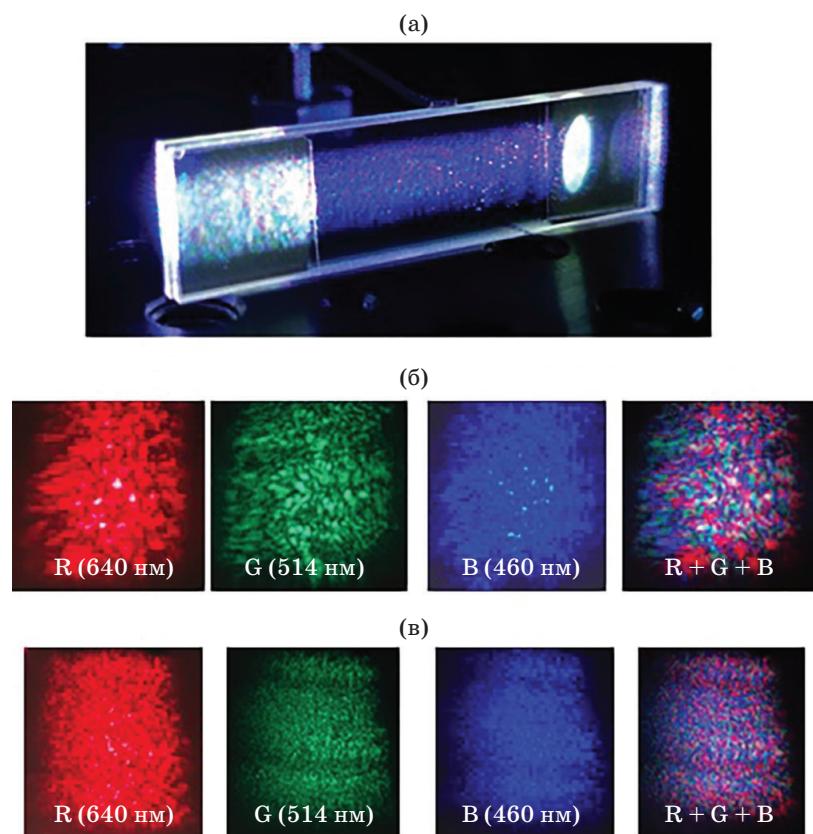


Рис. 7. Фотография расширителя пучка для системы когерентной подсветки с дихроичным покрытием — (а) и изображения поперечных сечений выходного пучка при полноцветном варианте реализации (для 640, 514, 460 нм и всех трех излучений вместе) с расширителями пучка с индикаторной 5° — (б) и с дихроичным покрытием — (в)

Fig. 7. A photograph of a beam expander for a coherent illumination system with a dichroic coating is shown in (a) and images of the output beam cross-sections in full color (for 640, 514, 460 nm, and all three of these radiations together) with a beam expanders with a 5° scattering indicatrix and with a dichroic coated are shown in (б), (в) respectively

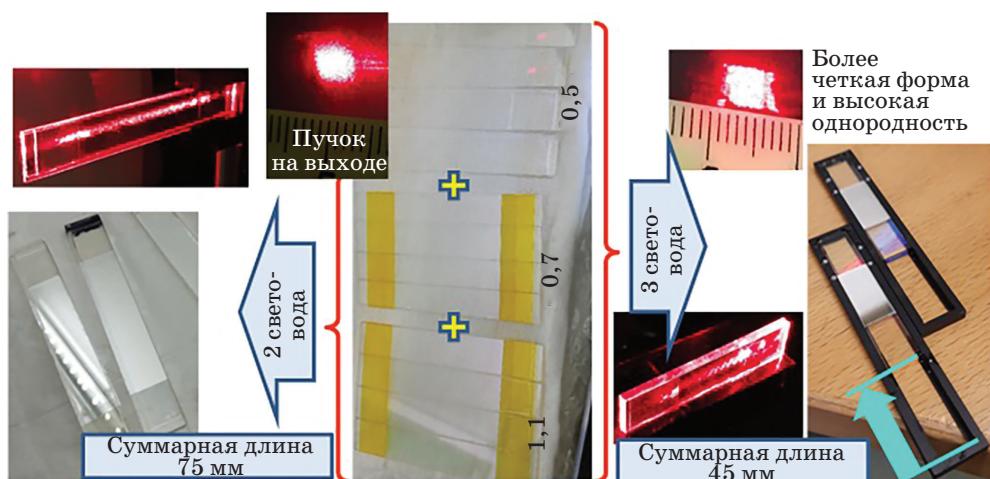


Рис. 8. Влияние количества световодов на продольный габарит и качество выходного пучка при использовании между слоями зеркального покрытия с коэффициентом отражения 1,0

