

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1037-1047

УДК 681.78

## Моделирование композитного волноводного голографического дисплея

Данила Юрьевич Харитонов<sup>1</sup>, Дамир Маратович Ахметов<sup>2</sup>,  
Эдуард Ринатович Муслимов<sup>3</sup>, Айдар Рустемович Гильфанов<sup>4</sup>,  
Надежда Константиновна Павлычева<sup>5</sup>

<sup>1,2,4</sup> Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Республика Татарстан

<sup>3,5</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, 420075, Республика Татарстан

<sup>3</sup> Нидерландский институт радиоастрономии, Двингело, 7991 PD, Нидерланды

<sup>3</sup> Астрофизическая лаборатория Марселя, Марсель, 13388, Франция

<sup>1</sup> [danila-haritonov2017@mail.ru](mailto:danila-haritonov2017@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1256-4474>

<sup>2</sup> [akhmetov.damir.97@mail.ru](mailto:akhmetov.damir.97@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5827-2648>

<sup>3</sup> [e0123@mail.ru](mailto:e0123@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3242-9894>

<sup>4</sup> [cataklizm@inbox.ru](mailto:cataklizm@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8109-5029>

<sup>5</sup> [nkpavlych@rambler.ru](mailto:nkpavlych@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9395-3967>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы оптические схемы дисплеев дополненной реальности волноводного типа. Дисплеи, построенные на основе объемных фазовых голограмм, отличаются малыми размерами, большим выходным зрачком и высоким коэффициентом пропускания в каналах проецируемого изображения и прямого зрения. Однако с увеличением апертуры, поля зрения и рабочего спектрального диапазона увеличивается разброс значений угла падения луча и длины волны излучения при решении задачи дифракции в разных точках поверхности голограммы. Это накладывает ограничения на пространственное разрешение и дифракционную эффективность. Для преодоления данного явления предложено использовать композитную голограмму, в виде объемной фазовой решетки, разделенной на зоны с независимо изменяющимися параметрами наклона полос, формой и толщиной голографического слоя, а также глубиной модуляции. **Метод.** Предложен алгоритм, который позволяет проводить трассировку луча через голограмму, записанную двумя точечными когерентными источниками при помощи вспомогательного асферического зеркала. Первоначальная трассировка луча в схеме записи голограммы выполнена с использованием минимизации функции ошибок методами покоординатного спуска и золотого сечения. На основе полученных результатов с помощью уравнения Уэллфорда вычислены направляющие векторы дифрагированного луча. С использованием результатов трассировки на базе теории связанных волн Когельника определена дифракционная эффективность голограммы. Предложенные алгоритмы реализованы в среде Zemax Optics Studio. **Основные результаты.** Применение представленного композитного голограммного элемента и средств моделирования его работы показаны на примере дисплея, работающего в диапазоне 510–530 нм с полем зрения  $7^{\circ}36' \times 5^{\circ}48'$  и диаметром выходного зрачка 8 мм. Предложенные решения позволили повысить дифракционную эффективность в 3,45 раза, а пространственное разрешение на 12,7 %, которое варьируется по полю зрения в пределах  $0'44''$ – $1'6''$ . **Практическая значимость.** Применение композитных голограмм позволит создавать дисплеи, отличающиеся более высоким пространственным разрешением и яркостью проецируемого изображения, а также равномерностью характеристик по полю зрения.

### Ключевые слова

дифракционная эффективность, объемно-фазовая голограмма, волноводный голографический дисплей, дополненная реальность

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-79-00082. Особую благодарность за проделанную работу хотим высказать Илье Андреевичу Гуськову.

**Ссылка для цитирования:** Харитонов Д.Ю., Ахметов Д.М., Муслимов Э.Р., Гильфанов А.Р., Павлычева Н.К. Моделирование композитного волноводного голографического дисплея // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1037–1047. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1037-1047

© Харитонов Д.Ю., Ахметов Д.М., Муслимов Э.Р., Гильфанов А.Р., Павлычева Н.К., 2022

## Modelling of a composite waveguide holographic display

Danila Yu. Kharitonov<sup>1✉</sup>, Damir M. Akhmetov<sup>2</sup>, Eduard R. Muslimov<sup>3</sup>,  
Aydar R. Gilfanov<sup>4</sup>, Nadezhda K. Pavlycheva<sup>5</sup>

<sup>1,2,4</sup> OJSC “Scientific and Production Association” State Institute of the Applied Optics, Kazan, 420075, Republic of Tatarstan

<sup>3,5</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan

<sup>3</sup> NOVA Optical IR Instrumentation Group, Dwingeloo, 7991 PD, Netherlands

<sup>3</sup> Laboratoire d’Astrophysique de Marseille, Marseille, 13388, France

<sup>1</sup> danila-kharitonov2017@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1256-4474>

<sup>2</sup> akhmetov.damir.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5827-2648>

<sup>3</sup> e0123@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3242-9894>

<sup>4</sup> catakizim@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8109-5029>

<sup>5</sup> nkpavlych@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9395-3967>

### Abstract

Optical designs of waveguide-type augmented reality displays are investigated. Displays based on volume phase holograms are notable for their small size, large exit pupil and high transmittance both in the projected image channel and in the direct vision channel. However, with an increase of the aperture, field of view and working spectral range, the spread of the values of the beam angle of incidence and the wavelength increases when solving the diffraction problem at different points on the hologram surface which imposes restrictions on spatial resolution and diffraction efficiency. To overcome this phenomenon, it is proposed to use a composite hologram which represents a volume phase grating divided into zones with independently varying parameters of the fringes tilt, their shape, the holographic layer thickness and the refraction index modulation depth. We propose an algorithm that allows ray tracing through a hologram recorded by two coherent point sources using an auxiliary aspherical mirror. The initial ray tracing in the hologram recording scheme is performed using the error function minimization by the orthogonal descent and golden section methods. Based on the results obtained, the directional vectors of the diffracted beam are calculated using the Welford equation. Using the tracing results, the hologram diffraction efficiency is computed with the Kogelnik’s coupled wave theory. The proposed algorithms are implemented in the Zemax Optics Studio software. The application of the proposed composite hologram element and the tools for operation modeling are shown on an example of display operating in the range of 510–530 nm with the field of view of  $7^{\circ}36' \times 5^{\circ}48'$  and the exit pupil diameter of 8 mm. It is shown that the proposed solutions make it possible to increase the diffraction efficiency by 3.45 times. At the same time, the spatial resolution increases by 12.7 % varying across the field of view in the range of  $0'44''$ – $1'6''$ . The use of composite holograms allows one to create displays with higher spatial resolution and brightness of the projected image as well as uniformity of the characteristics across the field of view.

### Keywords

diffraction efficiency, volume phase hologram, waveguide holographic display, augmented reality

### Acknowledgements

The research is funded by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-00082. We also would like to thank our colleague Ilya A. Guskov for his help.

**For citation:** Kharitonov D.Yu., Akhmetov D.M., Muslimov E.R., Gilfanov A.R., Pavlycheva N.K. Modelling of a composite waveguide holographic display. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1037–1047 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1037-1047

### Введение

Технологии дополненной реальности (Augmented Reality, AR) позволяют совмещать в поле зрения пользователя сформированное компьютером изображение и непосредственно наблюдаемую окружающую сцену. В последние годы они представляют собой быстро развивающуюся область и достигли уровня серийного производства коммерческих устройств. Существует несколько типов оптических систем, используемых в дисплеях дополненной реальности, обладающих особыми преимуществами и недостатками [1, 2].

