

УДК 535.421; 535.422; 535.312; 535.394

ПРИМЕНЕНИЕ ОСЕВЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А. А. Калинина¹, А. Н. Путилин², С. С. Копенкин³

Использование голографических оптических элементов (ГОЭ) позволяет формировать виртуальное изображение в широком поле зрения в оптических системах очков дополненной реальности (ДР). Однако выходной зрачок таких систем ограничен из-за высоких аберраций, вызванных параметрами схемы записи ГОЭ. В работе приводится анализ аберраций в системах на основе ГОЭ, в зависимости от взаимного расположения опорной и объектных волн при записи ГОЭ. На основе проведенного анализа, авторами предлагается оптическая система очков ДР на основе осевого ГОЭ, вызывающего наименьшие аберрации в системе очков ДР. Предложенная система обладает полем зрения 60 градусов, выходным зрачком 10 мм и спектральной селективностью 12 нм. Приведенные результаты подтверждаются измерениями на созданной экспериментальной установке.

Ключевые слова: голограмма, очки дополненной реальности, наплемный дисплей.

Введение. Голографические оптические элементы (ГОЭ) в системах очков дополненной реальности (ДР) осуществляют перенос изображения, сформированного источником изображения, на бесконечное расстояние от пользователя, формируя таким образом виртуальное (мнимое) изображение. ГОЭ – это голограмма, интерференционная картина которой представляют собой объемную дифракционную решетку, сформированную в регистрирующей среде достаточной толщины [1]. Формирование объемной интерференционной картины происходит в результате взаимодействия двух когерентных волн в

¹ Московский физико-технический институт (МФТИ), 141701 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kalinina.optics@gmail.com.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

³ Российский технологический университет (МИРЭА), 119571 Россия, Москва, пр-т Вернадского, 86.

толще регистрирующей среды. Запись ГОЭ происходит с помощью “опорной” и “объектной” волны, а освещение – с помощью “восстанавливающей” волны. Если конфигурация восстанавливающей волны совпадает с опорной волной записи, то дифрагированная на структуре ГОЭ волна в точности совпадает с объектной волной записи ГОЭ. Такие голограммы еще называются Брэгговскими решетками, поскольку отклик излучения, возникающий на периодической структуре ГОЭ, описывается законом Брэгга. В отличие от голограмм, записанных на поверхности регистрирующей среды, ГОЭ обладают селективностью по длине волны и по углу падения излучения. В зависимости от расположения и конфигурации волн, используемых в схеме записи, ГОЭ бывают отражательными и просветными, осевыми и внеосевыми. В схемах записи, сферические волны характеризуется конструктивными точками – положениями перетяжки. Функция любого оптического элемента (линзы, зеркала, диффузора, линзового растра, поляризатора, фильтра и др.) может быть записана в виде плоского элемента ГОЭ, что открывает большие возможности для их применения в различных устройствах.

ГОЭ являются перспективными элементами для интеграции в системы ДР. В качестве регистрирующего материала для ГОЭ в системах ДР часто используют фотополимеры. Записанные в фотополимер ГОЭ обладают высоким спектральным коэффициентом пропускания ($> 80\%$ в видимом спектральном диапазоне), имеют малую толщину (4–54 мкм), имеют высокую угловую и спектральную селективность, а дифракционная эффективность ГОЭ может достигать 100% [2, 3]. Это значит, что ГОЭ не препятствуют прохождению излучения, исходящего из окружающего мира, а также обеспечивают высокую энергетическую эффективность устройства. Но главное преимущество использования ГОЭ в системах ДР, по сравнению с другими подходами, заключается в способности формировать виртуальное изображение в ультрашироком поле зрения – более 90° [4]. В то время, как, к примеру, схемы с использованием планарных волноводов, позволяют формировать виртуальное изображение с угловым размером менее 45° [5]. Величина поля зрения наблюдаемого изображения является одним из наиболее чувствительных факторов при зрительном восприятии. Поэтому, исследования в области дополненной реальности направлены на то, чтобы сформировать виртуальное изображение в поле зрения, соответствующем зрительной системе человека. К примеру, поле зрения человеческого глаза составляет 60° назальное и 105° внешнее, угловое разрешение составляет 1 угловую минуту, зрачок глаза варьируется в пределах от 2 до 8 мм в зависимости от освещенности, [6]. Таким образом, для оптической системы очков ДР важно обеспечить формирование не только широкого поля зрения, но и большого

выходного зрачка. И, если поле зрения в схемах на основе ГОЭ имеет достаточную величину, то выходной зрачок крайне мал – его размеры не превышают 1 мм. Мы предлагаем оптическую систему очков ДР с использованием осевого ГОЭ, что позволяет достичь одновременно большого выходного зрачка 10 мм и широкого поля зрения 60° системы.

