Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Калинина Анастасия Андреевна

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ И ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Специальность: 1.3.6 – Оптика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Савинов Сергей Юрьевич

Официальные оппоненты:

Степанов Евгений Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом молекулярной физики и диагностики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Спиридонов Максим Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института космических исследований Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет»

Защита состоится <u>«19» декабря 2023 г</u>. в <u>10:00</u> на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г.Москва, Ленинский проспект, д.53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан «___» ____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01 доктор физико-математических наук

А.С.Золотько

І. Общая характеристика работы

Работа посвящена исследованию свойств волноводных и дифракционных оптических элементов для их применения в устройствах отображения информации, а именно в устройствах дополненной реальности, с целью улучшения качества виртуального изображения.

Актуальность темы исследования

Одним из видов изображающих оптических систем являются системы реальности. Дополненная реальность дополненной (**Д**Р) _ ЭТО наложение информации (чаще всего, цифровой) на изображение окружающей действительности. Изображение дополненной реальности наблюдается через прозрачный оптический элемент - комбайнер, в качестве которого могут выступать очковые линзы, лобовое стекло автомобиля, визор шлема. Устройства ДР были разработаны с целью предоставления быстрого доступа к нужной информации и уже получили широкое применение в военной и космической отраслях, в медицине и строительстве. Однако, в настоящее время, формируемые оптическими системами изображения ДР не отличаются высоким качеством. В то же время, зрительная система человеческого глаза весьма чувствительна к подобного рода цифровым изображениям. Такие параметры устройств ДР как поле зрения, разрешение, размер выходного зрачка, ограничены технологиями формирования виртуальных изображений, поэтому, устройства ДР могут вызывать зрительный дискомфорт при их долговременном использовании. Именно поэтому, несмотря на то что первые прототипы устройств ДР появились еще в 1960-х, до сих пор активно ведутся исследования по улучшению качества изображения и созданию «эффекта полного погружения» для пользователя.

В настоящее время наибольшее развитие получили два типа устройств ДР – очки ДР и проекционные дисплеи (ПД) (head-up дисплеи). Очки представляют собой бинокулярные устройства, включающие в себя оптический модуль формирования изображения и, так называемый, комбайнер – оптический элемент, перенаправляющий излучение в зрачок глаза пользователя, и, позволяющий одновременно наблюдать цифровое виртуальное изображение и изображение окружающего мира. В зависимости от типа комбайнера, системы очков ДР принято

делить на три типа: с использованием волноводов (waveguides), с использованием призмы свободной формы (freeform prism) и с использованием отражательных элементов (free-space combiners). Для того, чтобы использование устройства не вызывало зрительный дискомфорт, оптическая система должна формировать изображение виртуальное такого качества, чтобы оно соответствовало характеристикам зрительной системы человека. А именно, система должна иметь широкое поле зрения, большой выходной зрачок, разрешение, соответствующее разрешению глаза, а также обеспечивать высокую однородность и контрастность изображения. Всё это должно быть совмещено с малым весом и объемом системы – для комфорта использования.

Автомобильные ΠД представляют собой биокулярные системы, формирующие виртуальное изображение для пользователя (а иногда и для пассажира) транспортного средства. Такое устройство содержит осветительный модуль, дисплей, проекционную оптику, которая в комбинации с лобовым стеклом или отдельным комбайнером формирует виртуальное изображение, которое накладывается на дорожное полотно. Основными характеристиками таких устройств являются поле зрения, выходной зрачок, разрешение, однородность, яркость и контраст виртуального изображения. При увеличении поля зрения системы пропорционально растет и объем устройства, что ограничивает их интеграцию в транспортные средства. Поэтому исследования в области ПД направлены на совмещение широкого поля зрения и малого объема устройства. Помимо этого, в некоторых случаях возникает разногласие между конвергенцией (сведение зрительных осей обоих глаз на рассматриваемом предмете) и аккомодацией глаза (способность глаза ясно видеть предметы, находящиеся от него на различных расстояниях), что приводит к возникновению головных болей и зрительного дискомфорта. Поэтому к ПД также предъявляются требования по формированию 3D изображения.