В частности, дисплей дополненной реальности может быть построен на базе волновода с вводом и выводом излучения при помощи голограммных элементов. Такое решение отличается компактностью, относительной простотой конструкции, высокой яркостью и разрешением проецируемого изображения в ограниченном поле зрения, а также возможностью реализации многократного вывода пучка для увеличе-

ния области согласования с глазом наблюдателя [3–5]. Однако при увеличении поля зрения, апертуры и рабочего спектрального диапазона условия восстановления голограммы значительно изменяются, что приводит к неравномерному распределению яркости и разрешения проецируемого изображения.

В настоящей работе предложено скомпенсировать отмеченные недостатки за счет использования композитной голограммной решетки (КГР), которая представляет собой голограмму, записываемую путем стыковки нескольких зон. При этом в каждой такой зоне изменяются характеристики, такие как дифракционная эффективность, поляризационные, дисперсионные и абберационные свойства. Они варьируются за счет изменения углов падения в схеме записи, аббераций записывающих волновых фронтов и времени экспозиции, которые могут контролироваться локально [6, 7]. При этом расчет и моделирование оптического элемента представляет собой сравнительно сложную вычислительную задачу. Для определения абберационных

свойств КГР необходимо провести трассировку лучей в схеме записи и затем решить уравнение трассировки для каждой точки записанной голограммы. Для расчета дифракционной эффективности (ДЭ) голограммы требуется задать параметры ее структуры, также провести трассировку лучей в схемах записи и работы, и далее рассчитать эффективность дифракции для заданной поляризации. Все указанные вычисления необходимо повторить для каждой зоны КГР со своим набором параметров. В случае, если необходимо провести численную оптимизацию оптической системы, вычисления многократно повторяются в цикле.

Вычисления могут быть проведены существующими средствами моделирования, реализованными в программных пакетах, например Zemax Optics Studio™. Однако в таком случае одна оптическая схема должна быть представлена несколькими моделями — схемами записи и работы, и моделью, учитывающей структуру голограммы для каждой зоны. При этом необходимо дополнительно проверять соответствие моделей друг другу, в частности, справедливость допущения о незначительном влиянии aberrаций высших порядков в схеме записи на распределение ДЭ.

Цель — упрощение процесса моделирования КГР за счет унификации подходов и введения ряда упрощений.

### Алгоритм трассировки лучей

Предположим, что при записи КГР использованы вспомогательные оптические элементы для формирования aberrированного волнового фронта. На практике наиболее вероятно использование одного деформируемого зеркала, устанавливаемого в одно из плеч интерферометра записи. Рассмотрим запись и работу голограммной решетки в таком простом случае (рис. 1).

Пусть форма поверхности вспомогательного зеркала 3 представлена уравнением

$$Z_L = \frac{1/R(X_L^2 + Y_L^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{X_L^2 + Y_L^2}{R^2}}} + \sum_{p=1}^m \alpha_{2p}(X_L^2 + Y_L^2)^p, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус кривизны поверхности в вершине;  $k$  — коническая постоянная;  $\alpha, p, m$  — коэффициент, порядок и число коэффициентов асферичности.

Из уравнения (1) определим нормаль к поверхности в произвольной точке в локальной системе координат зеркала:

$$\mathbf{N} = \frac{\left( \frac{\partial Z_L}{\partial X_L}, \frac{\partial Z_L}{\partial Y_L}, -1 \right)}{\sqrt{\left( \frac{\partial Z_L}{\partial X_L} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z_L}{\partial Y_L} \right)^2 + 1}}. \quad (2)$$

Перейдем от локальной (2) к глобальной системе координат, связанной с подложкой 4 записываемой решетки:

$$X_A = -X_L, \quad (3)$$

$$Y_A = -Z_L \sin(i_{22} - i_{21}) + Y_L \cos(i_{22} - i_{21}) + d_{21} \sin(i_{21}), \quad (4)$$

$$Z_A = Z_L \cos(i_{22} - i_{21}) + Y_L \sin(i_{22} - i_{21}) + d_{21} \cos(i_{21}). \quad (5)$$

Координаты вектора нормали преобразуем аналогично уравнениям (3)–(5). Координаты точечных источников записи 1 и 2 имеют вид:

$$X_{r1} = 0, Y_{r1} = d_1 \cos(i_1), Z_{r1} = -d_1 \sin(i_1), \quad (6)$$

$$X_{r2} = 0,$$

$$Y_{r2} = d_{21} \sin(i_{21}) + d_{22} \sin(2i_{22} - i_{21}), \quad (7)$$

$$Y_{r2} = d_{21} \cos(i_{21}) - d_{22} \cos(2i_{22} - i_{21}).$$

Рассчитаем направляющие векторы лучей в схеме, используя уравнения (6), (7):

$$\mathbf{V}_{22} = \frac{(X_A - X_{r2}, Y_A - Y_{r2}, Z_A - Z_{r2})}{\sqrt{(X_A - X_{r2})^2 + (Y_A - Y_{r2})^2 + (Z_A - Z_{r2})^2}}, \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{21} = \frac{(X - X_A, Y - Y_A, Z - Z_A)}{\sqrt{(X - X_A)^2 + (Y - Y_A)^2 + (Z - Z_A)^2}}, \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_1 = \frac{(X - X_{r1}, Y - Y_{r1}, Z - Z_{r1})}{\sqrt{(X - X_{r1})^2 + (Y - Y_{r1})^2 + (Z - Z_{r1})^2}}. \quad (10)$$

Предположим, что для вспомогательного зеркала 3 должно выполняться уравнение отражения в векторной форме. Однако при данной постановке задачи остается неизвестной промежуточная точка — точка падения на вспомогательное зеркало. Она может быть найдена численно как ноль функции ошибок, описывающей длину вектора отклонения от условия отражения:

$$F_{err}(X_L, Y_L) = |\mathbf{N} \times \mathbf{V}_{21} - \mathbf{N} \times \mathbf{V}_{22}|. \quad (11)$$

Если локальные координаты точки падения найдены, то перейдем к глобальным координатам (3)–(5) и запишем направляющие векторы (8)–(10). Полученные значения подставим в уравнение Уэлфорда [8] и рассчитаем направление дифрагированного луча в заданной точке падения на голограмму:

$$\mathbf{N}_S \times (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_d) = Q \frac{\lambda}{\lambda_0} \mathbf{N}_S \times (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_{21}), \quad (12)$$

где  $Q$  — порядок дифракции;  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $\lambda_0$  — длина волны записи;  $\mathbf{N}_S$  — вектор нормали в точке падения.

Отметим, что при таком подходе возможно значительно сократить число переменных, описывающих схему записи. Вычисления для схемы работы и записи в таком случае могут быть выполнены в одной модели. Тогда задача сводится к численному решению уравнения (11). При использовании уравнения (1) не возникло особых точек, разрывов или множественных локальных минимумов, и даже простые численные методы оказались достаточно эффективными. Например, уравнение (11) решим сочетанием методов золотого сечения и покоординатного спуска [9, 10]. На рис. 2 показаны типичные графики сходимости при трассировке луча с использованием этих методов. Видно, что в пределах 10 шагов можно достичь точности в 1 мкм.