Fig. 8. Influence of the number of lightguides on the longitudinal dimension and quality of the output beam when used between layers of a mirror coating with a reflection coefficient of 1.0

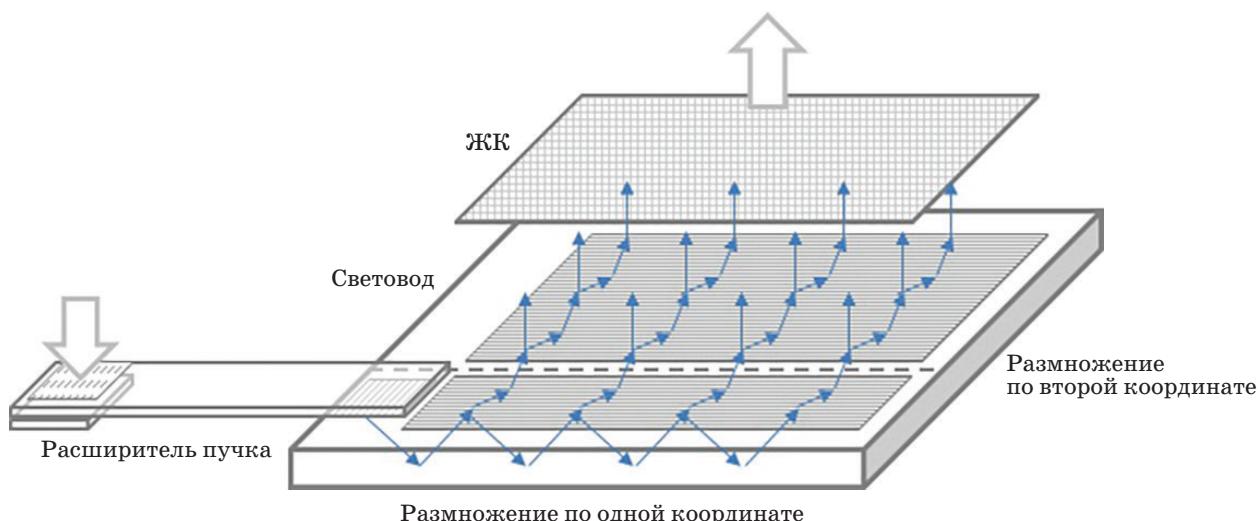


Рис. 9. Принципиальная схема устройства отображения информации с использованием 10-дюймовой жидкокристаллической панели с разрешением 3840×2400 и предложенных расширителей пучка.
Пояснения в тексте

Fig. 9. Principal scheme of imaging device based on 10-inch liquid crystal display with resolution 3840×2400 and the proposed beam expanders. Explanations are in the text

