



ВЫСОКОАПЕРТУРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПРИНТЕРА

А.Ю.Жердев, С.Б.Одинокоев, д.т.н., Д.С.Лушников,
МГТУ им. Н.Э.Баумана;
Ч.Б.Кайтуков, ФГУП "НТЦ "Атлас"

Предложена оптическая схема получения голограммных стереограмм с углом обзора до 120°. Схема разработана на основе совместного использования диффузора и дифракционного оптического элемента – высокоапертурной дифракционной линзы с относительным отверстием до 1:0,3, в качестве которой служит бинарная зонная пластинка Френеля.

Голограммная стереограмма (ГС) – это стереограмма, в которой стереобраз формируется посредством субголограмм, называемых голопикселями [1, 2, 3]. Использование голопикселей в качестве элемента стереограммы позволяет реализовать произвольную зависимость яркости элемента стереограммы от направления наблюдения. Матрица голопикселей составляет голограммную стереограмму. Таким образом, голопиксел выполняет функцию селекции стереокадров, подобно тому, как в стереограммах на основе линзового растра эту функцию выполняет линзовый растр, наложенный на специальное полиграфическое изображение, или в анаглифической стереографии – анаглифические очки. Оптико-электронную систему для получения ГС обычно называют голографическим принтером [4].

Голограммная стереография позволяет получать высококачественные трехмерные и цветные художественные изображения произвольных объектов и сцен. При этом стереограммы в отличие от аналоговых голограмм не ограничены по размеру и не требуют наличия объекта в схеме записи. А в отличие от стереограмм на основе линзовых растров могут восстанавливать на порядок больше стереоракурсов (на данный момент до двух тысяч). Входными данными для получения голограммных стереограмм являются компьютерная модель, видеоролик или серия фотоснимков объекта или сцены. ГС могут вос-

HIGH-APERTURE DIFFRACTIVE LENS FOR HOLOGRAPHIC PRINTER

A.Y.Zherdev, S.B.Odinokov, D.Eeng.Sc.,
D.S.Lushnikov,
Bauman MSTU;
Ch.B.Kaytukov, FSUE "RDC "Atlas"

In this work we suggest an optical scheme of the holographic stereogram with the viewing angle increased to 120°. The scheme is based on the joint use of the diffuser and diffractive optical element – high-aperture diffractive lens with a relative aperture of 1:0.3. The binary Fresnel – zone plate was used as high-aperture diffractive lens.

INTRODUCTION

Holographic stereogram (HS) is a stereogram wherein the stereo image is formed by sub-holograms called holopixels [1, 2, 3]. Using holopixels as stereogram element enables for implementation of arbitrary dependence of the stereogram luminance element on the observation direction. Holopixels' matrix is a stereogram hologram. Thus, the holopixel performs a selection function of stereoframes similar to lenticular screen superimposed on a special printing image performing this function in stereograms based on lenticular screen, or anaglyph glasses in anaglyph stereography. Optoelectronic system for HS is usually called a holographic printer [4].

Holographic stereograph allows obtaining high-quality three-dimensional and colorful artistic image of arbitrary objects and scenes. Thus stereograms, unlike analog holograms, are not limited in size and do not require the availability of the object in the recording geometry. And unlike stereograms based on lenticular screen, they can restore next larger stereo-perspectives (currently, up to two thousand stereo-perspectives). The input data for holographic stereograms is a computer model, a video or a series of photos of an object or a scene. HS can reproduce the effect of movement or object transformation.

The first holographic printers employed heavily-scattering diffusing screen to obtain a holopixel [1,

производить эффект движения или трансформации объекта.

В первых голографических принтерах для получения голопиксела использовался сильно рассеивающий диффузный экран [1, 5, 6, 7]. Записываемое изображение, выведенное на транспарант, проецируется на диффузный экран. На экране лазерное излучение претерпевает сильное рассеяние, за счет чего в апертуру получаемого голопиксела попадает излучение от каждой точки экрана, формируя конус сходящихся лучей. Однако голографический принтер на основе диффузного экрана обладает очень высокими энергетическими потерями, а угол обзора ГС ограничен 40–60°.

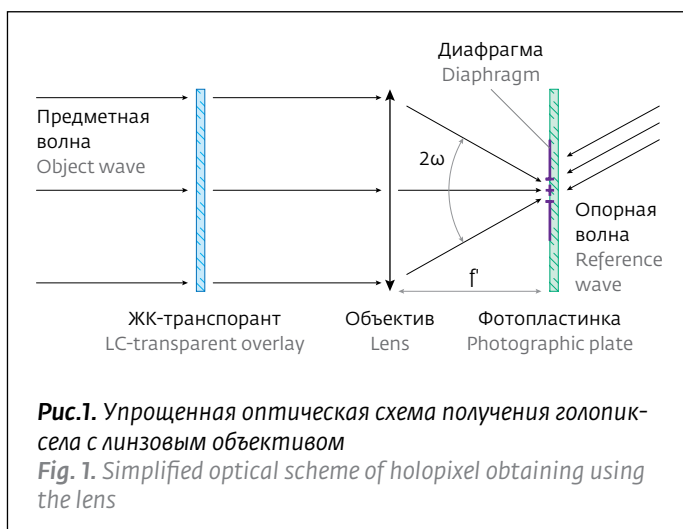
Позже для формирования конуса сходящихся лучей стали использовать высокоапертурные линзовые объективы [8, 9, 10, 11]. Пучок лучей, прошедший транспарант, попадает на линзовый объектив, который формирует конус лучей, сходящихся в области получаемого голопиксела (рис.1).