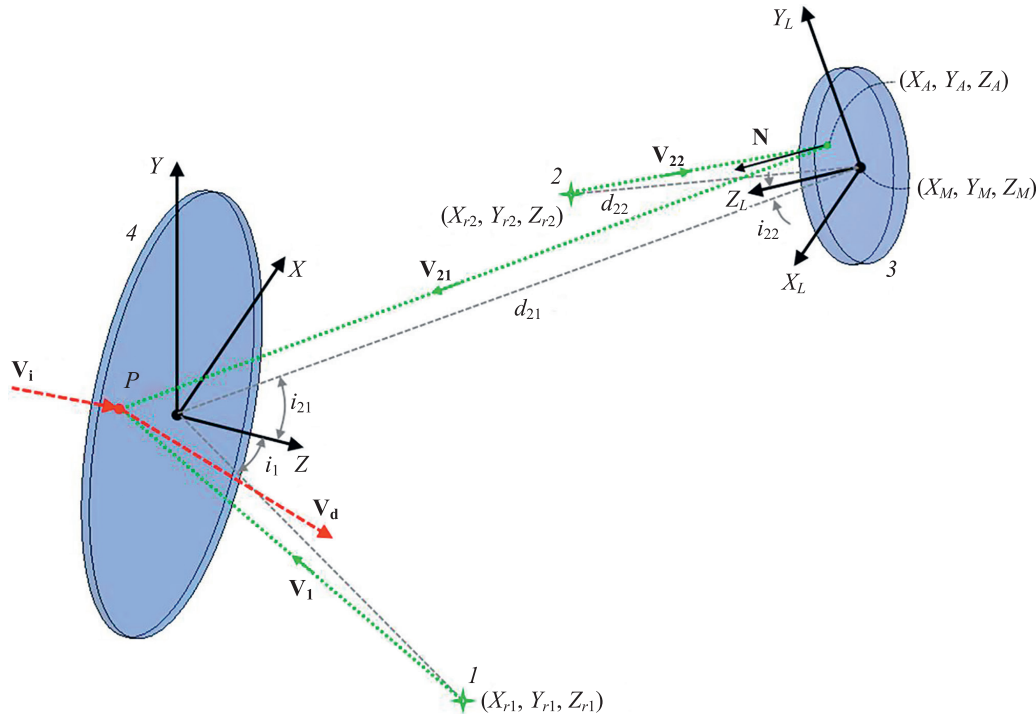


Рис. 1. Схема записи голограммы при помощи вспомогательного зеркала: 1 и 2 — точечные источники записи; 3 — вспомогательное зеркало; 4 — подложка;  $i_1, i_{21}, i_{22}$  — углы падения в схеме записи;  $P$  — точка на подложке 4;  $V_i$  — вектор падающего на подложку луча в схеме работы 4;  $V_d$  — вектор дифрагированного луча в схеме работы;  $X, Y, Z$  — декартовы координаты точки падения на поверхности зеркала; индекс  $L$  — локальная система координат, связанная с вершиной вспомогательного зеркала;  $(X_{r2}, Y_{r2}, Z_{r2})$  — координаты точечного источника записи 2;  $(X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1})$  — координаты точечного источника записи 1;  $N$  — вектор нормали на поверхности вспомогательного зеркала 3;  $(X_A, Y_A, Z_A)$  — координаты точки на поверхности вспомогательного зеркала 3;  $(X_M, Y_M, Z_M)$  — глобальные координаты начала локальной системы координат

Fig. 1. Scheme of a hologram recording using an auxiliary mirror: 1 and 2 — recording point sources; 3 — auxiliary mirror; 4 — substrate;  $i_1, i_{21}, i_{22}$  — angles of incidence in the recording scheme,  $P$  — a point on the substrate 4,  $V_i$  — the vector of a ray incident on the substrate 4 in the operation scheme,  $V_d$  — the diffracted beam vector in the operation scheme,  $X, Y, Z$  — cartesian coordinates of the point of incidence on the mirror surface,  $L$  index — the local coordinate system associated with the vertex of the auxiliary mirror,  $(X_{r2}, Y_{r2}, Z_{r2})$  — coordinates of the recording point source 2,  $(X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1})$  — coordinates of the recording point source 1,  $N$  — the normal vector on the auxiliary mirror surface 3,  $(X_A, Y_A, Z_A)$  — coordinates of a point on the surface of the auxiliary mirror 3,  $(X_M, Y_M, Z_M)$  — global coordinates of the local coordinate system origin

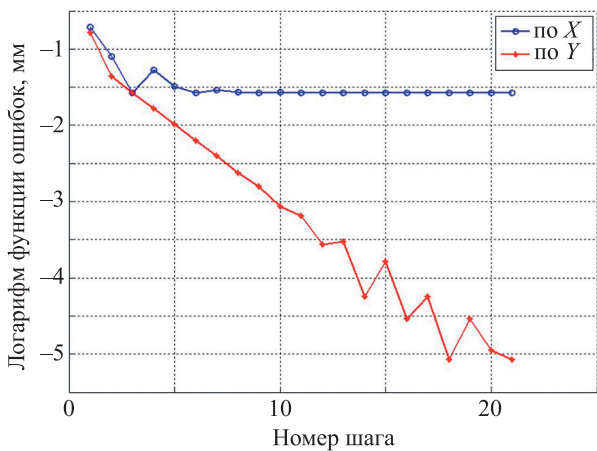


Рис. 2. График численного решения уравнения трассировки луча через вспомогательное зеркало

Fig. 2. Plot of the numerical solution of the raytracing equation through the auxiliary mirror

### Алгоритм расчета дифракционной эффективности

В настоящей работе рассмотрены объемно-фазовые голограммные элементы. Рассчитаем ДЭ такого элемента с помощью уравнений теории связанных волн Когельника [11]. Предположим, что толщина структуры голограммы велика по сравнению с ее периодом и длиной волны излучения. При этом эффект конической дифракции (т. е. дифракции в случае, когда падающий луч образует некоторый угол с плоскостью, заданной вектором решетки и ее нормалью [12]) сводится к построению проекции падающего луча на плоскость записи, а дифрагированный луч трассируется только в +1 порядке дифракции. В области точки падения каждого луча на голограмму элементарная решетка (рис. 3) восстановится. При этом такие параметры решетки, как угол наклона полос  $\phi$  и их частота  $N_{gr}$ , определим с помощью результатов трассировки в схеме записи (8)–(9):



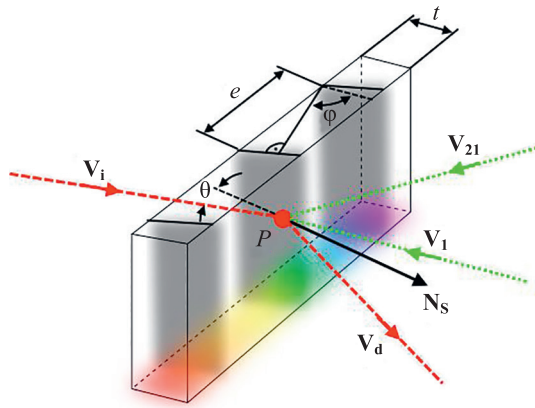


Рис. 3. Определение параметров элементарной решетки для расчета дифракционной эффективности:  $e = 1/N_{gr}$  — период элементарной решетки;  $t$  — толщина структуры голограммы;  $\varphi$  — угол наклона полосы;  $\theta$  — угол падения излучения в слое

Fig. 3. Definition of the elementary grating parameters for the diffraction efficiency calculation:  $e = 1/N_{gr}$  — fringes period,  $t$  — hologram structure thickness,  $\varphi$  — fringes tilt angle,  $\theta$  — angle of incidence inside the hologram layer

$$\varphi = 90^\circ - \frac{\arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_1)}{n}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_2)}{n}\right)}{2}, \quad (13)$$

$$N_{gr} = \frac{\sin(\alpha_1) - \sin(\alpha_2)}{\lambda_0}, \quad (14)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы падения излучения из воздуха в схеме записи;  $n$  — средний показатель преломления светочувствительного материала,