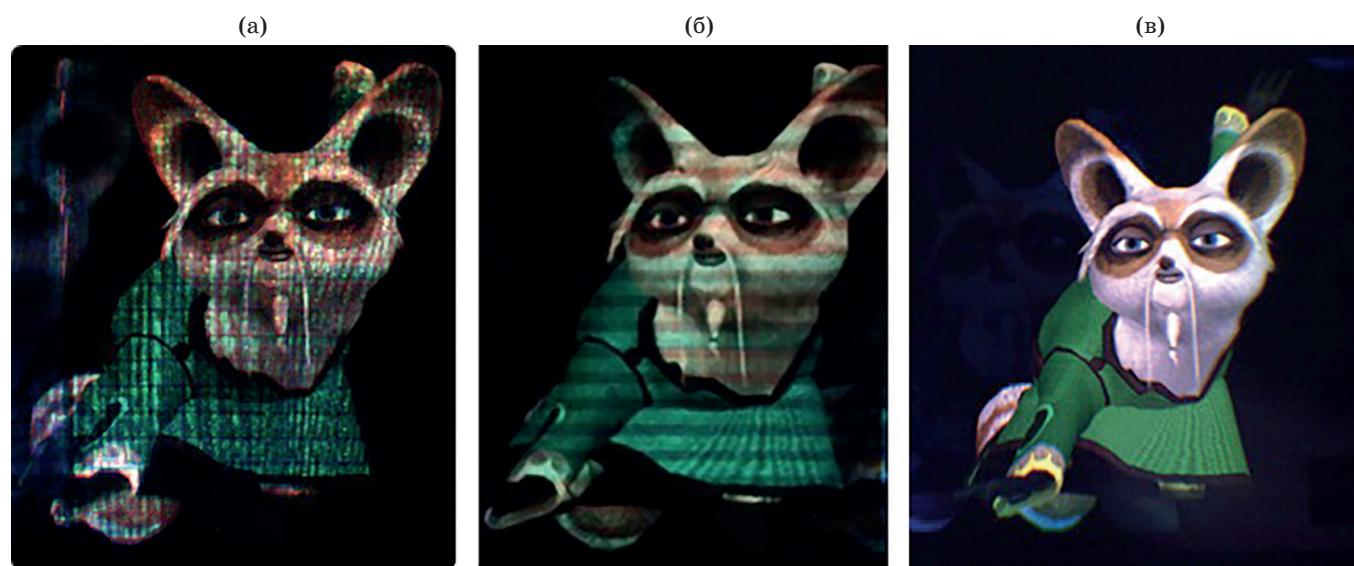


Рис. 10. Изображения, формируемые устройством отображения информации с использованием 10-дюймовой жидкокристаллической панели с разрешением 3840×2400 и линзового расширителя пучка (а), расширителя пучка с рассеивателем 5° (б), расширителя пучка с дихроичным покрытием (в)

Fig. 10. There are images, which forming by imaging device based on 10-inch liquid crystal display with resolution 3840×2400 and with (а) conventional lens beam expanders, (б) the beam expander with diffuser of 5.0° indicatrix, (в) the beam expander with dichroic coating

Принципиальная схема устройства отображения информации и предложенных расширителей пучка представлена на рис. 9. Качество изображения, формируемого этим устройством, можно оценить на рис. 10.

Количественная оценка параметров полноцветного варианта расширителя пучка проводилась на каждой длине волны отдельно. Останавливаться подробно на оценке однородности и ДЭ нет необходимости, а по поводу

измерения размера спеклов следует дать пояснения. В плоскости матричного приемника с увеличением формировалось изображение различных участков поля. Далее с помощью программного обеспечения Matlab анализировалось полученное изображение: оценивался размер спеклов и их контраст.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена, экспериментально проверена и успешно реализована в нескольких вариантах оригинальная идея преобразователя пучка для эффективного использования излучения и повышения однородности в системах когерентной подсветки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Yaras F., Kang H., Onural L. State of the art in holographic displays: A survey // J. Display Technol. 2010. V. 6. № 10. P. 443–454. <https://doi.org/10.1109/JDT.2010.2045734>
- Dapu Pi, Juan Liu, Yongtian Wang. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display // Light: Science & Applications. 2022. V. 11. P. 231. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00916-3>
- Jungkwuen An, Kanghee Won, Young Kim, et al. Slim-panel holographic video display // Nature Commun. 2020. V. 11. P. 5568. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19298-4>
- Chil-Sung Choi, Sung-Hoon Lee, Hoon Song, et al. Compact coherent backlight unit for portable holographic display // Proc. SPIE Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices. 2019. V. 11089. <https://doi.org/10.1117/12.2525214>
- Morozov A.V., Dubinin G.B., Dubynin S.E., et al. High collimated coherent illumination for reconstruction of digitally calculated holograms: Design and experimental realization // Proc. SPIE Digital Opt. Technol. 2017. V. 10335. <https://doi.org/10.1117/12.2270181>
- Sun Il Kim, Chil-Sung Choi, Morozov A.V., et al. Slim coherent backlight unit for holographic display using full color holographic optical elements // Opt. Exp. 2017. V. 25. P. 26781–26791. <https://doi.org/10.1364/oe.25.026781>
- Chil-Sung Choi, Morozov A.V., Koshelev A., et al. Ultra-slim coherent backlight unit for mobile holographic display // Proc. SPIE Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices. 2015. V. 9556. <https://doi.org/10.1117/12.2186387>
- Морозов А.В., Дубынин С.Е., Дубинин Г.Б. и др. Устройство для расширения пучка оптического излучения и способ расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки // РФ Патент № 2762176. 2021.
- Morozov A.V., Putilin A.N., Dubynin S.E., et al. Beam expander and method of operating the same // EP Patent № 3943996. 2022.

Достигнута суммарная эффективность таких элементов для полноцветного варианта 40–45% (суммарная эффективность таких элементов в случаях излучений с длинами волн 460 нм — 45%, 514 нм — 58% и 640 нм — 66%, а ДЭ отдельных ГОЭ — порядка 80–85%) при однородности пучка около 80% и снижении контраста спеклов до уровня 20–30%.