Таким образом, угол обзора 2ω изображения, восстанавливаемого ГС, точно определяется удвоенным задним апертурным углом 2σ объектива, использующегося для получения голопиксела, как показано на рис.1. Для формирования равномерно светящегося голопиксела линзовый объектив используется совместно со слабо рассеивающим диффузором, расположенным, например, сразу за транспарантом.

Однако ввиду принципиальных ограничений линзовой оптики невозможно получить объектив с задним апертурным углом более, чем $\sigma=45^\circ$ (а следовательно, невозможно получить ГС с углом обзора более $2\omega=90^\circ$). Наиболее распространенные ГС компании Geola обладают максимальным углом обзора 85° [4].

Для достижения более высокого угла обзора предлагается заменить линзовый объектив в голографическом принтере дифракционным оптическим элементом (ДОЭ), как показано на рис.2.

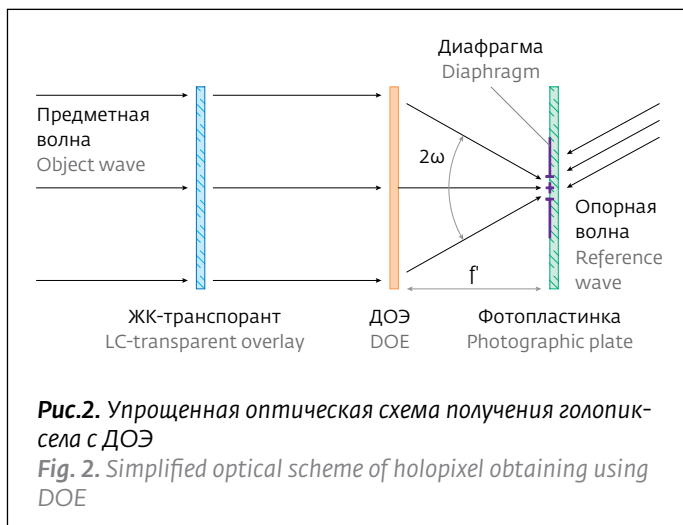
Задача ДОЭ в данной оптической системе заключается в концентрации лучей, падающих и дифрагирующих на ДОЭ, в область получения голопиксела. Создать линзу Френеля с таким большим относительным отверстием невозможно, поэтому предлагается использовать трехмерную или двумерную голограмму. С помощью ДОЭ, угол дифракции излучения на краю которого составляет $\sigma \approx 60^\circ$, возможно создать ГС с углом обзора $2\sigma \approx 120^\circ$. Относительное отверстие такого ДОЭ составит 1:0,3.



5, 6, 7]. The recorded image displayed on transparent overlay is projected on the diffusing screen. On the screen, laser light undergoes a strong scattering, thereby light from each point of the screen is directed in the aperture of the resulting holopixel, forming a cone of converging beams. However, the holographic printer based on the diffusing screen has very high energy losses, and the HS viewing angle is limited to 40–60°.

Later, high-aperture lenses have been used for the formation of a cone of converging beams [8, 9, 10, 11]. The beams passing the transparent overlay reach the lens that forms a cone of beams converging in the obtained holopixel (Fig. 1).

Therefore, the viewing angle 2ω of the image of the received HS is precisely determined by double rear aperture angle 2σ of the lens used to produce holopixels, as shown in Fig. 1. To form a uniformly glowing holopixel, the lens is used in conjunction



Однако ДОЭ обладают рядом недостатков, проиллюстрированных на рис.3. Во-первых, ДОЭ восстанавливает, помимо сходящейся волны "+1" дифракционного порядка, расходящуюся волну "-1" дифракционного порядка и пропускает "0" проходящий порядок. Наличие паразитных дифракционных порядков делает практически невозможным использование данного ДОЭ в качестве изображающего объектива, однако в голографическом принтере ДОЭ будет использоваться совместно с диафрагмой в области фокуса ДОЭ, которая определяет размер получаемого голопиксела. Данная диафрагма режеткирует проходящий и расходящийся дифракционные порядки, нивелируя тем самым их наличие.

Во-вторых, ДОЭ может обладать высокими aberrациями и большим aberrационным пятном рассеяния. Это обстоятельство делает ДОЭ еще менее пригодным для использования в качестве изображающего объектива. Однако использование ДОЭ в голографическом принтере совместно с диффузором, предназначенным для формирования в области получения голопиксела равномерного поля вместо пятна рассеяния, позволяет нивелировать и этот недостаток ДОЭ.

Таким образом, несмотря на то, что подобный высокочастотный ДОЭ не может использоваться в качестве изображающего объектива, он вполне подходит для использования в голографическом принтере.