Предположим, что задача конической дифракции в этом случае может быть сведена к построению проекции падающего луча на плоскость записи. Тогда, если остальные предположения теории Когельника верны, можно вычислить дифракционную эффективность для двух состояний поляризации  $\eta_{TE}$  и  $\eta_{TM}$  и далее определить эффективность для неполяризованного излучения  $\eta$ .

$$\eta_{TE(TM)} = \frac{\sin^2 \sqrt{v_{TE(TM)}^2 + \xi^2}}{1 + (\xi/v_{TE(TM)})^2}, \quad (15)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{(\eta_{TE}^2 + \eta_{TM}^2)}}{2}, \quad (16)$$

где  $TM$  и  $TE$  — состояния поляризации;  $v$  и  $\xi$  — параметры, определяемые как  $TM$  и  $TE$ .

$$v_{TE} = \frac{\pi \Delta n t}{\lambda \sqrt{C_R C_S}}, \quad v_{TM} = \frac{\pi \Delta n t}{\lambda \sqrt{C_R C_S}} \cos(2(\theta - \varphi)), \quad (17)$$

$$\xi = \frac{\chi t}{2 C_S}, \quad \chi = K \cos(\theta - \varphi) - \frac{K^2}{4 \pi n} \lambda, \quad (18)$$

$$C_R = \cos(\varphi), \quad C_S = \cos(\varphi) - \frac{K \lambda}{2 \pi n} \cos(\theta),$$

где  $\chi$  — коэффициент отклонения фазы;  $\varphi$  — угол наклона полос, определяемый векторами записи;  $C_R$  и

$C_S$  — коэффициенты наклона (индексы  $R$  и  $S$  соответствуют опорной и объектной волнам;  $\Delta n$  — амплитуда модуляции показателя преломления;  $\theta$  — угол падения излучения в слое;  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $K$  — коэффициент поляризации

Расчет ДЭ по (15)–(16) требует задания толщины голограммы и амплитуды модуляции. Остальные параметры определены по формулам (1)–(12). Это позволяет объединить две модели в одну.

Расчеты по формулам (13)–(18) выполнены в библиотеке dll, задающей пользовательский тип поверхности в среде Zemax Optics Studio™. При этом параметры, показанные на рис. 1 и рис. 3 задает пользователь, направляющий вектор дифрагированного луча определен уравнением (12), а пропускание поверхности уравнением (16). Отметим, что описанные алгоритмы реализованы при трассировке каждого луча в последовательном режиме. Это означает, что расчет может быть проведен для голограммы на неплоской подложке, но без учета возможного многократного прохождения луча через поверхность.

### Пример расчета оптической системы

Для демонстрации предложенного подхода рассмотрим оптическую систему волноводного дисплея со следующими типичными характеристиками [13–16]: спектральный диапазон 510–530 нм, угловое поле зрения  $7^\circ 36' \times 5^\circ 48'$ , диаметр выходного зрачка 8 мм, удаление выходного зрачка 60 мм. Общий вид оптической схемы показан на рис. 4. Пучки от излучающей матрицы коллимируются асферической линзой с фокусным расстоянием 60 мм и вводятся в плоскопараллельную волноводную пластину через пропускающую голограммную решетку. Решетка имеет пространственную частоту  $1920 \text{ мм}^{-1}$  и разделена на три зоны с независимо оптимизируемыми параметрами. Волновод выполнен из стекла К8, имеет толщину 1 мм и установлен под углом  $5^\circ$  к падающему пучку.

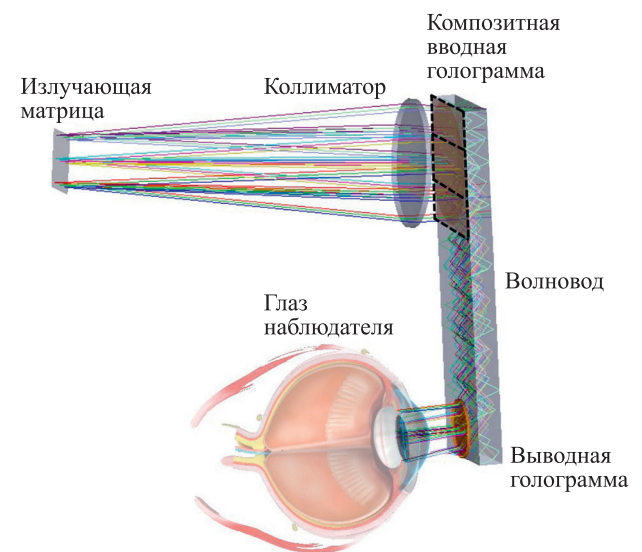


Рис. 4. Общий вид оптической схемы волноводного дисплея  
Fig. 4. General view of the waveguide display optical design

Отметим, что наличие небольшого наклона позволяет увеличить зазоры для установки узла излучающей матрицы и снизить пространственную частоту голограммы. Пучок распространяется по волноводу за счет полного внутреннего отражения и выводится через пропускающую голограмму с той же пространственной частотой.

Коллиматор представляет собой одиночную линзу, выполненную из полиметилметакрилата. Первая поверхность является асферической с вершинным радиусом  $R_1 = 48,491$  мм, конической постоянной  $k = -14,539$  и коэффициентами асферичности  $\alpha_4 = 1,143 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha_6 = -2,110 \cdot 10^{-8}$ , вторая поверхность — сферической с радиусом  $R_1 = -75,246$  мм. Подобные элементы достаточно типичны для крупносерийных оптических устройств и могут изготавливаться с помощью прецизионного моллирования [17]. Коллиматор позволяет получить коллимированный пучок хорошего качества для монохроматического излучения, но при работе с протяженным полем зрения обладает остаточными aberrациями. На рис. 5, а показано распределение среднеквадратического радиуса точечной диаграммы для коллиматора в плоскости наилучшей установки при расчете в обратном ходе. КГР позволяет ввести дополнительную коррекцию таких остаточных aberrаций. Отметим, что использование однолинзового коллиматора является предельным случаем, позволяющим более наглядно продемонстрировать особенности использования КГР.

Другой эффект, который следует учесть при расчете КГР в подобной схеме, заключается в изменении условий восстановления для разных точек голограммы. На рис. 5, б показано изменение угла падения главного луча по световой зоне голограммы. Очевидно, что такое изменение приведет к локальным изменениям ДЭ и, как следствие, неравномерной яркости проецируемого изображения. Оптимизация параметров структуры голограммы для отдельных зон позволяет уменьшить данный нежелательный эффект.

Для выполнения оптимизации определим следующие условия: выходной зрачок системы совпадает со зрачком глаза, голограмма не совпадает со зрачком коллимационной системы, пучки для разных точек поля зрения разделены в плоскости голограммы. Данные условия позволяют корректировать ДЭ и aberrации для разных точек поля за счет разбиения голограммы на зоны и последующей независимой оптимизации параметров отдельных зон КГР.

На рис. 5, с показаны следы пучков для разных точек поля зрения на световой зоне вводимой голограммы.

Отметим, что известны другие решения, также использующие для повышения характеристик волноводного дисплея изменение параметров структуры голограммного элемента по его площадке. Например, в дисплее DigiLens [18] использована решетка с постоянным периодом и непрерывно изменяющимся наклоном полос, позволяющая компенсировать изменение ДЭ в зависимости от угла падения. В работе [19] предложен вариант с разбиением выводного дифракционного элемента на множество дискретных элементов с независимо изменяющимися значениями периода и толщины структуры. В настоящей работе представлено решение применения небольшого числа дискретных зон, в каждой из которых оптимизированы профиль полос голограммы, определяющий ДЭ и их картина полос, задающая aberrационные свойства. Подход реализован на базе существующей технологии записи физических голограмм и является более гибким и технологичным, особенно в случае изготовления единичного прототипа или малой партии элементов.

