

Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов

А. В. Морозов^{1,2}, С. Е. Дубынин^{1,2}, А. Н. Путилин², С. С. Копенкин^{2,3}, Ю. П. Бородин^{2,3}

¹ ООО «Исследовательский центр Самсунг», Москва, Россия

² Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ РТУ МИРЭА, Москва, Россия

В работе представлены комбинированные оптические элементы на основе голографических оптических элементов (ГОЭ) и световода для преобразования коллимированного пучка от когерентного источника излучения с, как правило, гауссовым распределением энергии во flat-top пучок с увеличенными размерами и заданной формой поперечного сечения. Отличительной особенностью данных комбинированных оптических элементов является уменьшение спекловой структуры при сохранении когерентности излучения. Авторами предложены несколько модификаций таких элементов. Была достигнута суммарная эффективность таких элементов 40–45% (дифракционная эффективность отдельных ГОЭ порядка 80–85%) при однородности пучка около 80% и снижении контраста спеклов до уровня 20–30%.

Ключевые слова: Голографический оптический элемент, Расширитель пучка, Когерентная система подсветки, Дополненная реальность, Голографический экран.

Цитирование: Морозов, А. В. Расширитель пучка для системы когерентной подсветки с низким контрастом спеклов / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, А. Н. Путилин, С. С. Копенкин, Ю. П. Бородин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям :Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 160–164.

В настоящее время к голографическим средствам визуализации информации, а также входящим в их состав системам подсветки и расширения пучка, предъявляются такие требования как минимизация размера устройства (в особенности важно уменьшение толщины устройства), повышение эффективности при придании однородности и создании определенной формы поперечного сечения (апертуры) пучка оптического излучения, а также снижение контрастности (подавление) спеклов [1].

Представленные комбинированные оптические элементы являются составной частью модуля когерентной подсветки голографического дисплея [1-2]. Основным назначением данного оптического компонента является преобразование пучка от компактного источника когерентного излучения в пучок с заданной формой и размером поперечного сечения (рисунок 1) с тем, чтобы после многократного размножения в световоде осветить пространственно-временной модулятор света (ПВМС) однородным, плоским волновым фронтом и сформировать четкое изображение без искажений.

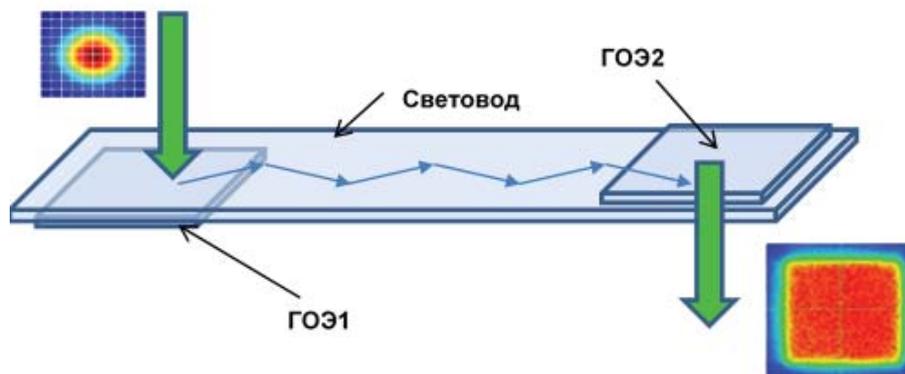
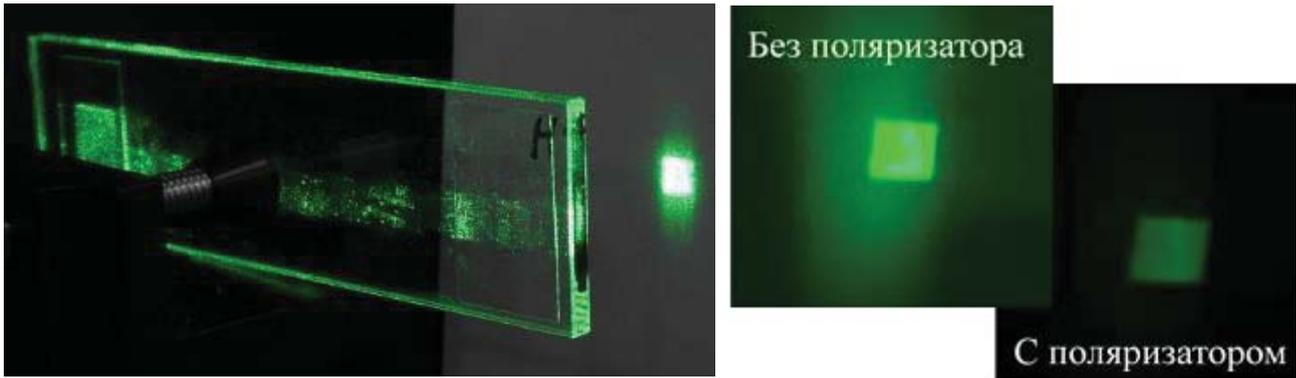