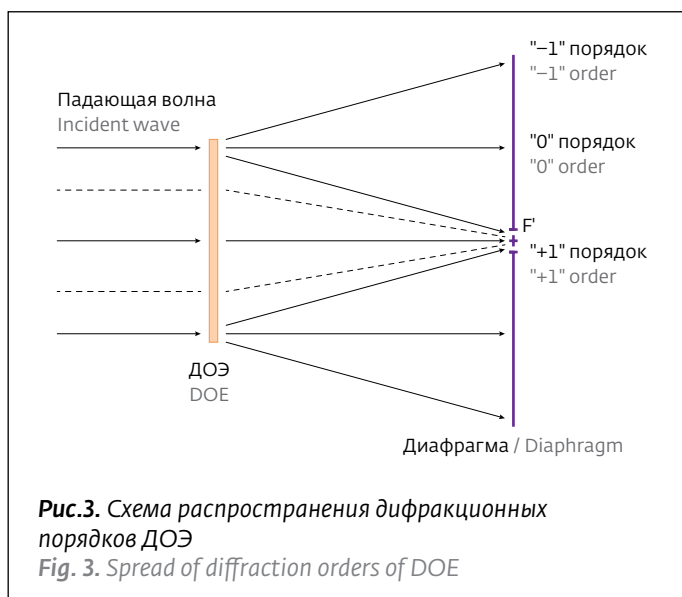
Было исследовано два типа ДОЭ высокоапертурной дифракционной линзы: 1) трехмерный фазовый голограммный оптический элемент составной голограммной линзы и 2) двумерный бинарный амплитудный ДОЭ дифракционной линзы.

СОСТАВНАЯ ГОЛОГРАММНАЯ ЛИНЗА

Трехмерный фазовый ДОЭ высокоапертурной дифракционной линзы может быть получен только голографическим методом, поэтому является голограммным оптическим элементом (ГОЭ).

Для получения пропускающей голограммной линзы необходимо сформировать и направить на фотопластинку плоскую и расходящуюся сферическую волны. Страты трехмерной голографической решетки, формирующей ГОЭ, ориентированы вдоль оптической оси, поскольку являются результатом интерференции конаправленных волн, и имеют угол с оптической осью в диапазоне от 0° до $\omega/2=30^\circ$.

Сформировать равномерную расходящуюся волну с апертурным углом $\sigma=60^\circ$ с помощью лин-



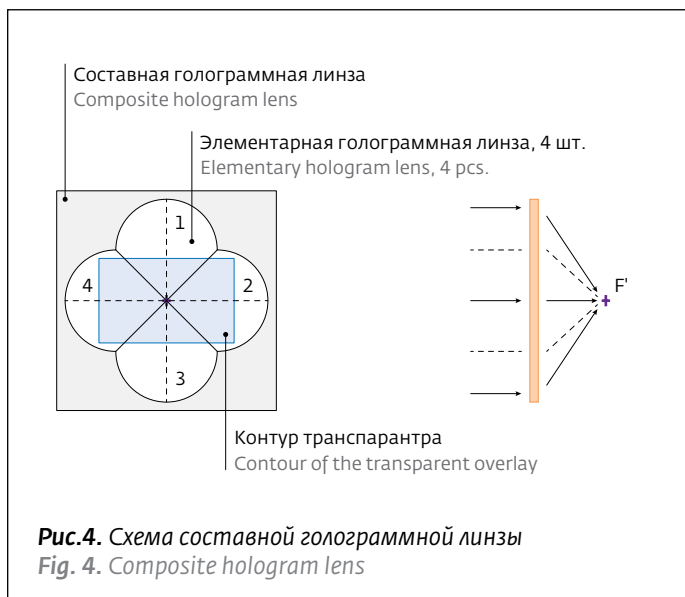
with weakly-scattering diffusing screen located behind the transparent overlay, for instance.

However, due to fundamental limitations of the lens optics, it is impossible to obtain the lens with the rear aperture angle of more than $\omega=45^\circ$ (and, therefore, it is impossible to obtain HS with a viewing angle of more than $2\sigma=90^\circ$). The most common HS by Geola have a maximum viewing angle of 85° [4].

To achieve a higher viewing angle, we suggest replacing the lens in the holographic printer with a diffractive optical element (DOE), as shown in Fig.2.

The DOE task in this optical system is to concentrate the beams incident and diffracted on the DOE in the area of holopixel obtaining. It is impossible to create a Fresnel lens with such a large aperture ratio; therefore it is proposed to use a three-dimensional or two-dimensional hologram. Using to DOE, which radiation diffraction angle at the edge is $\sigma \approx 60^\circ$, it is possible to create HS with a viewing angle of $2\sigma \approx 120^\circ$. Relative aperture of such DOE is 1:0.3.

However, the DOE have a number of shortcomings illustrated in Fig. 3. Firstly, the DOE recovers, in addition to converging waves of "+1" diffraction order, diverging wave of "-1" diffraction order and transmits "0" transmitting order. The presence of parasitic diffraction orders makes it almost impossible to use the DOE as the imaging lens, however, in the holographic printer the DOE will be used in conjunction with a diaphragm in the area of focus of the DOE, which determines the size of the holopixel obtained. This diaphragm rejects



зовой оптики невозможно, поэтому трехмерный ГОЭ был получен как составная голограммная линза (СГЛ), схема которой показана на рис.4.