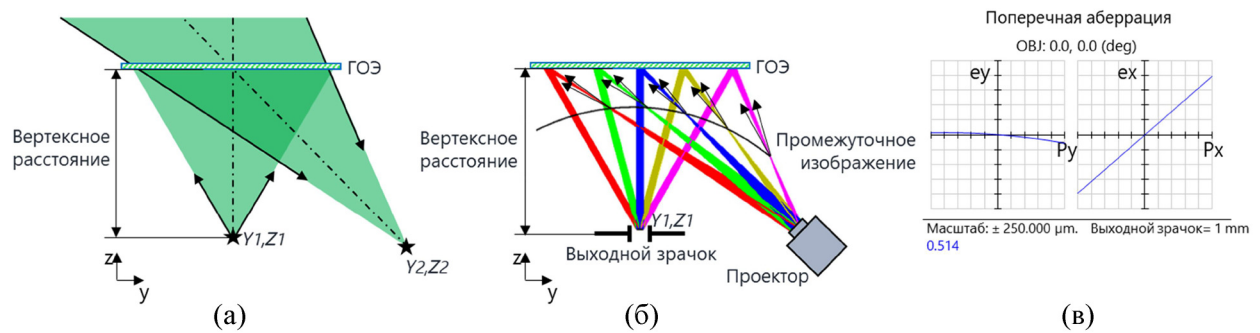


Рис. 1: Принцип работы ГОЭ в очках ДР: (а) схема записи отражательного ГОЭ с функцией внеосевой линзы; (б) ГОЭ формирует виртуальное изображение путем переноса изображения, сформированного проектором, из плоскости промежуточного изображения на бесконечность; (в) поперечная абберация центрального пучка, возникающая в системе с величиной выходного зрачка 1 мм.

Формирование виртуального изображения в системах на основе ГОЭ. Для формирования виртуального изображения в очках ДР обычно используется внеосевой отражательный фазовый ГОЭ, выполняющий функцию внеосевой линзы. Схема записи такого элемента характеризуется конструктивными точками опорной и объектных волн Y_1, Z_1 и Y_2, Z_2 соответственно (рис. 1(а)). Положение конструктивной точки опорной сферической волны Y_1, Z_1 соответствует положению зрачка глаза, конструктивная точка наклонной сферической волны Y_2, Z_2 расположена вне оси, поэтому такой элемент называется внеосевым. Конструктивные точки записи ГОЭ определяют форму и положение промежуточного изображения ГОЭ – плоскости, в которой фокусируются дифрагированные пучки, при освещении голограммы параллельными пучками из точки Y_1, Z_1 (рис. 1(б)). Для формирования виртуального изображения на бесконечности, проектор формирует действительное изображение, положение и форма которого соответствуют положению и форме промежуточного изображения ГОЭ (рис. 1(б)). Тогда, расходящиеся изображающие пучки дифрагируют на структуре ГОЭ и преобразуются в параллельные пучки, которые, накладываются между собой в точке Y_1, Z_1 и формируют выходной зрачок системы. Стоит отметить, что термин “выходной зрачок” в

схемах такого типа устройств, как очки ДР, связан с ограничением световых пучков в системе “ГОЭ-глаз”, при этом линейная апертура ГОЭ много больше диаметра зрачка глаза. Поэтому, зрачок глаза является одновременно выходным зрачком и апертурной диафрагмой оптической системы очков ДР.