Алгоритм оптимизации рассматриваемой оптической схемы аналогичен описанному в работе [6]. Уравнение поверхности зеркала (1) ограничено 4-м порядком. Схема записи вводимой КГР на длине волны 532 нм, полученная в результате, показана на рис. 6. Параметры, описывающие каждую из зон, сведены в табл. 1.

Измерение дифракционной эффективности выполнено по стандартным кривым пропускания для трех

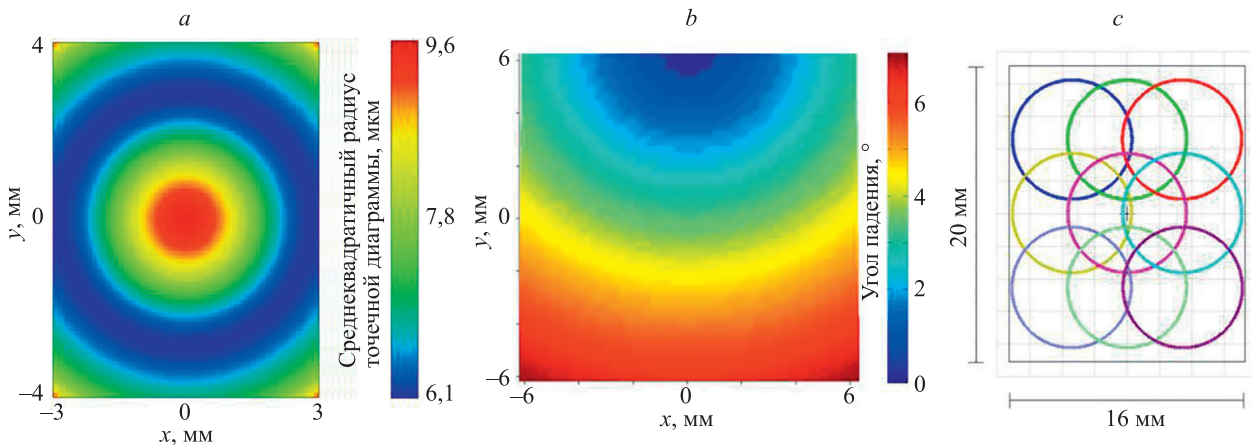


Рис. 5. Эффекты, компенсируемые при помощи композитной голограммной решетки: распределение остаточных aberrаций коллимирующей линзы по полю зрения (а); изменение угла падения главного луча на вводимую голограмму по ее световой площадке (б); диаграмма заполнения световой зоны голограммы (с)

Fig. 5. The effects compensated with the composite hologram grating: the distribution of residual aberrations of the collimating lens over the field of view (a); the change in the angle of incidence of the chief ray on the incoupling hologram across its clear aperture (b); filling diagram of the hologram clear aperture (c)

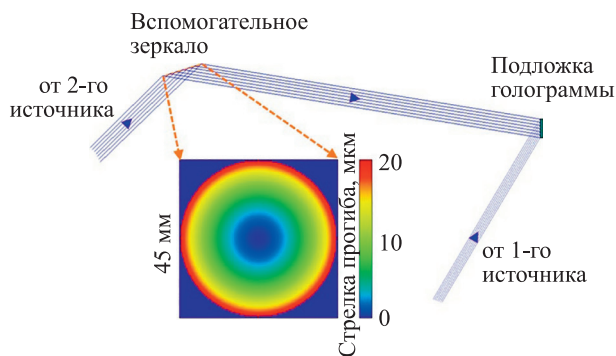


Рис. 6. Схема записи вводной голограммной решетки  
 Fig. 6. The recording scheme of the incoupling hologram grating

контрольных точек поля зрения (рис. 7). На графиках показано распределение ДЭ в меридиональном сечении. Видно, что значения ДЭ остаются практически неизменными по сагиттальному сечению зрачка. Использование КГР с оптимизированной структурой позволило повысить ДЭ в 1,08–3,45 раз по сравнению с исходным вариантом, основанном на выполнении условия Брэгга, а также повысить ее равномерность.

Выполним оценку влияния изначальных допущений и упрощений. Для этого сравним результаты, полученные с помощью теории Когельника и с использованием численного метода строгого анализа связанных волн

(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA), реализованного в программе *reticolo* [20]. Результаты расчета ДЭ для главного луча пучка, проходящего через центр вводной голограммы для данных методов представлены на рис. 8. Видно, что использование упрощенной аналитической теории приводит к небольшой ошибке в положении максимума кривой ДЭ. Эффективность порядков дифракции, не учитываемых в расчете, не превосходит 8 %. При введении в расчет угла конической дифракции  $\delta = 10^\circ$ , превосходящего угловое поле зрения системы, изменение ДЭ не превышает 2,8 %, что можно считать незначительным отклонением.

В данном случае предположение о том, что толщина структуры решетки велика в сравнении с ее периодом и рабочей длиной волны, выполняется не строго, и голограмма работает в промежуточном режиме. Однако, как указано в [21], для подобных случаев использование теории связанных волн остается предпочтительным в сравнении с теорией Рамана–Ната [22]. Как показал выполненный анализ, вносимая данным упрощением ошибка при вычислении ДЭ невелика.

Для оценки качества изображения применены точечные диаграммы (рис. 9). Использование КГР, записываемой с помощью вспомогательного зеркала, позволило уменьшить среднеквадратический угловой размер диаграмм с  $0'49''-1'14''$  до  $0'44''-1'6''$ .

Отметим, что в случае записи вводной голограммы с помощью вспомогательного зеркала изменяются требования к точности изготовления и позиционирования

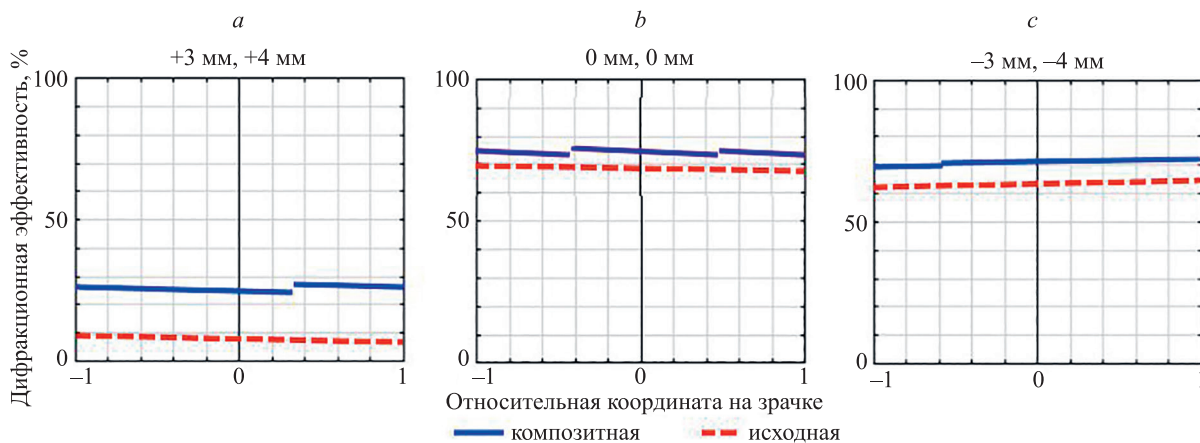


Рис. 7. Пространственное распределение дифракционной эффективности в поле зрения с различными линейными координатами: верхний правый угол (3; 4) мм (a); центр (0; 0) мм (b); нижний левый угол (-3; -4) мм (c)  
 Fig. 7. Spatial distribution of diffraction efficiency in the field of view with different linear coordinates: upper right corner (3; 4) mm (a), center (0; 0) mm (b), lower left corner (-3; -4) mm (c)