ГОЭ состоит из четырех элементарных голограммных линз, каждая из которых имеет относительное отверстие 1:1 (и задний апертурный угол $\sigma_1=30^\circ$, соответственно). При этом элементарные голограммные линзы имеют общий фокус. За счет этого задний апертурный угол СГЛ составляет $\sigma=60^\circ$ (и относительное отверстие соответственно 1:0,3), что делает возможным получение ГС с углом обзора до $2\omega=120^\circ$.

Для получения такой СГЛ предложена оптическая схема, показанная на рис.5. В объектной ветви после системы расширения лазерного луча находится большое отклоняющее зеркало, рефракционный объектив для формирования сферической волны и малое отклоняющее зеркало в области фокуса объектива, которое формирует расходящуюся сферическую волну, падающую на зону размером в четверть поверхности фотопластинки. Сонаправленно объектной волне на эту же зону фотопластинки падает плоская опорная волна. Таким образом, это оптическая схема получения голограмм габоровского типа. В процессе получения СГЛ необходимо сделать четыре экспозиции для получения элементарных внеосевых голограммных линз на зоне фотопластинки, поворачивая фотопластинку между экспозициями на 90° .

Экспериментальные образцы СГЛ были получены на голографическом стенде, собранном согласно разработанной оптической схеме и показанном на рис.6. Фотографии полученных образ-

transmitting and diverging diffraction orders, thus offsetting their presence.

Secondly, the DOE may have high aberrations and large scattering aberration spot. This fact makes the DOE even less suitable for use as the imaging lens. However, the use of DOE in the holographic printer, together with a diffuser designed to form uniform field instead of scattering spot in the holopixel obtaining area, makes it possible to neutralize this shortcoming of the DOE.

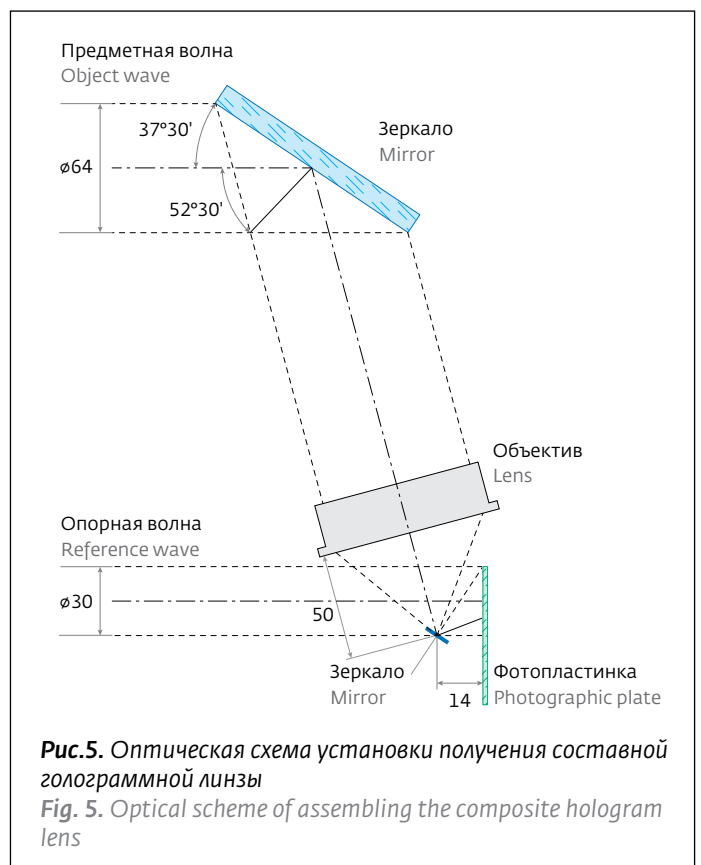
Thus, despite the fact that such high-frequency DOE cannot be used as the imaging lens, it is well suited for use in a holographic printer.

Two types of DOE of the high-aperture diffractive lenses have been studied: 1) a three-dimensional phase hologram optical element of the composite hologram lens and 2) a two-dimensional binary amplitude DOE of the diffractive lens.

COMPOSITE HOLOGRAM LENS

Three-dimensional phase DOE of the high-aperture diffractive lens can be obtained only by holographic method, therefore it is a hologram optical element (HOE).

To obtain a transmission hologram lens, it is necessary to generate and send a plane and



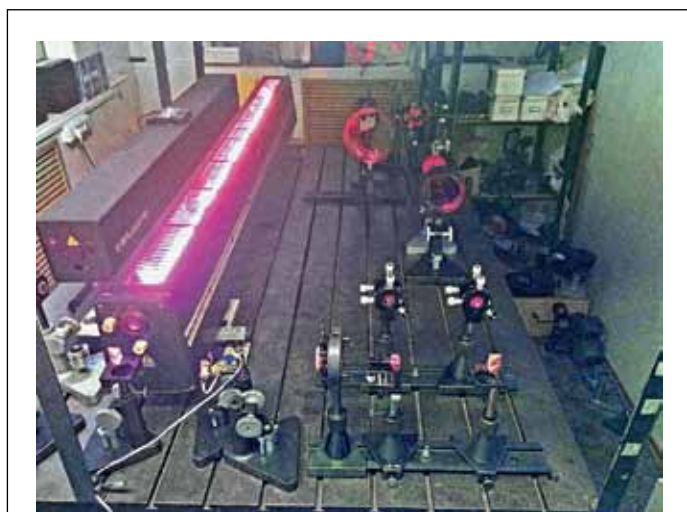


Рис.6. Голографический стенд для получения СГЛ
Fig. 6. Holographic stand for CHL

цов представлены на рис.7. Видно, что все четыре зоны на образцах совместно формируют блик от лампы, освещающей образцы во время съемки фотографии.