Применение рассмотренных в статье расширителей пучка не ограничивается лишь голограммическими экранами: это может быть внедлено в VR/AR-устройствах (в первую очередь носимых), Heads-Up Display, оптических датчиках (например дактилоскопических) и др. На такие решения выдан ряд патентов [8–11].

REFERENCES

- Yaras F., Kang H., Onural L. State of the art in holographic displays: A survey // J. Display Technol. 2010. V. 6. № 10. P. 443–454. <https://doi.org/10.1109/JDT.2010.2045734>
- Dapu Pi, Juan Liu, Yongtian Wang. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display // Light: Science & Applications. 2022. V. 11. P. 231. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00916-3>
- Jungkwuen An, Kanghee Won, Young Kim, et al. Slim-panel holographic video display // Nature Commun. 2020. V. 11. P. 5568. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19298-4>
- Chil-Sung Choi, Sung-Hoon Lee, Hoon Song, et al. Compact coherent backlight unit for portable holographic display // Proc. SPIE Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices. 2019. V. 11089. <https://doi.org/10.1117/12.2525214>
- Morozov A.V., Dubinin G.B., Dubynin S.E., et al. High collimated coherent illumination for reconstruction of digitally calculated holograms: Design and experimental realization // Proc. SPIE Digital Opt. Technol. 2017. V. 10335. <https://doi.org/10.1117/12.2270181>
- Sun Il Kim, Chil-Sung Choi, Morozov A.V., et al. Slim coherent backlight unit for holographic display using full color holographic optical elements // Opt. Exp. 2017. V. 25. P. 26781–26791. <https://doi.org/10.1364/oe.25.026781>
- Chil-Sung Choi, Morozov A.V., Koshelev A., et al. Ultra-slim coherent backlight unit for mobile holographic display // Proc. SPIE Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices. 2015. V. 9556. <https://doi.org/10.1117/12.2186387>
- Morozov A.V., Dubynin S.E., Dubinin G.B., et al. Device for expanding an optical beam and a method for expanding an optical beam for coherent illumination // RF Patent № 2762176. 2021.
- Morozov A.V., Putilin A.N., Dubynin S.E., et al. Beam expander and method of operating the same // EP Patent № 3943996. 2022.

10. Морозов А.В., Дубынин С.Е., Дубинин Г.Б. и др. Устройство для расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки с набором световодов с дихроичными покрытиями // РФ Патент № 2757071. 2021.
11. Morozov A.V., Dubynin S.E., Dubinin G.B., et al. Beam expander and beam expansion method // US Patent № 0146764. 2022.
10. Morozov A.V., Dubynin S.E., Dubinin G.B., et al. A device for expanding an optical beam for coherent illumination with a set of light guides with dichroic coatings // RF Patent № 2757071. 2021.
11. Morozov A.V., Dubynin S.E., Dubinin G.B., et al. Beam expander and beam expansion method // US Patent № 0146764. 2022.

АВТОРЫ

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

Сергей Евгеньевич Дубынин — высококвалифицированный младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; инженер, Исследовательский центр Самсунг, Москва, 127018, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>; dubyninse@lebedev.ru

Андрей Николаевич Путилин — кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>; putilinan@lebedev.ru

Сергей Сергеевич Копёнкин — инженер 2-ой категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; инженер, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>; kopenkinss@yandex.ru

Юрий Петрович Бородин — инженер 2-ой категории, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия; инженер, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>; yuri.borodin47@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21.11.2022
Одобрена после рецензирования 01.03.2023
Принята к печати 26.03.2023

AUTHORS

Alexander V. Morozov — Highly Qualified Junior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6368-7378>; mavrus@gmail.com

Sergey E. Dubynin — Highly Qualified Junior Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Staff Engineer, Limited Liability Company Samsung R&D Institute Rus, Moscow, 127018, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0452-5325>; dubyninse@lebedev.ru

Andrey N. Putilin — Candidate of Phys.-math. Sciences (PhD), Highly Qualified Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0492-0974>; putilinan@lebedev.ru

Sergey S. Kopenkin — Engineer, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Engineer, MIREA, Moscow, 119454, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7572-4976>; kopenkinss@yandex.ru

Yuriy P. Borodin — Engineer, P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991, Russia; Engineer, MIREA, Moscow, 119454, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3021-2058>; yuri.borodin47@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 21.11.2022
Approved after review 01.03.2023
Accepted for publication 26.03.2023