Таблица 1. Параметры композитной голограммной решетки  
 Table 1. Parameters of composite hologram grating

Параметр	Зона		
	Верхняя	Средняя	Нижняя
Угол падения на вспомогательное зеркало	65°6'	63°12'	63°36'
Стрелка прогиба вспомогательного зеркала, мкм	19,9	18,3	19,1
Толщина голограммы, мкм	3,95	3,74	3,73
Амплитуда модуляции	0,062	0,066	0,069



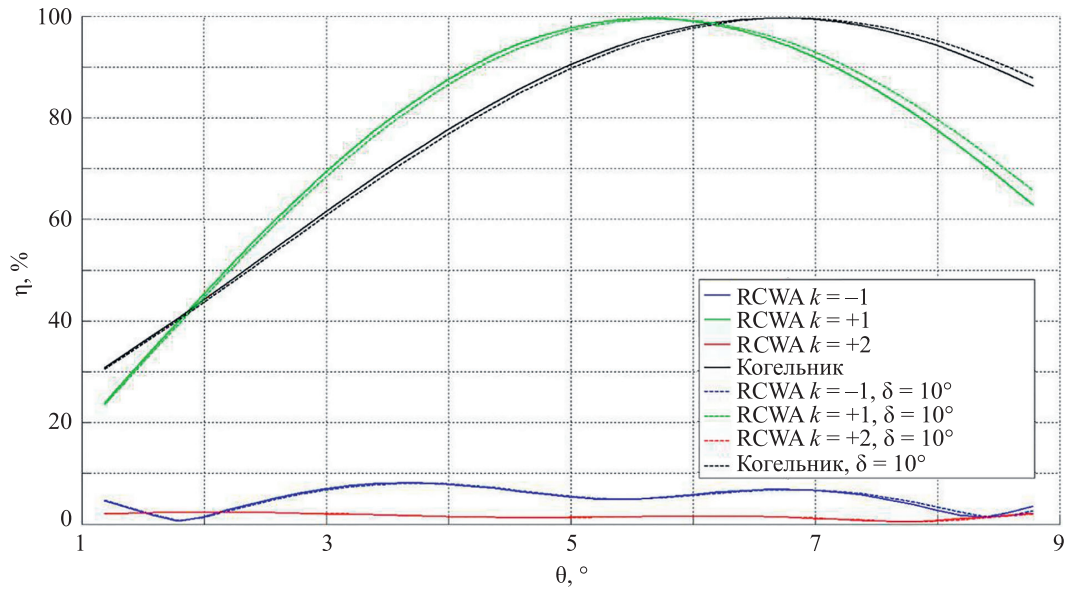


Рис. 8. Сравнение дифракционной эффективности, рассчитанной по аналитическим соотношениям теории Когельника и методом RCWA

Fig. 8. Comparison of the diffraction efficiency calculated by the analytical equations of the Kogelnik theory and the RCWA method

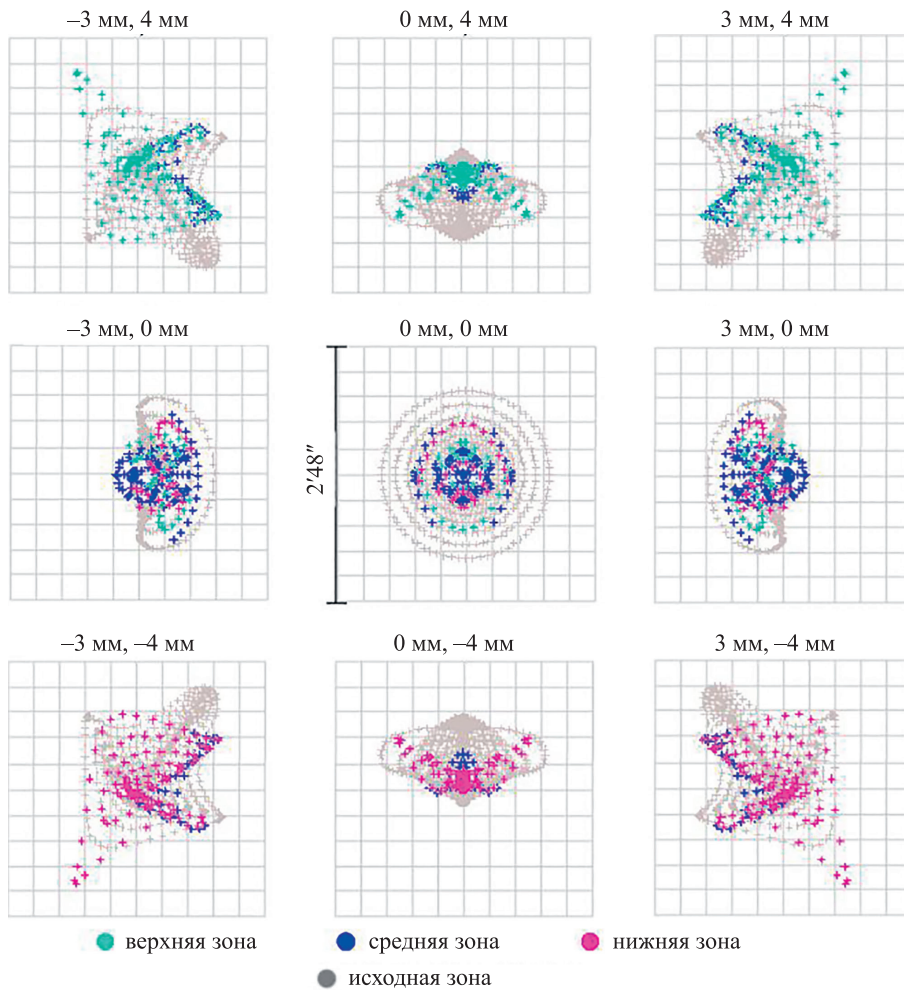


Рис. 9. Точечные диаграммы волноводного дисплея для девяти контрольных точек поля зрения с координатами (x; y) мм в плоскости предметов

Fig. 9. Spot diagrams of the waveguide display for 9 control points across the field of view with coordinates (x; y) mm in the plane of objects



Таблица 2. Изменение чувствительности системы к ошибкам позиционирования

Table 2. Changing the system sensitivity to positioning errors

Номер	Параметр	Исходная схема	Схема с КГР
1	Расстояние матрица-коллиматор, угл. мин/мм	1,164	0,902
2	Расстояние коллиматор-голограмма, угл. мин/мм $\times 10^{-13}$	1,17	0,001
3	Децентрировка матрица-коллиматор по X, угл. мин/мм	0,007	0,022
4	Децентрировка матрица-коллиматор по Y, угл. мин/мм	0,012	0,046
5	Разворот матрица-коллиматор по X, угл. мин/град.	0,030	0,096
6	Разворот матрица-коллиматор по Y, угл. мин/град.	0,022	0,050
7	Децентрировка коллиматор-голограмма по X, угл. мин/мм	$1,14 \cdot 10^{-13}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$
8	Децентрировка коллиматор-голограмма по Y, угл. мин/мм	$9,78 \cdot 10^{-14}$	0,015
9	Разворот коллиматор-голограмма по X, угл. мин/град.	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$
10	Разворот коллиматор-голограмма по Y, угл. мин/град.	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$9,19 \cdot 10^{-6}$

элементов оптической схемы. Подробный анализ влияния КГР на чувствительность оптических систем, в которых она используется, к ошибкам изготовления и сборки потребует отдельного исследования. Приведем сравнение чувствительности схемы к ошибкам позиционирования элементов, общих для исходной и модифицированной схем — светоизлучающей матрицы и коллимирующей линзы. Расчет проведен с помощью стандартных инструментов Zemax Optics Studio™. В качестве критерия качества изображения использован среднеквадратический радиус точечной диаграммы — среднее значение по полю зрения. Значения чувствительности, полученные для изолированных параметров без использования компенсаторов и выраженные как отношение изменения критерия к изменению конструктивного параметра, приведены в табл. 2.