Параметры образцов СГЛ приведены в таб. 1. Световой диаметр измерялся по диагонали. Результаты измерения дифракционной эффективности образцов СГЛ по сагитальному и меридиональному сечениям представлены на графике на рис.8. Несмотря на падение дифракционной эффективности в центре и на краю апертуры СГЛ,

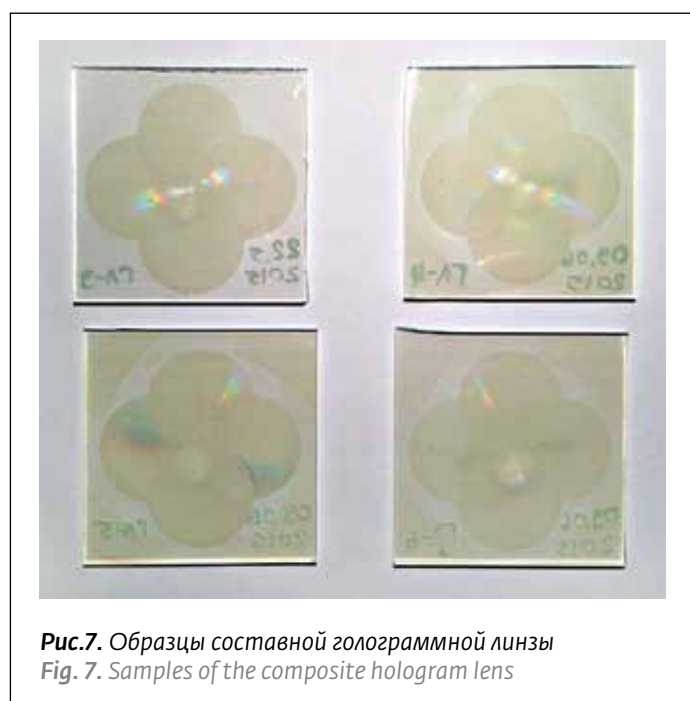


Рис.7. Образцы составной голограммной линзы
Fig. 7. Samples of the composite hologram lens

a diverging spherical wave to a photographic plate. Strata of dimensional holographic grating forming the HOE are oriented along the optical axis, since they are the result of interference of the co-directional waves and have an angle with the optical axis in the range from 0° to $\omega/2 = 30^\circ$.

It is impossible to form a uniform diverging wave with aperture angle $\sigma = 60^\circ$ using lens optics, therefore the three-dimensional HOE was obtained as a composite hologram lens (CHL), shown schematically in Fig. 4.

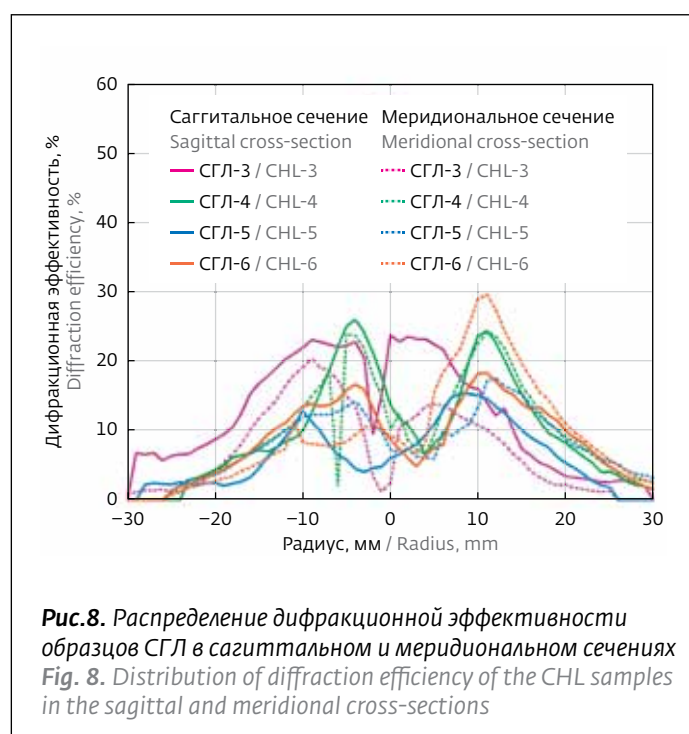
HOE consists of four elementary hologram lenses, each of which has a relative aperture 1:1 (and rear aperture angle $\sigma_1 = 30^\circ$, respectively). These elementary hologram lenses have a common focus. Due to this fact, rear aperture angle of CHL is $\sigma = 60^\circ$ (and relative aperture is 1:0.3, respectively), which makes it possible to obtain HS with a viewing angle of up to $2\omega = 120^\circ$.