Рис. 1. Схема

В качестве источника излучения предлагается использование полупроводниковых лазерных диодов, пучок которых после коллиматора, как правило, имеет эллиптическое сечение и Гауссово распределение энергии. В качестве регистрирующей среды для ГОЭ используется фотоматериал Covestro Bayfol толщиной 5...40 мкм. Наиболее оптимальной была выбрана толщина 16 и 25 мкм, поскольку при меньших значениях существенно снижается дифракционная эффективность (ДЭ), а при больших значениях значительно возрастает шумовая составляющая и возрастает влияние усадки.

На первом этапе была реализована оригинальная идея с волноводным перископом, в который был интегрирован рассеиватель. Длина световода составляла 100 мм или 70 мм между центрами ГОЭ1 и ГОЭ2. ГОЭ1 представлял собой отражательную объемную решетку, которая регистрировалась на материале непосредственно на волноводе (без последующего переноса) и осуществляла ввод излучения в световод и фокусировку излучения после 17 переотражений в плоскости ГОЭ2.

Затем с помощью оптического УФ-отверждаемого полимера на поверхности световода напротив ГОЭ1 фиксировался рассеиватель. В качестве рассеивателя использовались матовые рассеиватели с индикатрисой $0,5^\circ$, $1,0^\circ$, $2,0^\circ$, $5,0^\circ$ и микролинзовые растрсы, у которых диаметр линз был равен фокусному расстоянию и составлял 300 и 500 мкм. Со стороны рассеивателя на другом конце световода накатывался фотоматериал и через рассеиватель и ГОЭ1 регистрировалась согласованная ГОЭ1 в виде отражательной объемной решетки. В качестве опорного использовался коллимированный пучок. 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 замешивает их. Наилучший результат был достигнут при использовании матового рассеивателя с индикатрисой $2,0^\circ$ и $5,0^\circ$ (рисунок 2).



а) расширитель пучка для длины волны 532 нм

б) шумы эффективно удаляются поляризатором

Рис. 2. Расширитель пучка

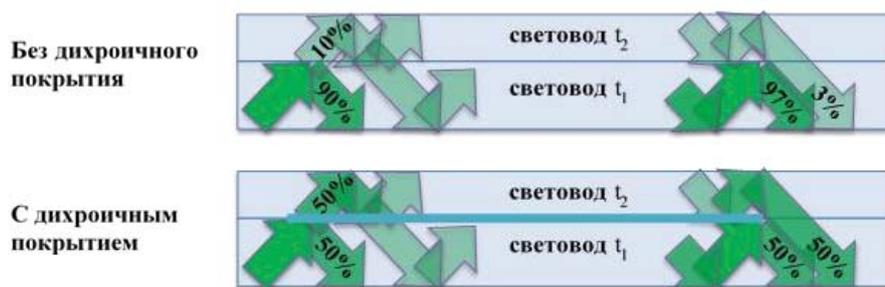
Данный вариант расширителя пучка эффективно справляется с поставленной задачей, однако, обладает целым рядом недостатков, к которым можно отнести:

- низкая энергетическая эффективность – ГОЭ2 для моноцвета имеет ДЭ всего около 20% при высокой ДЭ ГОЭ1 и малых потерях световода;

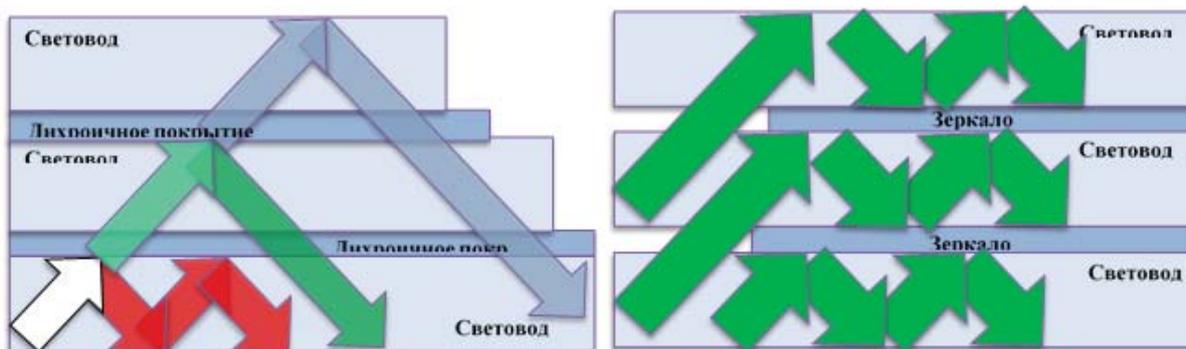
- для каждой длины волны требуется свой расширитель пучка, если речь идет о полноцветном голографическом экране; запись объемных решеток для нескольких длин волн возможна, но ДЭ в этом случае кратно снижается и появляются шумы от дифракции одной длины волны на каждой из решеток;

- усадка материала легко компенсируется в случае с ГОЭ1, но проблемы начинаются из-за усадки ГОЭ2 и как результат рассогласование ГОЭ2 и рассеивателя.

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. ГОЭ1 и ГОЭ2 в данном случае выполнены как объемные отражательные решетки и работают как элементы связи с волноводом для ввода/вывода излучения. Данное решение предполагает широкий выбор вариантов реализации: дихроичные покрытия могут быть с частичным пропусканием или полностью зеркальным, а также селективными по длине волны (рисунок 3).



а) дихроичное покрытие с частичным пропусканием



б) дихроичное покрытие селективное по длине волны

в) зеркальное покрытие

Рис. 3. Идея использования многослойного волновода

Количество слоев позволяет существенно сократить продольный размер (рисунок 4). Толщины слоев - не произвольные величины, а являются результатом оптимизации.