Интерференционная картина, возникающая в результате взаимодействия объектной и опорной волн, образующих угол θ в толще фоточувствительного материала с показателем преломления n , имеет период Λ , величина которого определяется законом Брэгга:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \theta}. \quad (1)$$

Безабберрационное воспроизведение волнового фронта объектной волны возможно лишь в случае, когда восстанавливающая волна полностью совпадает с опорной волной записи. Другими словами, выполняется условие:

$$\lambda_c = \lambda_0; \quad \theta_c = \theta_0, \quad (2)$$

где λ_0 и θ_0 – длина волны и углы записи ГОЭ, λ_c и θ_c – длина волны и углы при освещении ГОЭ. Поскольку в схеме очков ДР (рис. 1(б)) волна, используемая для воспроизведения, отличается от опорной волны записи ГОЭ, в изображающей системе возникают aberrации. Внеосевая схема записи ГОЭ порождает большие aberrации в системе из-за неоднородности формируемой интерференционной картины. Aberrации не позволяют увеличить угловую апертуру изображающих пучков, вследствие чего не удастся достичь и большого выходного зрачка системы.

Для численного анализа зависимости дифракционной эффективности от длины волны источника излучения при освещении ГОЭ, удобно использовать теорию связанных волн [7]. Отражательные ГОЭ обладают дифракционной эффективностью, описываемую выражением:

$$ДЭ = \left[1 + \frac{1 - \xi^2/v^2}{\sinh^2 \sqrt{v^2 - \xi^2}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где параметры v и ξ для осевого ГОЭ определяются параметрами схемы записи и восстановления ГОЭ:

$$v = \frac{i\pi d \Delta n}{\lambda \sqrt{\cos \theta_R \cos \theta_S}}, \quad \xi = \frac{2\pi n d \Delta \lambda}{\lambda^2 \cos \theta_S}, \quad (4)$$

где Δn – модуляция показателя преломления, d – толщина фоточувствительного слоя, θ_R и θ_S – угол падения опорного/объектного лучей в локальной точке ГОЭ соответственно, $\Delta \lambda$ – отклонение длины волны источника воспроизведения ГОЭ от длины волны записи ГОЭ.

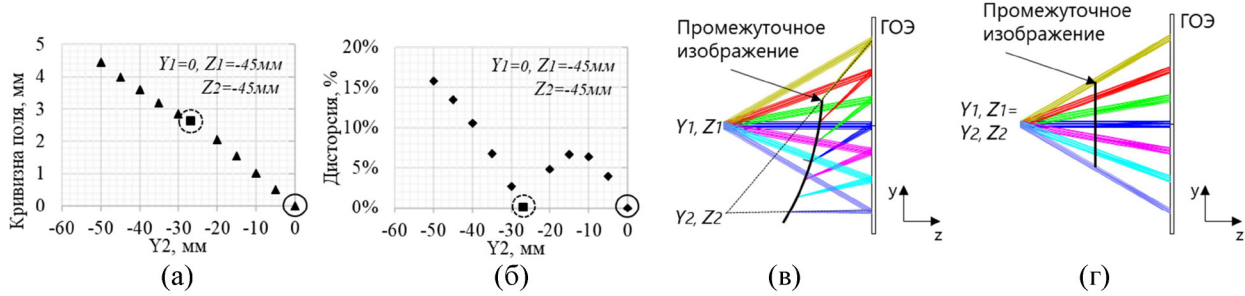


Рис. 2: Аберрации ГОЭ: (а) зависимость кривизны поля от положения объектной волны Y_2 ; (б) зависимость дисторсии от положения объектной волны Y_2 ; (в) частный случай – промежуточное изображение ГОЭ описывается уравнением сферы; (г) частный случай – осевой ГОЭ имеет промежуточное изображение с нулевой кривизной.

Аберрации в системах на основе ГОЭ. Несмотря на существенные преимущества внеосевых ГОЭ с точки зрения эргономики устройства, такие элементы порождают большие аберрации в системе очков ДР и ограничивают размеры формируемого выходного зрачка. Увеличение выходного зрачка в схемах на основе ГОЭ может быть достигнуто путем выбора конфигурации записи ГОЭ, при которой ГОЭ будет создавать наименьшие аберрации в системе. Для выявления условий наименьших аберраций был выполнен анализ с помощью программного обеспечения Zemax. ГОЭ задавался с использованием типа поверхности “Hologram 2”. В этой модели ГОЭ освещается параллельными пучками из плоскости выходного зрачка (Y_1, Z_1) в диапазоне углов $-30^\circ \div 30^\circ$. Аберрации, возникающие в системе, оценивались в плоскости промежуточного изображения, форма которого описывалась уравнением сферы с радиусом кривизны, соответствующим минимальным размерам пятен рассеяния. При смещении объектной волны к оси, т. е. при уменьшении величины Y_2 в схеме записи ГОЭ (рис. 2(а), (б)), кривизна поля и дисторсия в системе уменьшаются. При этом существует две конфигурации ГОЭ, которые являются частными случаями. В первом случае дисторсия достигает минимальных значений, при этом кривизна поля отлична от нуля. При таких параметрах, промежуточное изображение точно описывается уравнением сферы (рис. 2(в)). Другой частный случай соответствует нулевым значениям кривизны поля и дисторсии одновременно. В этом случае ГОЭ становится осевым элементом, при этом кривизна промежуточного изображения равна нулю (рис. 2(г)).