We suggest an optical scheme to obtain such CHL as shown in Fig. 5. There is a large deflection mirror, a refractive lens for forming a spherical wave and a small deflection mirror in the focus of the lens, which forms an diverging spherical wave incident on the area with dimensions of a quarter of the surface of the photographic plate, in the object branch after the system of the laser beam expansion. Plane reference wave falls on the same photographic plate area co-directionally with the object wave. Thus, we have an optical scheme of Gabor hologram. In the process of obtaining CHL, four exposures to obtain elementary off-axis hologram lens on a photographic plate area are

Таблица 1. Параметры составного голограммного объектива

Table. 1. Parameters of the composite hologram lens

Параметр Parameter	Значение Value
Световой диаметр, мм Clear aperture, mm	45
Максимальный диаметр, мм Maximum aperture, mm	60
Рабочая длина волны, мкм Operating wavelength, μm	0,6328
Фокусное расстояние, мм Focal length, mm	15
Относительное отверстие, от Relative aperture, from	1:0,3
Дифракционная эффективность, %, до Diffraction efficiency, %, up to	31%



возможно добиться среднего значения дифракционной эффективности на уровне 10-20%.

ДИФРАКЦИОННАЯ ЛИНЗА

Поскольку рельефно-фазовая пропускающая голограмма не может обладать значительной дифракционной эффективностью, в качестве двумерного ДОЭ использовался бинарный амплитудный ДОЭ, полученный на электронно-лучевом литографе, представляющий собой зонную пластинку Френеля.

Параметры дифракционной линзы можно рассчитать с помощью основного уравнения зоны Френеля

$$\frac{f'}{\cos \alpha_n} - f' = \lambda n,$$

где λ – длина волны излучения,
 f' – фокусное расстояние,
 n – порядковый номер зоны Френеля,
 α_n – угол дифракции излучения на n -й зоне Френеля.

Рассчитанные параметры дифракционной линзы с диаметром 46 мм и фокусным расстоянием 13,3 мм, представлен в табл. 2. На основании ширины T_n n -ой зоны была оценена пространственная частота дифракционной решетки в области n -й зоны как $\nu_n = 1/T_n$.

Расчет параметров для вышеописанных параметров голограммного объектива позволяет полу-

required by turning the photographic plate by 90° between exposures.

CHL experimental samples have been obtained on the holographic stand, assembled according to the developed optical system shown in Fig. 6. A photograph of the samples obtained is shown in Fig. 7. It can be seen that all four zones on the samples together form a glare from the lamp illuminating the samples during this photo shooting.

CHL sample parameters are shown in Table 1. Clear aperture has been measured diagonally. The results of measuring of diffraction efficiency of the CHL samples along the sagittal and meridional cross-sections are plotted in Fig. 8. In spite of the drop in diffraction efficiency at the center and at the edge of the CHL aperture, it is possible to obtain the average value of the diffraction efficiency at the level of 10-20%.

ДИФРАКТИВНАЯ ЛИНЗА

Since the relief-phase transmission hologram cannot possess large diffraction efficiency, binary amplitude DOE obtained on electron-beam lithographic printer representing a Fresnel-zone plate has been used as a two-dimensional DOE.

Таблица 2. Параметры дифракционной линзы.

Table. 2. Parameters of the diffractive lens

Параметр Parameter	Значение Value
Световой диаметр, мм Clear aperture, mm	46
Фокусное расстояние, мм Focal length, mm	13,3
Относительное отверстие Relative aperture	1:0,3
Количество зон N Number of zones N	21 022
Радиус первой зоны R ₁ , мкм Radius of the first zone R ₁ , μm	129,7
Ширина второй зоны T ₂ , мкм Width of the second zone T ₂ , μm	53,7
Ширина последней зоны T _N , мкм Width of the last zone T _N , μm	0,731
Частота второй зоны ν ₂ , л/мм Frequency of the second zone ν ₂ , l/mm	18,6
Частота последней зоны ν _N , л/мм Frequency of the last zone ν _N , l/mm	1 369

чить величины, перечисленные в табл. 2. Как видно из таблицы, пространственная частота голографической решетки не превышает 1400 л/мм.

Образец дифракционной линзы, показанный на рис.9, был изготовлен при содействии ФГУП "НТЦ "Атлас". ДОО был изготовлен точно под размер транспаранта с диагональю 46 мм. Основной сложностью в получении дифракционной линзы стал подбор режима работы электронно-лучевого литографа для получения ДОО с периодом дифракционной структуры, непрерывно изменяющейся от 0,7 до 50 мкм, а также борьба с эффектом близости (эффектом влияния экспозиции текущей зоны на соседние зоны).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В рамках экспериментальных исследований голографического принтера на основе ДОО были получены образцы ГС с помощью составной голограммной линзы (ГС №1) и дифракционной линзы (ГС №2), соответственно (рис.10, 11). При получении ГС на транспаранте было выведено ровное светлое поле. Размеры ГС не превышают 50×50 мм. Форма голопикселей круглая, диаметр голопикселей составляет 2 мм и 1 мм, соответственно.