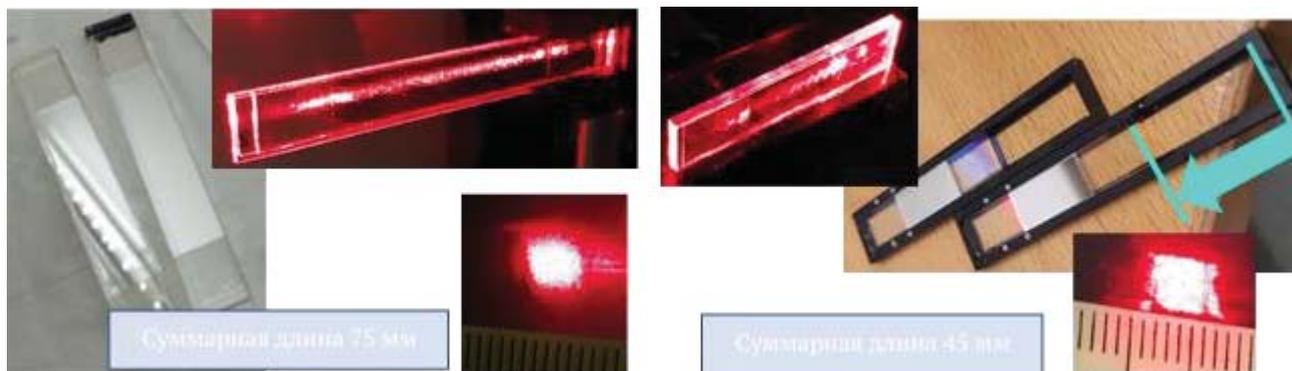


Рис. 4. Влияние количества волноводов на продольный габарит и качество

Применение данных расширителей пучка не ограничивается лишь голографическими экранами – это может быть внедрено в VR/AR-устройствах (в первую очередь носимых), HUD, оптических датчиках (как пример – дактилоскопических) и других. Данные решения отражены в ряде патентов [3-6].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Jungkwuen An** Slim-panel holographic video display / Jungkwuen An, Kanghee Won, Young Kim, Jong-Young Hong, Hojung Kim, Yongkyu Kim, Hoon Song, Chilsung Choi, Yunhee Kim, Juwon Seo, Alexander Morozov, Hyunsik Park, Sunghoon Hong, Sungwoo Hwang, Kichul Kim & Hong-Seok Lee // Nature Communications 11(1), (2020)
- [2] **Chil-Sung Choi** Compact coherent backlight unit for portable holographic display / Chil-Sung Choi, Sung-Hoon Lee, Hoon Song, Jungkwuen An, Alexander Morozov, German Dubinin, Yunhee Kim, Young Kim, Kang-Hee Won, Yongkyu Kim, Myungjae Jeon, Bongsu Shin, Chang-Kun Lee, Wontaek Seo, Jae-Seung Chung, Juwon Seo, Yun-Tae Kim, Geeyoung Sung, Sunil Kim, Hong-Seok Lee // Proc. SPIE 11089, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVI, 1108902 (3 September 2019)
- [3] **Патент № 2 762 176 РФ.** Устройство для расширения пучка оптического излучения и способ расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, Г. Б. Дубинин, А. Н. Путилин, Хун СОН, Хон-Сеок ЛИ, Чил-Сун ЧОЙ, — Оpubл. 16.12.2021.
- [4] **Патент № 3 943 996 EP.** Beam expander and method of operating the same / A. V. Morozov, A. N. Putilin, S. E. Dubynin, Chilsung Choi, G. B. Dubinin, Hongseok Lee, Hoon Song, — Оpubл. 26.01.2022.
- [5] **Патент № 2 757 071 РФ.** Устройство для расширения пучка оптического излучения для когерентной подсветки с набором световодов с дихроичными покрытиями / А. В. Морозов, С. Е. Дубынин, Г. Б. Дубинин, Хун СОН, Хон-Сеок ЛИ, Чил-Сун ЧОЙ, — Оpubл. 11.10.2021.
- [6] **Патент № 2022/0 146 764 US.** Beam expander and beam expansion method / A. V. Morozov, S. E. Dubynin, G. B. Dubinin, Chilsung Choi, Hongseok Lee, Hoon Song, — Оpubл. 12.05.2022.

Beam expander for coherent illumination and speckle reduction

A. V. Morozov^{1,2}, S. E. Dubynin^{1,2}, A. N. Putilin², S. S. Kopenkin^{2,3}, Y. P. Borodin^{2,3}

¹ Samsung R&D Institute Rus (SRR), Moscow, Russia

² Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

³ MIREA, Moscow, Russia

The paper presents the combined optical elements based on holographic optical elements (HOE) and a lightguide for achievement of flat-top beam with enlarged dimensions and a required cross-sectional shape from collimated coherent beam with a Gaussian energy distribution. A distinctive feature of these beam shapers is the reduction of the speckle structure while maintaining the coherence of the radiation. The authors have proposed several modifications of such elements. 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%.

Keywords: Holographic optical element, Waveguide, Lightguide, Beam expander, Beam shaper, Speckle reducing.