Осевой ГОЭ обеспечивает ряд преимуществ системе. Во-первых, из-за однородности интерференционной картины и снижения величины аберраций в изображающей

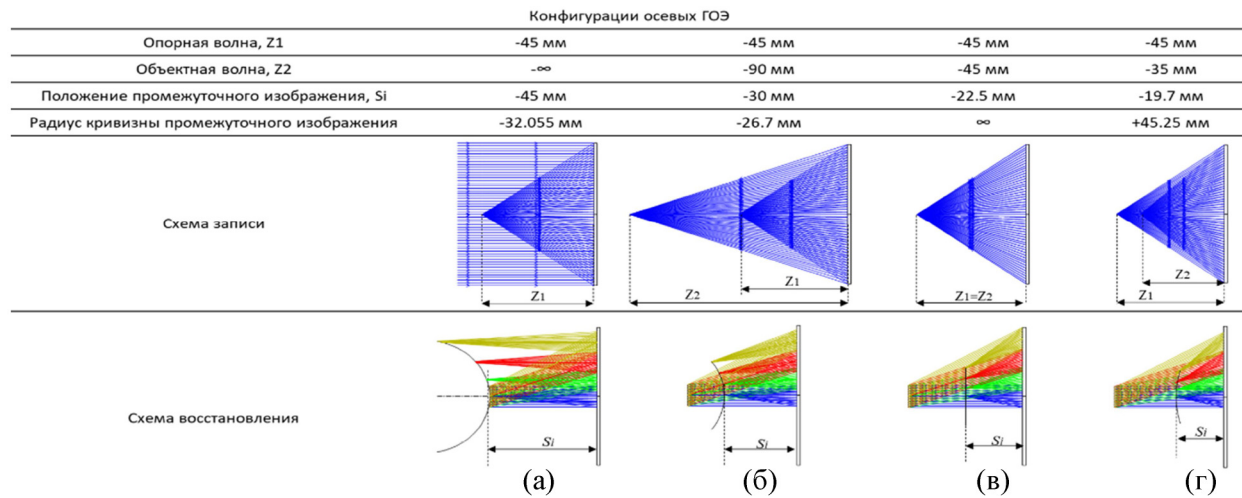


Рис. 3: Формы и положения промежуточного изображения осевого ГОЭ в зависимости от расположения опорной и объектных волн записи ГОЭ (а)–(г).

системе, угловая апертура изображающих пучков в схеме восстановления может быть увеличена, чтобы обеспечить приемлемый размер выходного зрачка. Во-вторых, плоскость промежуточного изображения обладает симметричной формой, что упрощает оптическую систему проектора. Но главной особенностью осевой голограммы является то, что промежуточное изображения может представлять собой плоскость с нулевой кривизной. На рис. 3 показаны конфигурации схем записи осевых ГОЭ, отличающиеся положением объектной волны (Z_2), и соответствующие им схемы восстановления, отличающиеся положением S_i и радиусом кривизны R промежуточного изображения. Моделирование осуществлялось в программе Zemax, ГОЭ задавались с помощью типа поверхности “Hologram 2”.

Т а б л и ц а 1

Параметры модели осевого ГОЭ

Подложка	толщина	2 mm
	материал	ВК7
ГОЭ	порядок	“1”
	толщина	16 μ m
	n	1.505
	Δn	0.03