Для обоих видов систем ДР наиболее перспективными являются оптические системы с использованием волноводных оптических элементов, дифракционных и голографических оптических элементов или их комбинаций. В данной работе

рассмотрены оба типа систем ДР – очки и ПД, и предложены методы улучшения их выходных характеристик, а именно поля зрения и размера выходного зрачка.

Цель диссертационной работы

Разработка компактных устройств дополненной реальности с использованием волноводных и дифракционных оптических элементов и использование свойств данных элементов для улучшения характеристик систем дополненной реальности таких, как поле зрения и выходной зрачок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие

Задачи:

 Разработка оптической системы волноводного устройства формирования виртуального изображения с увеличенным полем зрения за счет выбора оптимальной геометрической формы используемого волновода.

2. Разработка и создание оптической системы формирования виртуального изображения на основе комбинации голографических оптических элементов для достижения одновременно широкого поля зрения и большого выходного зрачка устройства.

3. Разработка эффективных способов записи осевых и внеосевых широкоапертурных голографических оптических элементов для изображающих систем дополненной реальности.

4. Разработка метода увеличения поля зрения в системе проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью создания автостереоскопического 3D изображения.

Научная новизна

1. Для очков ДР на основе волновода впервые предложена оптическая система, формирующая виртуальное изображение в поле зрения 80×40 градусов за счет специально разработанной формы волновода;

2. Разработана методика формирования направленного голографического диффузора с заданным углом рассеяния и осевого голографического оптического элемента с функцией отражательной линзы, обладающего плоским промежуточным изображением, использование которых в оптической системе очков ДР приводит к снижению поперечных аберраций более чем в 40 раз;

3. Для очков ДР на основе комбинации голографических оптических элементов впервые предложена оптическая система, обладающая одновременно широким полем зрения >60 градусов и большим выходным зрачком >10 мм;

4. Для автомобильного ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения предложен метод увеличения поля зрения, представлены результаты по увеличению поля зрения системы в 1.6 раз.

Практическое использование результатов.

На основе проведенных исследований созданы:

1. Макет очков дополненной реальности с малым уровнем аберраций, позволяющий формировать широкое поле зрение в системе очков ДР 60 градусов и размером выходного зрачка 10 мм.

2. Макет проекционного дисплея с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения с увеличенным угловым размером виртуального изображения.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы были использованы в работах, проводимых в ООО «Исследовательский центр Самсунг», а именно:

• метод формирования 3D изображения в системах проекционных дисплеев дополненной реальности на основе волновода с размножением выходного зрачка;

• метод увеличения поля зрения в системе проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка.

Теоретическая и практическая значимость работы

Исследования позволили выявить ранее не изученные свойства волноводных и голографических оптических элементов и применить их для улучшения характеристик изображающих систем дополненной реальности. Значимый с научнопрактической точки зрения результат работы состоит в том, что в системах очков дополненной реальности, с использованием волноводных перископов для переноса изображения от проектора до глаза пользователя, может быть достигнут большой угловой размер виртуального изображения при высокой степени компактности системы, что было продемонстрировано на примере предложенной оптической

системы очков дополненной реальности с использованием изогнутого клиновидного волновода и голографического оптического элемента, обеспечивающей угловой размер виртуального изображения 80°×40°.

Также значимый результат работы состоит в создании нового метода формирования виртуального изображения с использованием комбинации голографических оптических элементов, а именно осевой отражательной линзы и направленного голографического диффузора, позволяющих обеспечить изображающей системе очков дополненной реальности широкое поле зрения (60°) и большого выходного зрачка (10 мм) одновременно.

Кроме этого, значимый результат работы состоит в разработке метода увеличения поля зрения в системе проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка с возможностью отображения автостереоскопического 3D изображения, достигнутого путем модификации модуля формирования зон видения, что было продемонстрировано на примере оптической системы проекционного дисплея с увеличенным в 1.6 раза угловым размером виртуального изображения.