Внутри голопикселей образца № 1 видно абберационное пятно, форма которого зависит от угла наблюдения. Также при наблюдении строго ортогонально голопиксел восстанавливает яркое круглое пятно. Оно объясняется прямым пропусканием составной голограммы, прошедшим через диафрагму при получении голопикселя. Поскольку коэффициент пропускания ГОЭ в несколько раз выше дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции, при ортогональном наблюдении происходит сильный скачок яркости голопикселя. Абберационное пятно объясняется селективностью объемной голограммы, слишком высокой, чтобы совместно с диффузором сформировать равномерно освещенное поле при получении голопикселя.

Внутри голопикселей образца №2 восстанавливается более равномерное поле, поскольку амплитудная дифракционная линза не обладает спектрально-угловой селективностью и совместно с диффузором создает равномерно освещенное поле внутри апертуры голопикселя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенных исследований стала оптическая схема голографического принтера на основе ДОО, которая позволяет получать ГС



Рис.9. Образец дифракционной линзы
Fig. 9. Sample of diffractive lens

Diffractive lens parameters can be calculated using the basic Fresnel-zone equation

$$\frac{f'}{\cos \alpha_n} - f' = \lambda n,$$

where λ is the radiation wavelength,
 f' is the focal length,
 n is the serial number of the Fresnel zone,
 α_n is the diffraction angle of the n -th Fresnel zone.

The calculated parameters of the diffractive lens with a diameter of 46 mm and the focal length of 13.3 mm are shown in Table 2. The spatial frequency of the grating in the n -th zone has been measured on the basis of the width T_n of the n -th zone as $\nu_n = 1/T_n$.

Calculation of the parameters for hologram lens described above allows obtaining the following values listed in Table. 2. As seen from the table, the spatial frequency of the holographic grating is not more than 1400 l/mm.

A sample of diffractive lens, shown in Fig. 9, has been produced with the assistance of FSUE "RDC "Atlas". The DOE has been produced exactly to the sizes of the transparent overlay 46 mm diagonally. The main difficulty in obtaining the diffractive lens has become the selection of the operating mode of electron-beam lithographic printer to obtain the DOE with a period of the diffraction structure continuously varying from 0.7 to 50 microns, as well as combating the proximity effect (the effect of the

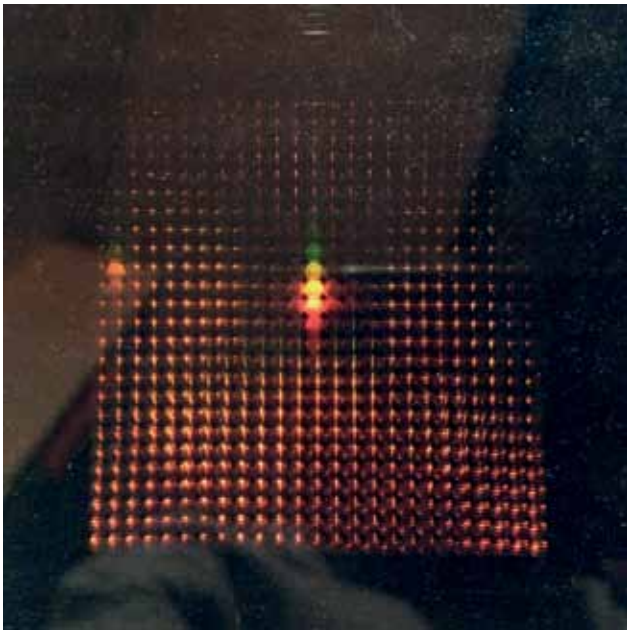


Рис.10. Образец ГС №1, полученной с помощью СГЛ
Fig. 10. Sample of HS No 1 obtained by CHL

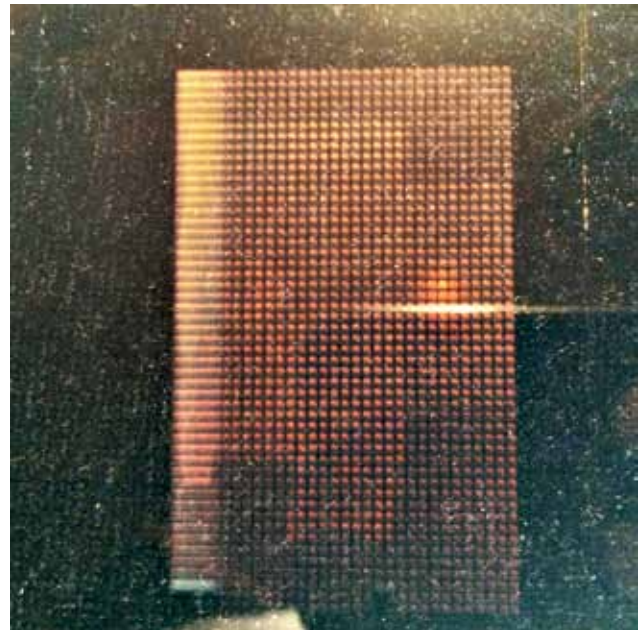


Рис.11. Образец ГС №2, полученной с помощью дифракционной линзы
Fig. 11. Sample of HS No 2 obtained by diffractive lens

с углом обзора, увеличенным до 120° . Предложено два типа ДОЭ, позволяющих добиться этой цели: трехмерный фазовый ГОЭ СГЛ и двумерный бинарный амплитудный ДОЭ дифракционной линзы. Были получены образцы ДОЭ обоих типов с относительным отверстием 1:0,3. Получены и образцы ГС при помощи СГЛ и при помощи дифракционной линзы. Показано, что ввиду отсутствия спектрально-угловой селективности, дифракционная линза совместно со слабо рассеивающим диффузором позволяет получать ГС с более равномерно светящимися голопикселями.