Оптическая система очков ДР на основе осевого ГОЭ. Случай с плоским промежуточным изображением наиболее интересен (рис. 3(в)), поскольку именно случай записи ГОЭ концентрическими волнами позволяет достичь наименьших значений аберраций в системе, а также позволяет разместить плоский источник изображения на расстоянии S_i от ГОЭ для формирования виртуального изображения. Оптическая система очков ДР на основе осевого ГОЭ показана на рис. 4. Мы использовали модель ГОЭ, наиболее приближенную к реальной голограмме. Для этого, ГОЭ задавался с помощью типа поверхности “Optically fabricated hologram” в программе Zemax. Параметры системы представлены в табл. 1. Опорная волна представляет собой расходящуюся сферическую волну, исходящую из точки Z_1 . Объектная волна представляет собой сферическую сходящуюся волну, фокусирующуюся в точке $Z_2 = Z_1$ (рис. 4(а)). Достичь концентрического расположения волн в схеме записи можно с помощью сферического зеркала. При освещении из плоскости промежуточного изображения пучками с угловой апертурой ϕ (рис. 4(б)), ГОЭ преобразует сферические пучки в плоские, формируя выходной зрачок диаметром w_{EB} , величина которого определяется формулой:

$$w_{EB} = 2 \cdot S_i \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\phi}{2} \right), \quad (5)$$

где S_i – расстояние от ГОЭ до промежуточного изображения, ϕ – угловая апертура изображающих пучков. Например, для формирования выходного зрачка шириной $w_{EB} = 10$ мм, изображающие пучки, исходящие из плоскости $S_i = 22.5$ мм, должны иметь угловую апертуру $\phi = 25.5^\circ$. При этом в системе с величиной выходного зрачка 10 мм возникают симметричные поперечные аберрации (рис. 4(в)), по величине меньшие, чем в случае внеосевого ГОЭ (рис. 1(в)). Также, благодаря концентрической схеме записи, в которой угол Брэгга для сформированных в материале дифракционных решеток составляет $\theta = 90^\circ$, осевой ГОЭ обладает минимально возможным периодом дифракционной решетки $\Lambda = \lambda/2n$. Поэтому, согласно уравнению (3) и построенному графику дифракционной эффективности (рис. 4(г)), осевой ГОЭ обладает спектральной селективностью менее $\Delta\lambda_{FWHM} = 12$ нм, при этом дифракционная эффективность достигает 100%.

Источник изображения в предложенной схеме очков ДР располагается в плоскости промежуточного изображения ГОЭ (рис. 4(г)). В отличие от схемы с внеосевым ГОЭ, источник изображения находится в поле зрения глаза. Очевидно, что такой источник изображения должен обладать спектральной селективностью: пропускать излучение видимого диапазона от окружающего мира и, одновременно с этим, формировать про-

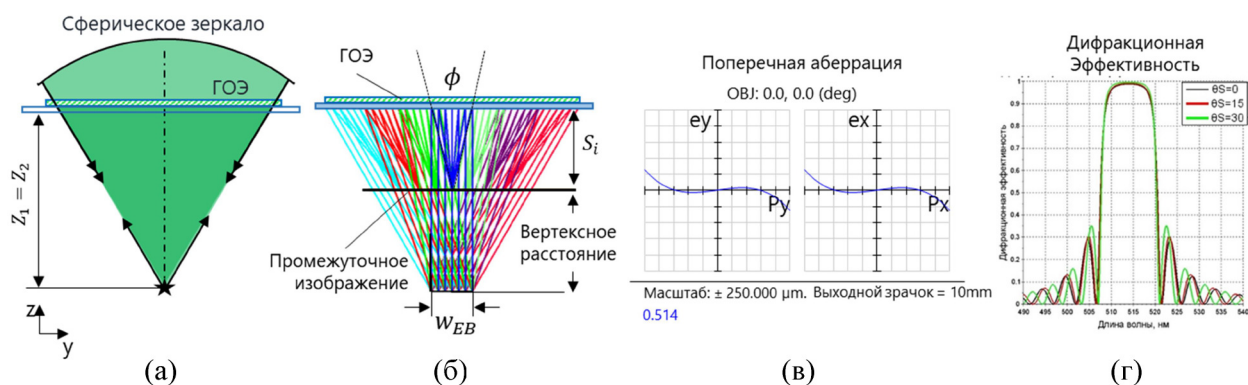


Рис. 4: Осевой ГОЭ в оптической системе дополненной реальности: (а) схема записи ГОЭ концентрическими сферическими волнами; (б) формирование виртуального изображения при освещении ГОЭ из плоскости промежуточного изображения пучками с угловой апертурой ϕ ; (в) поперечная aberrация центрального пучка, возникающая в системе с осевым ГОЭ, при величине зрачка 10 мм; (г) график дифракционной эффективности осевого ГОЭ, как функция от λ при различных фиксированных значениях угла θ_s .