Величины чувствительности, относящиеся к положению плоской дифракционной решетки с прямыми эквидистантными штрихами в параллельном пучке, т. е. ее линейным смещением относительно коллиматора (параметры 2, 7 и 8, табл. 2), практически равны нулю. Как и следовало ожидать, продольное и поперечное смещения такой классической решетки никак не сказывается на выбранных критериях качества изображения. Поскольку КГР записывается aberrированными пучками, штрихи решетки не являются строго прямолинейными и эквидистантными, а схема с ней не строго ин-

вариантна к положению решетки в параллельном пучке. Приведенные результаты подтвердили значительный относительный рост чувствительности схемы к положению дисплея и коллиматора. При этом абсолютные значения чувствительности остаются весьма низкими. Следовательно, можно считать, что использование более сложного голограммного элемента в данном случае не приведет к заметному ужесточению требований к изготовлению и сборке.

### Заключение

Представлен подход к моделированию оптических систем с композитными голограммными элементами. При наличии ряда допущений к схеме записи голограммного элемента можно выполнить расчет и оптимизацию его aberrаций, а также дифракционной эффективности в единой модели. Реализованы предложенные алгоритмы в программном продукте Zemax Optics Studio™.

На примере компактного монохромного дисплея дополненной реальности с полем зрения  $7^{\circ}36' \times 5^{\circ}48'$  и выходным зрачком 8 мм продемонстрирован процесс расчета и анализа работы композитной голограммы. В частности, показаны повышения дифракционной эффективности до 3,45 раз и пространственного разрешения на 12,7 %.

### Литература

1. Cakmakci O., Rolland J.P. Head-worn displays: A review // *Journal of Display Technology*. 2016. V. 2. N 3. P. 199–217. <https://doi.org/10.1109/JDT.2006.879846>
2. Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11062. P. 110620J. <https://doi.org/10.1117/12.2527680>
3. Amitai Y., Friesem A.A., Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays // *Applied Optics*. 1989. V. 28. N 16. P. 3405–3416. <https://doi.org/10.1364/AO.28.003405>
4. Yoshida T., Tokuyama K., Takai Y., Tsukuda D., Kaneko T., Suzuki N., Anzai T., Yoshikaie A., Akutsu K., Machida A. A plastic holographic waveguide combiner for light-weight and highly-transparent augmented reality glasses // *Journal of the Society for*

### References

1. Cakmakci O., Rolland J.P. Head-worn displays: A review. *Journal of Display Technology*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 199–217. <https://doi.org/10.1109/JDT.2006.879846>
2. Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11062, pp. 110620J. <https://doi.org/10.1117/12.2527680>
3. Amitai Y., Friesem A.A., Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 16, pp. 3405–3416. <https://doi.org/10.1364/AO.28.003405>
4. Yoshida T., Tokuyama K., Takai Y., Tsukuda D., Kaneko T., Suzuki N., Anzai T., Yoshikaie A., Akutsu K., Machida A. A plastic holographic waveguide combiner for light-weight and highly-transparent augmented reality glasses. *Journal of the Society for*

- Information Display, 2018, V. 26, N 5, P. 280–286. <https://doi.org/10.1002/jsid.659>
5. Mukawa H., Akutsu K., Matsumura I., Nakano S., Yoshida T., Kuwahara M., Aiki K. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms // *Journal of the Society for Information Display*, 2009, V. 17, N 3, P. 185–193. <https://doi.org/10.1889/JSID17.3.185>
  6. Муслимов Э.Р., Павлычева Н.К., Гуськов И.А. Концепция композитных голограммных оптических элементов // *Фотоника*, 2020, Т. 14, № 7, С. 586–599. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.586.599>
  7. Muslimov E., Pavlycheva N., Guskov I., Akhmetov D., Kharitonov D.Yu. Spectrograph with a composite holographic dispersive element // *Proceedings of SPIE*, 2021, V. 11871, P. 187198. <https://doi.org/10.1117/12.2596922>
  8. Welford W. A vector raytracing equation for hologram lenses of arbitrary shape // *Optics Communications*, 1975, V. 14, N 3, P. 322–323. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(75\)90327-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(75)90327-2)
  9. Гребенникова И.В. Методы оптимизации: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2017. 148 с.
  10. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: учебное пособие. М.: МФТИ, 2018. 181 с.
  11. Kogelnik H. Coupled wave analysis for thick hologram gratings // *The Bell System Technical Journal*, 1969, V. 48, N 9, P. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
  12. Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1995, V. 12, N 5, P. 1068–1076. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001068>
  13. Романова Г.Э., Нгуен Н.Ш. Анализ аберраций клина как компенсационного и функционального элемента в системах дополненной и виртуальной реальности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2021, Т. 21, № 6, С. 808–816. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-808-816>
  14. Иванюк А.А. Проектирование оптического модуля очков дополненной реальности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2020, Т. 20, № 5, С. 642–648. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648>
  15. Романова Г.Э., Корешев С.Н., Сидоренко В.С. Расчет и моделирование световодной системы дополненной реальности на базе голографических элементов // *HOLOEXPO 2019. XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: тезисы докладов*, 2019, С. 164–167.
  16. Град Я.А., Николаев В.В., Одинокоев С.Б., Соломенко А.Б. Индикатор дополненной реальности на основе световодной пластины с пропускающим ДОЭ // *Голография: наука и практика. XIV международная конференция HOLOEXPO 2017: тезисы докладов*, 2017, С. 133–137.
  17. Peixoto C., Valentim P.T., Sousa P.C., Dias D., Araújo C., Pereira D., Machado C.F., Pontes A.J., Santos H., Cruz S. Injection molding of high-precision optical lenses: A review // *Precision Engineering*, 2022, V. 76, P. 29–51. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.002>
  18. Waldern J.D., Grant A.J., Popovich M.M. DigiLens switchable Bragg grating waveguide optics for augmented reality applications // *Proceedings of SPIE*, 2018, V. 10676, P. 106760G. <https://doi.org/10.1117/12.2315719>
  19. Ангервакс А.Е., Муравьев Н.В., Борисов В.Н., Окунь Р.А., Востриков Г.Н., Попов М.В. Волновод с сегментированными дифракционными оптическими элементами и окологлазный дисплей. Патент RU2752556C1. Бюл. 2021, № 22.
  20. Lalanne P., Hugonin J.-P. High-order effective-medium theory of subwavelength gratings in classical mounting: application to volume holograms // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1998, V. 15, N 7, P. 1843–1851. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.15.001843>
  21. Gerritsen H.J., Thornton D.K., Bolton S.R. Application of Kogelnik's two-wave theory to deep, slanted, highly efficient, relief transmission gratings // *Applied Optics*, 1991, V. 30, N 7, P. 807–814. <https://doi.org/10.1364/AO.30.000807>
  22. Moharam M.G., Young L. Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes // *Applied Optics*, 1978, vol. 17, no. 11, pp. 1757–1759. <https://doi.org/10.1364/AO.17.001757>
  23. Information Display, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 280–286. <https://doi.org/10.1002/jsid.659>
  24. Mukawa H., Akutsu K., Matsumura I., Nakano S., Yoshida T., Kuwahara M., Aiki K. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, vol. 17, no. 3, pp. 185–193. <https://doi.org/10.1889/JSID17.3.185>
  25. Muslimov E.R., Pavlycheva N.K., Guskov I.A. Concept of composite holographic optical elements. *Photonics Russia*, 2020, vol. 14, no. 7, pp. 586–599. (in Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.586.599>
  26. Muslimov E., Pavlycheva N., Guskov I., Akhmetov D., Kharitonov D.Yu. Spectrograph with a composite holographic dispersive element. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11871, pp. 187198. <https://doi.org/10.1117/12.2596922>
  27. Welford W. A vector raytracing equation for hologram lenses of arbitrary shape. *Optics Communications*, 1975, vol. 14, no. 3, pp. 322–323. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(75\)90327-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(75)90327-2)
  28. Grebennikova I.V. *Optimization Methods*. Yekaterinburg, UrFU, 2017, 148 с. (in Russian)
  29. Gasnikov A.V. *Modern Numerical Methods of Optimization. Universal Gradient Descent Method*. Moscow, MIPT, 2018, 181 p. (in Russian)
  30. Kogelnik H. Coupled wave analysis for thick hologram gratings. *The Bell System Technical Journal*, 1969, vol. 48, no. 9, pp. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
  31. Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1995, vol. 12, no. 5, pp. 1068–1076. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.12.001068>
  32. Romanova G.E., Nguyen N.S. Aberration analysis of a wedge as a compensator element in augmented and virtual reality systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 808–816. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-808-816>
  33. Ivaniuk A.A. Optical module design for augmented reality glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 642–648. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648>
  34. Romanova G.E., Koreshev S.N., Sidorenko V.S. Calculation and modeling of the augmented reality optical-waveguide structure based on holographic elements. *HOLOEXPO 2019: XVI International Conference on Holography and Applied Optical Technology. Proceedings*, 2019, pp. 164–167. (in Russian)
  35. Grad Ya.A., Nikolaev V.V., Odinkov S.B., Solomashenko A.B. Augmented reality indicator based on a lightguide plate with transmissive DOEs. *Holography. Science and Practice XIV International Conference HOLOEXPO 2017. Proceedings*, 2017, pp. 133–137. (in Russian)
  36. Peixoto C., Valentim P.T., Sousa P.C., Dias D., Araújo C., Pereira D., Machado C.F., Pontes A.J., Santos H., Cruz S. Injection molding of high-precision optical lenses: A review. *Precision Engineering*, 2022, vol. 76, pp. 29–51. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.002>
  37. Waldern J.D., Grant A.J., Popovich M.M. DigiLens switchable Bragg grating waveguide optics for augmented reality applications. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10676, pp. 106760G. <https://doi.org/10.1117/12.2315719>
  38. Angervaks A.E., Muravev N.V., Borisov V.N., Okun R.A., Vostrikov G.N., Popov M.V. Waveguide with segmented diffraction optical elements and near-eye display. *Patent RU2752556C1*, 2021. (in Russian)
  39. Lalanne P., Hugonin J.-P. High-order effective-medium theory of subwavelength gratings in classical mounting: application to volume holograms. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1998, vol. 15, no. 7, pp. 1843–1851. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.15.001843>
  40. Gerritsen H.J., Thornton D.K., Bolton S.R. Application of Kogelnik's two-wave theory to deep, slanted, highly efficient, relief transmission gratings. *Applied Optics*, 1991, vol. 30, no. 7, pp. 807–814. <https://doi.org/10.1364/AO.30.000807>
  41. Moharam M.G., Young L. Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes. *Applied Optics*, 1978, vol. 17, no. 11, pp. 1757–1759. <https://doi.org/10.1364/AO.17.001757>