Полученные результаты представляют интерес для производителей мобильных электронных носимых устройств (очков дополненной реальности), для автопроизводителей (проекционные дисплеи), для авиационной, космической и военной промышленности (шлемы дополненной реальности, проекционные дисплеи), а также для исследовательских групп, работающих в области разработки методов формирования виртуальных 2D и 3D изображений.

Методология и методы исследования

В исследовании использованы методы геометрической и волновой оптики.

Моделирование и анализ оптических систем выполнялся с помощью специализированного программного обеспечении Zemax, CodeV, LightTools, а также MatLab.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный метод формирования виртуального изображения в системе дополненной реальности с использованием изогнутого клиновидного

волновода и внеосевого голографического оптического элемента позволяет увеличивать поле зрения системы более чем в 2 раза.

2. Применение осевого отражательного голографического оптического элемента в системах дополненной реальности, формируемого с помощью объектной и опорной волн, конструктивные точки которых совпадают, позволяет снизить уровень поперечных аберраций в изображающих системах дополненной реальности более чем в 40 раз.

3. Разработанный метод формирования виртуального изображения с использованием осевой голографической линзы и внеосевого направленного голографического диффузора позволяет достичь одновременно широкого поля зрения системы (60°) и большого выходного зрачка (10 мм).

4. Поле зрения в системе автостереоскопического проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка может быть увеличено более чем в 1.5 раза изменением углового увеличения в оптической системе модуля формирования зон видения.

Степень достоверности

Достоверность и обоснованность выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждена хорошим согласованием результатов теоретических расчетов и моделирования с результатами, полученными при создании и тестировании разработанных экспериментальных устройств.

Личный вклад автора

Автором были предложены новые оптические схемы устройств очков дополненной реальности с улучшенными характеристиками по сравнению с существующими аналогами, был выполнен теоретический анализ и расчет оптической системы проекционного дисплея на основе волновода с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения, а также предложен метод увеличения поля зрения в данной системе. Для предложенных оптических систем необходимые автором выполнены расчеты использованием с методов геометрической и волновой оптики, проведено моделирование с применением специализированного программного обеспечения, выполнена сборка и проведено тестирование экспериментальных устройств.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных научно-практических конференциях: SPIE Photonic Europe 2020, Strasbourg, France; X международная конференция по фотонике и информационной оптике, МИФИ, 2021, Москва, Россия; SPIE Photonics West 2022, San-Francisco, USA; XI международная конференция по фотонике и информационной оптике, МИФИ, 2022, Москва, Россия; XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2022, Caнкт-Петербург, Россия.

Основные результаты диссертации опубликованы в трех статьях и в двух трудах конференций, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также в двух патентах на изобретение, ссылки на которые приведены на стр. 25-26.

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы и приложение. Объем работы составляет 106 страниц, включая 51 рисунок.

II. Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, описана научная новизна и определена практическая значимость работы. Также приведена структура диссертации, обозначены методы проведения исследований и экспериментов, а также основные результаты исследований.

В первой главе приводится обзор современных методов формирования виртуального изображения. Приведены литературные данные о научно-техническом заделе в области устройств ДР, а именно изложена краткая история создания устройств ДР, описаны виды и типы устройств ДР, раскрыты основные понятия и определения, рассмотрены принципы работы и описаны основные оптические схемы особенности очков ДP ПД. Описаны И использования волноводных И дифракционных (и голографических) оптических элементов в устройствах ДР для формирования виртуального изображения. В заключении главы сформулированы обосновывающие выводы, актуальность проведения исследований ПО

использованию волноводных и дифракционных оптических элементов в устройствах ДР.

Во второй главе приводятся результаты исследований по разработке оптической системы очков ДР с использованием изогнутого клиновидного волновода с увеличенным до 80°х40° градусов полем зрения.