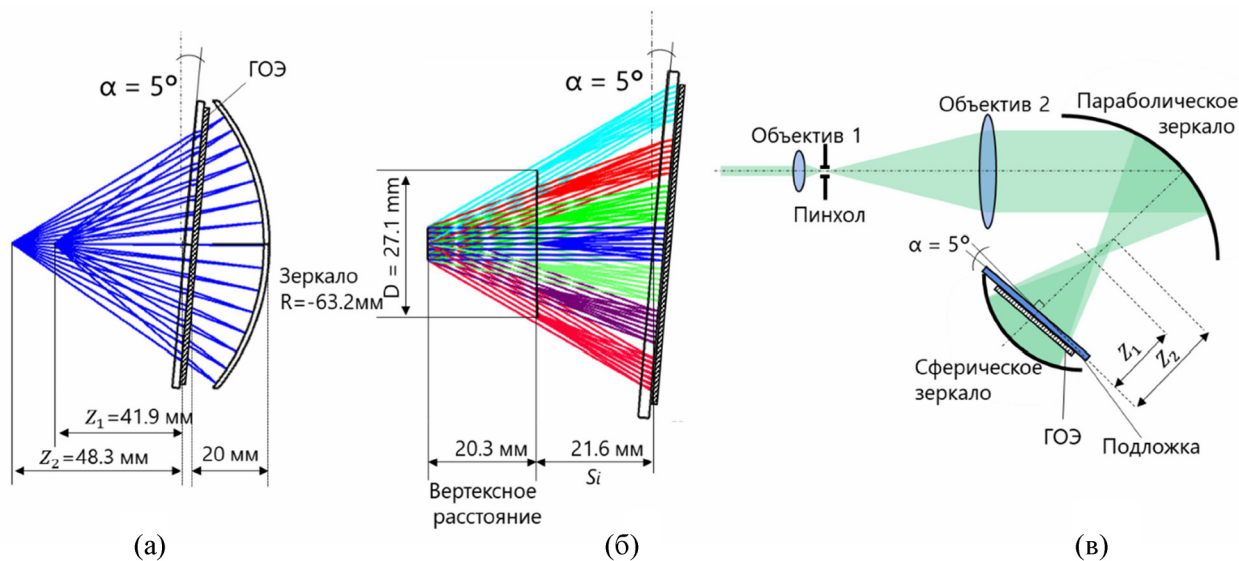


Рис. 5: Осевой ГОЭ в экспериментальной установке: (а) принципиальная схема записи ГОЭ; (б) параметры промежуточного изображения осевого ГОЭ; (в) схема записи ГОЭ с использованием параболического и сферического зеркал для формирования опорной и объектной волн.

странственное изображение с угловой апертурой пучков ϕ . В качестве такого источника изображения предлагается использовать комбинацию направленного голографического диффузора (НГД) с лазерным сканирующим проектором. Диффузор – это оптический элемент, выполняющий функцию рассеяния света в пределах некоторого угла. НГД, в предложенной системе очков ДР, осуществляет не только рассеяние излучения, но и перенаправление излучения от проектора к осевому ГОЭ.

Схема записи ГОЭ и НГД. Ход лучей и результат их дифракции после взаимодействия с осевым ГОЭ показан на рис. 4. Однако, в данной системе присутствует “нулевой” порядок дифракции – недифрагированное на периодической структуре ГОЭ излучение отражается от стеклянных подложек голографического диффузора и осевого ГОЭ и попадает в зрачок пользователя, вызывая шумовую засветку. Избавиться от засветки можно с помощью модификации схемы записи ГОЭ путем наклона подложки осевого ГОЭ, например, на угол $\alpha = 5^\circ$. Такой наклон позволяет перенаправить ход лучей шумовой засветки и вывести их из системы. Ввод дополнительного наклона ГОЭ требует переопределения конструктивных точек записи ГОЭ, для формирования плоского промежуточного изображения (рис. 5(а)–(б)). Независимо от величины поворота подложки α , схема записи ГОЭ остается осевой, поскольку опорная и объектная волны записи ГОЭ расположены на одной оси (рис. 5(а)). Также, записанный ГОЭ работает в осевой схеме очков (рис. 5(б)) и не меняет ось системы.