Данная работа была выполнена в МГТУ им.Н.Э.Баумана при финансовой поддержке Министерства образования и науки Рос-

сия (влияние воздействия на соседние области).

EXPERIMENTAL STUDY

Within the experimental studies of the holographic printer based on DOE, the HS samples have been obtained using a composite hologram lens (HS No 1) and a diffractive lens (HS No 2), respectively (Fig. 10, 11). When obtaining HS, smooth bright plane has been displayed on the transparent overlay. The HS dimensions do not exceed 50×50 mm. The holopixels are round in shape; holopixels' diameter is 2 mm and 1 mm, respectively.

There is an aberration seen inside holopixels of sample No 1, the shape of which depends on



сии в рамках контракта № 14.577.21.0197 (грант RFMEFI57715X0197).

ЛИТЕРАТУРА

1. **De Bitetto D.J.** Holographic panoramic stereograms. – Applied optics, 1969, v. 8, № 8, p. 1740.
2. **King M.C., Noll A.M., Berry D.H.** A new approach to computer-generated holography. – Applied optics, 1970, v. 9, p. 471.
3. **Benton S.A.** Survey of holographic stereograms. – SPIE Conference Proceeding, 1982, v. 367, p. 15.
4. Пат. US6930811 США, 2005. Holographic printer / David Brotherton-Ratcliffe.
5. **Halle M.W., Benton S.A., Klug M.A.** The ultragram. A generalized holographic stereogram. – SPIE Conference Proceeding, 1991, v. 1461.
6. **Spierings W., Spierings W., Van Nuland E.** Calculating the right perspectives for multiple photo generated holograms. – SPIE Conference Proceeding, 1991, v. 1600, p. 96.
7. Пат. US4834476 США, 1989. Real image holographic stereograms / Stephan Benton.
8. **Honda T., Yamaguchi M., Kang D.** Printing of holographic stereogram using liquid-crystal TV. – Applied optics, 1989, v. 1051, p. 186.
9. **Klug M.A., Halle M.W., Lucente M., Plesniak W.J.** A compact prototype one-step Ultragram printer. – SPIE Conference Proceeding, 1993, v. 1914, p. 15.
10. Пат. US6559983 США, 2003. Holographic stereogram printing system, holographic stereogram printing method and holographic device / Takahiro Toyoda.
11. Пат. US7057779 США, 2005. Holographic stereogram device / Wai-Hon Lee.

the viewing angle. Also, when viewed strictly orthogonally, a holopixel recovers bright circular spot. The bright circular spot is due to the direct passage of the composite hologram passed through the aperture in the holopixel obtaining. Since the HOE transmittance ration is by several times higher than the diffraction efficiency in the operating diffraction order, there is a strong shock in holopixel's brightness when observed orthogonally. Aberration spot is explained by the selectivity of the volume hologram, too high to form evenly illuminated field together with the diffuser when obtaining a holopixel.

A more even field can be seen inside holopixels of sample No 2, since the amplitude diffractive lens does not possess the spectral-angular selectivity and creates a uniformly illuminated field inside holopixel aperture together with the diffuser.

CONCLUSION

The result of the research was the holographic printer optical scheme based on DOE, which produces HS with a viewing angle increased to 120°. We have proposed two types of DOE, which made it possible to achieve this goal: a three-dimensional phase HOE of the CHL and a two-dimensional binary amplitude DOE of the diffractive lens. The samples have been obtained from both types of the DOE with the relative aperture of 1:0.3. HS samples have been obtained using both a CHL and a diffractive lens. It is proved that in the absence of spectral-angular selectivity, the diffractive lens in conjunction with a weakly-scattering diffuser produces HS with more evenly illuminated holopixels.

This research has been performed in the Bauman MSTU with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science under the contract No 14.577.21.0197 (grant RFMEFI57715X0197).

ОДНОАТОМНАЯ МАГНИТНАЯ ПАМЯТЬ

Постоянные магниты потому и называются постоянными, что обладают намагниченностью даже в отсутствие внешнего магнитного поля. А способны ли на такой подвиг отдельные магнитные атомы? На практике это крайне сложно реализовать из-за неизбежного взаимодействия локального магнитного момента с флуктуациями окружающей

среды. Тем не менее, группа авторов из Швейцарии, Сербии, Катара и Франции [Donati F. et al. – Science, 2016, v.352, p. 118] экспериментально продемонстрировала остаточную намагниченность отдельных атомов гольмия, осажденных на ультратонкие диэлектрические слои Mg (100), которые защищали атомные магнитные моменты от электронов

и фоонов подложки Ag (100). Эффект наблюдается при температурах вплоть до 30К. При T=10К время релаксации "одноатомной намагниченности" составляет несколько минут. Результаты могут пригодиться для дальнейшей миниатюризации устройств магнитной памяти.

Перст, 2016, т. 23, вып. 8