Очки ДР с использованием волноводов работают по принципу перископов. Проекционная система формирует угловое изображение, которое вводится в волновод с помощью вводных элементов (рис.1, а-б). Излучение распространяется внутри волновода в условиях полного внутреннего отражения (ПВО), затем достигает симметричного выводного элемента, который выводит излучение из волновода, формируя виртуальное изображение на бесконечности. В работе показано, что использование планарного волновода в системах ДР ограничивает поле зрения, формируемое системой. При этом сам волновод может пропускать излучение в условиях полного внутреннего отражения (ПВО) в пределах поля зрения более 40°. Если волновод толщиной *t* образован концентрическими не поверхностями с радиусами кривизны R_1 и R_2 , такими, что $|R_1|+t = |R_2|$, то проводимое поле зрение может быть увеличено на ≈25% Однако, такие системы необходимо дополнять корректорами, обеспечивающими сохранение планарности изображающих пучков при их распространении внутри волновода [1].



Рис.1. а) параметры изогнутого клиновидного волновода: б) вывод излучения при достижении точки $A_i(r, \varphi_i)$; в) формирование широкого поля зрения в системе очков ДР; г) поле зрения системы очков ДР в зависимости от разности радиусов кривизны поверхностей волновода.

Волновод, образованный неконцентрическими поверхностями, $|R_I|+t \neq |R_2|$, представляет собой клиновидный волновод. В таком волноводе угол падения луча *I* и отражения *I*, введенного в волновод под углом *U*, уменьшается по мере распространения излучения внутри волновода. В итоге, луч достигает точки $Ai(r,\varphi i)$,

в которой условие ПВО нарушается и луч выводится из волновода (рис.1, а-б). Определить положение точки $Ai(r, \varphi i)$ удобно выполнять с использованием Q_U метода трассировки лучей [2]. Если использовать элемент, который перенаправит выведенные из волновода лучи в зрачок глаза, то такая система сформирует виртуальное изображение для пользователя (рис.1, в), причем в такой схеме можно достичь ультраширокого поля зрения системы (рис.1, г) [T1].

Поле зрения системы относительно зрачка определяется выражением:

$$FOV = 2\tan^{-1}\left(\frac{r}{d}\tan\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\right),\tag{1}$$

где r – радиус кривизны внешней поверхности волновода, d – расстояние от зрачка до внешней поверхности волновода, а $\Delta \varphi$ определяется, как:

$$\Delta \varphi = \varphi_{max} - \varphi_{min}, \quad \varphi_i = U_i - I_i, \tag{2}$$

где Ui - угол падения луча на поверхность, относительно оптической оси, Ii – угол падения луча на поверхность, относительно нормали к поверхности, i – номер взаимодействия луча с поверхностью волновода. Значения углов Ui и Ii определяются кривизной и показателем преломления волновода и вычисляются с помощью Q_U метода трассировки лучей.

Установлено, что теоретическое поле зрения в предложенной системе может достигать 160° по горизонтали (рис.1, г). Однако волновод должен не только проводить излучение в условиях ПВО и выводить его, но и обеспечивать формирование виртуального изображения. Для этого, форма волновода может быть выбрана такой, что при вводе в него изображающих пучков малого диаметра, они фокусируются, и в конечном счете формируют пространственное изображающего пучка меньше критического угла ПВО. Тогда, для каждого углового направления, U_i излучение будет выведено из волновода в координатах A_i . Такая форма волновода была достигнута путем оптимизации коэффициентов полиномов Цернике, с помощью которых описывалась внутренняя поверхность волновода, а также радиусов кривизны R_x и R_y внешней поверхности волновода (рис.2, а).



Рис.2. Изображающая система очков ДР на основе клиновидного изогнутого волновода: а) ход лучей в оптической системе; б) частотно-контрастная характеристика

ГОЭ в данной схеме расположен за внешней поверхностью волновода на расстоянии 1 мм (рис.2, а) и осуществляет перенаправление излучения, вышедшего из волновода, в зрачок пользователя. В данной системе ГОЭ представляет собой элемент, записанный сферическими волнами с конструктивными точками записи: Y_1 = 0мм, Z_1 = -25мм, Y_2 = -1.4×10⁸мм, Z_2 = -3.8×10⁷ мм (рис.2, б). В модели, качестве источника изображения использовался набор параллельных пучков в пределах 40°х20° диаметром 0.5 мм (что соответствует изображению, формируемому лазерным сканирующим пикопроектором), вводимых в волновод с помощью вогнутого зеркала (рис.2, а). Материал волновода – РММА, длина волны – 532 нм.