Т а б л и ц а 2

Параметры записи осевого ГОЭ и НГД

	Параметр	Осевой ГОЭ	НГД
Подложка	толщина	2 мм	
	материал	BK7 Schott	
Регистрирующая среда	толщина	16 мкм	
	материал	Bayfol HX200	
	Чувствительность, S	30 мкДж/см ²	
Запись	Длина волны, λ	514 нм	
	Экспозиция, TE	100 сек	12 сек
	PR/PO	1/2	1/17

В схеме записи ГОЭ (рис. 5(в)) источником излучения служит когерентный лазер “Coherent Green 514-1000” с длиной волны $\lambda = 514$ нм. В фокальной точке короткофокусного объектива расположено отверстие (пинхол) диаметром 15 мкм для выпол-

нения частотной фильтрации излучения. Объектив 2 формирует параллельный пучок, который, отражаясь от параболического зеркала, формирует точку опорной волны на расстоянии Z_1 от ГОЭ. Далее излучение, отражаясь от сферического зеркала проходит вновь через фоточувствительный материал, формируя в его толще объемную интерференционную картину. Объектная волна имеет перетяжку на расстоянии Z_2 от осевого ГОЭ. Параметры записи осевого ГОЭ представлены в табл. 2.

Для подтверждения работоспособности предложенного концепта, в качестве источника изображения был записан НГД с заданным пространственным распределением миры пространственного разрешения стандарта USAF 1951. НГД является внеосевым просветным фазовым ГОЭ, выполняющим функцию перенаправления излучения от проектора и увеличения угловой апертуры изображающих пучков. Опорная волна в схеме записи диффузора представляет собой наклонный под углом β расходящийся лазерный пучок с угловой апертурой NA (рис. 6). Объектная волна образована проекционной оптической системой с фокусным расстоянием f' , формирующей пространственное изображение оптического диффузора (матового рассеивателя) в плоскости НГД. Параметры проекционной системы связаны соотношением:

$$f' = \frac{a}{\omega(1-b)}, \quad (7)$$

где a – расстояние от диффузора до объектива, ω – угловое увеличение, b – линейное увеличение системы. Для записи голографического диффузора размером $D = 28 \times 15.75$ мм и угловой апертурой $\phi = 25.5^\circ$, потребуется объектив с фокусным расстоянием $f' = 121.7$ мм и диффузор размером 80×45 мм с углом рассеяния 8° . В системе также использовался пинхол с диаметром отверстия 15 мкм для выполнения частотной фильтрации излучения. Для дополнительного снижения уровня паразитных засветок, в схеме записи использовалось нейтральное стекло ИКС1, находящееся в оптическом контакте с подложкой НГД, и препятствующее отражению излучения от задней поверхности подложки голограммы.

Эксперимент и результаты. На основе записанных голографических оптических элементов был собран прототип устройства очков ДР, формирующий виртуальное изображение на бесконечности. На рис. 7, а показана принципиальная схема установки очков дополненной реальности. Расходящийся лазерный пучок освещает НГД под углом β . Излучение дифрагирует на периодической структуре НГД, и преобразуется в расходящиеся пучки с угловой апертурой ϕ . Излучение “0” порядка дифракции проходит через оптические элементы без взаимодействий и выводится из системы. Расходящиеся

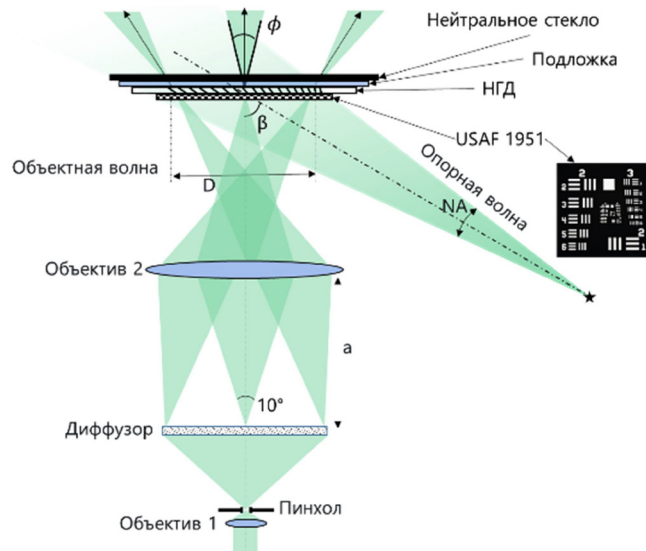


Рис. 6: Схема записи НГД.