### Авторы

**Харитонов Данила Юрьевич** — инженер, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Республика Татарстан, [sc 57338964100](https://orcid.org/0000-0002-1256-4474), <https://orcid.org/0000-0002-1256-4474>, [danila-haritonov2017@mail.ru](mailto:danila-haritonov2017@mail.ru)

**Ахметов Дамир Маратович** — инженер-конструктор, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Республика Татарстан, [sc 57339030100](https://orcid.org/0000-0001-5827-2648), <https://orcid.org/0000-0001-5827-2648>, [akhmetov.damir.97@mail.ru](mailto:akhmetov.damir.97@mail.ru)

**Муслимов Эдуард Ринатович** — доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420075, Республика Татарстан; инженер-оптик, Нидерландский институт радиоастрономии, Двингело, 7991 PD, Нидерланды; ассоциированный исследователь, Астрофизическая лаборатория Марселя, Марсель, 13388, Франция, [sc 55785536800](https://orcid.org/0000-0002-3242-9894), <https://orcid.org/0000-0002-3242-9894>, [e0123@mail.ru](mailto:e0123@mail.ru)

**Гильфанов Айдар Рустемович** — инженер-технолог, Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Республика Татарстан, [sc 57339030100](https://orcid.org/0000-0001-8109-5029), <https://orcid.org/0000-0001-8109-5029>, [cataklizm@inbox.ru](mailto:cataklizm@inbox.ru)

**Павлычева Надежда Константиновна** — доктор технических наук, профессор, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420075, Республика Татарстан, [sc 6701787491](https://orcid.org/0000-0001-9395-3967), <https://orcid.org/0000-0001-9395-3967>, [nkpavlych@rambler.ru](mailto:nkpavlych@rambler.ru)

*Статья поступила в редакцию 13.07.2022  
Одобрена после рецензирования 10.10.2022  
Принята к печати 30.11.2022*

### Authors

**Danila Yu. Kharitonov** — Engineer, OJSC “Scientific and Production Association” State Institute of the Applied Optics, Kazan, 420075, Republic of Tatarstan, [sc 57338964100](https://orcid.org/0000-0002-1256-4474), <https://orcid.org/0000-0002-1256-4474>, [danila-haritonov2017@mail.ru](mailto:danila-haritonov2017@mail.ru)

**Damir M. Akhmetov** — Design Engineer, OJSC “Scientific and Production Association” State Institute of the Applied Optics, Kazan, 420075, Republic of Tatarstan, [sc 57339030100](https://orcid.org/0000-0001-5827-2648), <https://orcid.org/0000-0001-5827-2648>, [akhmetov.damir.97@mail.ru](mailto:akhmetov.damir.97@mail.ru)

**Eduard R. Muslimov** — D. Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan; Optical Engineer, NOVA Optical IR Instrumentation Group, Dwingeloo, 7991 PD, Dwingeloo, The Netherlands; Associated Researcher, Laboratoire d’Astrophysique de Marseille, Marseille, 13388, France, [sc 55785536800](https://orcid.org/0000-0002-3242-9894), <https://orcid.org/0000-0002-3242-9894>, [e0123@mail.ru](mailto:e0123@mail.ru)

**Aydar R. Gilfanov** — Engineer-Technologist, OJSC “Scientific and Production Association” State Institute of the Applied Optics, Kazan, 420075, Republic of Tatarstan, [sc 57339030100](https://orcid.org/0000-0001-8109-5029), <https://orcid.org/0000-0001-8109-5029>, [cataklizm@inbox.ru](mailto:cataklizm@inbox.ru)

**Nadezhda K. Pavlycheva** — D. Sc., Full Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, [sc 6701787491](https://orcid.org/0000-0001-9395-3967), <https://orcid.org/0000-0001-9395-3967>, [nkpavlych@rambler.ru](mailto:nkpavlych@rambler.ru)

*Received 13.07.2022  
Approved after reviewing 10.10.2022  
Accepted 30.11.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»