При вводе изображения с угловым размером $40^{\circ} \times 20^{\circ}$, на выходе системы поле зрения составило FOV = $80^{\circ} \times 40^{\circ}$ (рис.2, а). Угловое разрешение такой системы составляет >40 лн/° с контрастом 0.25 (рис.2, в). На рис.3, а показана 3D модель очков ДР на основе клиновидного волновода отражающая компактность предложенного решения. Результат симуляции изображения, которое будет видеть пользователь при использовании очков ДР, показан на рис. 3, б.



Рис.3. Оптическая система очков ДР на основе изогнутого клиновидного волновода: а) 3D модель системы; б) симуляция изображения, формируемого на сетчатке человеческого глаза.

В третьей главе приводятся результаты исследований по разработке оптической системы очков ДР на основе комбинации голографических оптических элементов, позволяющих сформировать широкое поле зрение системы (60°) и большой выходной зрачок (10 мм) одновременно.

Схемы очков ДР с использованием ГОЭ обычно имеют конфигурацию, как на рис. 4. ГОЭ отражательного типа записывается с помощью сферических волн [3], положение конструктивной точки (перетяжки) опорной волны Y_1Z_1 соответствует расположению зрачка глаза и находится на оси системы, а точка объектной волны Y_2Z_2 располагается вне оси и соответствует наклонной сходящейся волне. ГОЭ обладает промежуточным изображением – это плоскость, в которой фокусируется дифрагированное на периодичной структуре ГОЭ излучение, при освещении ГОЭ из Y_1Z_1 плоскими пучками. Внеосевой ГОЭ обладает промежуточным точки изображением изогнутой, несимметричной формы (рис.4, б). В изображающей системе очков ДР, проектор формирует пространственное изображение, положение и форма которого соответствуют промежуточному изображению ГОЭ (рис.4, б). Тогда, ГОЭ преобразует исходящие из этой плоскости расходящиеся пучки в параллельные, которые фокусируются на сетчатке глаза и таким образом пользователь видит виртуальное изображение. Особенность этой системы в том, что она формирует очень маленький выходной зрачок – менее 1 мм.



Рис.4. Схема работы внеосевого ГОЭ в очках ДР: а) формирование внеосевого ГОЭ сферическими волнами – схема «из точки в точку»; б) формирование виртуального изображения с помощью ГОЭ в изображающей системе очков ДР.

Внеосевой ГОЭ вносит большие аберрации в систему очков ДР (рис.5, а), что не позволяет увеличить угловую апертуру изображающих пучков для формирования большого выходного зрачка. Одним из методов по увеличению выходного зрачка системы является выбор такой конфигурации ГОЭ, которая обеспечит наименьшие

аберрации в системе очков ДР. Такой конфигурации соответствует ГОЭ, записанный концентрическими осевыми пучками (рис.5, б), т.е. когда конструктивные точки опорной и объектной сферических волн совпадают $Y_1Z_1 = Y_2Z_2$ (рис.6, а).



Рис.5. Аберрации, вносимые а) внеосевым и б) осевым ГОЭ в изображающую систему очков ДР при выходном зрачке диаметром 10 мм.

Осевой ГОЭ, записанный с помощью концентрических волн (рис.6, а), обладает промежуточным изображением с нулевой кривизной, расположенным на расстоянии S_i от ГОЭ. В работе показано, что использование такого ГОЭ в изображающей системе ДР снижает величину поперечных аберраций (рис.5, б; рис.6, в) более чем в 40 раз [Ж1]. Это свойство позволяет увеличить угловую апертуру изображающих пучков (рис.6, б), следовательно и выходной зрачок системы. Помимо этого, осевой ГОЭ обладает спектральной селективностью менее $\Delta \lambda_{FWHM}$ =12 нм и дифракционной эффективностью 100%, значение которых было оценено с использованием теории связанных волн, описанной Когельником [4] (рис.6, г).