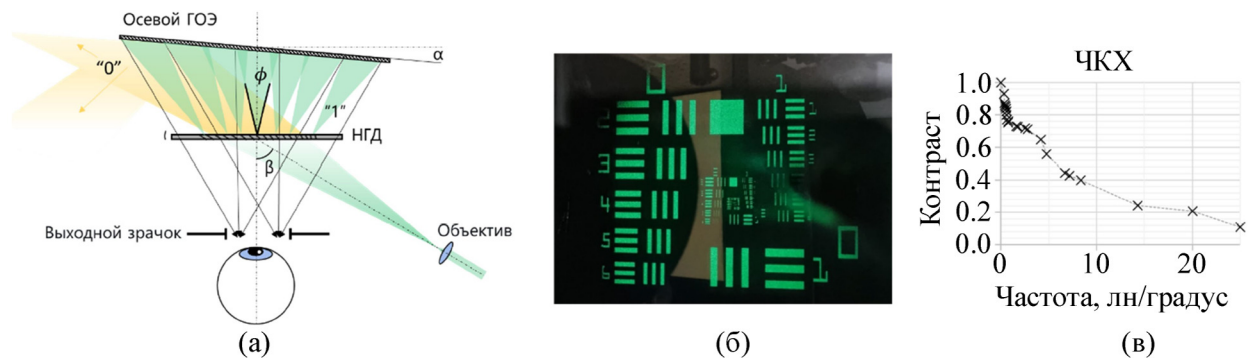


Рис. 7: Экспериментальная установка: (а) принципиальная схема очков ДР; (б) виртуальное изображение, наблюдаемое из плоскости выходного зрачка системы; (в) частотно-контрастная характеристика оптической системы прототипа очков ДР.

сферические пучки “1” порядка дифракции, пространственно распределенные в соответствии с мирой пространственного разрешения USAF 1951, дифрагируют на структуре осевого ГОЭ и преобразуются в плоские пучки, которые, накладываясь между собой образуют выходной зрачок системы. Таким образом, система формирует виртуальное изображение на бесконечности, которое наблюдается из плоскости выходного зрачка системы. На рис. 7(б) показано виртуальное изображение, наблюдаемое из плоскости выходного зрачка.

Заключение. Использование осевого ГОЭ способствует снижению aberrаций, возникающих в оптической системе очков ДР. Как результат, это позволяет увеличить выходной зрачок системы. Авторами предложена оптическая система очков ДР на основе осевого ГОЭ, где в качестве источника изображения используется НГД в комбинации с проектором. Система формирует широкое поле зрения (60 градусов), большой выходной зрачок (10 мм), а также обладает спектральной селективностью < 12 нм. Параметры системы, полученные в ходе математического моделирования, подтверждаются результатами измерений прототипа устройства. Предложенная система очков ДР имеет большой потенциал для внедрения в устройства дополненной реальности. Однако, недостатками предложенной системы может являться риск возникновения шумовых засветок, а также увеличенный объем системы, по сравнению с другими типами систем на основе ГОЭ.

Данное исследование выполнено при поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий (грант № 677ГУЦЭС8-D3/63857).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Н. Корешев, *Основы голографии и голограммной оптики: Учебное пособие* (Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2009).
- [2] N. Kim, Y.-L. Piao, H.-Y. Wu, *IntechOpen*, 100 (2017). DOI: 10.5772/67297.
- [3] F.-K. Bruder, T. Fäcke, T. Rölle, *Polymers*, 472 (2017). DOI: 10.3390/polym9100472.
- [4] B. Shin, S. Kim, V. Druzhin, et al., *Proc. SPIE 10944, Practical Holography XXXIII: Displays, Materials, and Applications*, 109440G (2019). DOI: 10.1117/12.2507339.
- [5] E. DeHoog, J. Holmstedt, T. Aye, *Applied Optics* **55**, 5924 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.005924.
- [6] D. Atchison, G. Smith, *Optics of human eye* (Butterworth-Heinemann, 2000).
- [7] H. Kogelnik, *Bell System Technical Journal* **48**(9), 2909 (1969). DOI: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x.

Поступила в редакцию 31 марта 2023 г.

После доработки 3 июля 2023 г.

Принята к публикации 4 июля 2023 г.