Рис.6 Схема работы очков ДР на основе осевого ГОЭ: а) концентрическая схема записи осевого ГОЭ; б) схема восстановления волнового фронта; в) поперечная аберрация центрального пучка, возникающая в системе при величине зрачка 10мм; д) дифракционная эффективность ГОЭ в зависимости от угла θ₀ для длины волны λ=514нм.

В данной системе очков ДР, источник изображения представляет собой направленный голографический диффузор (НГД), работающий в комбинации с лазерным проектором (рис.7, а) [П1, Ж2].



Рис.7 Принцип работы НГД: a) НГД осуществляет перенаправление излучения и увеличение угловой апертуры изображающих пучков; б) принципиальная схема записи НГД; в) угловое преобразование НГД; г) дифракционная эффективность НГД для различных значения Δn .

Проектор формирует пространственное изображение в плоскости НГД. Излучение от каждого пикселя проектора характеризуется углом падения на НГД δ_i и угловой апертурой ϕ_{in} . Излучение от проектора падает на НГД под углами δ_i и дифрагирует под углами у_i (рис.7 а, в). НГД представляет собой внеосевой фазовый пропускающий ГОЭ, который выполняет функцию перенаправления излучения и увеличения угловой апертуры изображающих пучков. Схема записи такого элемента показана на рис. 7, б. Объектная волна образована оптической системой, формирующей в плоскости НГД изображение оптического диффузора размером D. собой Опорная представляет расходящуюся сферическую волна волну, освещающую НГД под углом $\delta_{n/2}$. Дифракционная эффективность [4] просветного НГД, для различных углов Брэгга в фотополимере Bayfol HX200 (n = 1.505, d = 16мкм) имеет вид, представленный на рис.7, г.



Рис.8. Оптическая система источника изображения на основе лазерного проектора и дополненного отражательной призмой: а) лазерный проектор на основе сканирующих MEMS зеркал; б) ход лучей в призме; б) диаграмма пятен рассеяния в области НГД.

Для формирования пространственного изображения в плоскости НГД используется лазерный сканирующий проектор (рис.8, а) в комбинации с отражательной призмой (рис.8, б). Призма выполнена из РММА и имеет 5 граней, входная и выходная грани обладают нулевой кривизной, форма трех отражательных граней описана с помощью полиномов Цернике. Коэффициенты полиномов были подобраны в программе Zemax чтобы обеспечить формирование изображения с наименьшим уровнем аберраций в плоскости НГД (рис.8, в).



Рис.9 Схемы записи ГОЭ: а) схема записи осевого ГОЭ; б) схема записи НГД.

	Паранатр	Значение		
	параметр	ОсевойГС	Э	нгд
Подложка	Материал	BK7		
	Толщина	2 мм		
Регистр. среда	Материал	Bayfol HX200		
	Толщина	16 мкм		
	Чувствительность	30 мДж/см		
Запись	Длина волны	514 нм		
	Пинхол	15мкм/10мкм		
	PR опора	0,2 мВт/см2	2,35	мВт/см2
	РО объект	0,1 мВт/см2	0,14	мВт/см2
	PR/PO	1/2	16.7/1	
	Экспозиция	100 c		12 c

Таблица 1. Параметры записи ГОЭ

Для экспериментальной установки очков ДР были записаны осевой ГОЭ и НГД, согласно схемам, отображенным на рис.9 а-б. Подложка осевого ГОЭ в схеме записи была повернута на угол α =5° для устранения паразитных засветок, возникающих при распространении излучения «нулевого» порядка дифракции (рис.9, а). В схеме записи НГД, опорная волна представляет собой расходящуюся волну с угловой апертурой *NA*, а объектная волна образована изображающей оптической системой диффузора (рис.9, б). НГД был записан с использованием миры пространственного разрешения стандарта USAF 1951. Параметры схем записи ГОЭ приведены в Таблице 1. В результате сборки экспериментальной установки очков ДР, схема которой показана на рис.10 (а-б), было получено виртуальное изображение с угловым размером 60° и выходным зрачком 10 мм (рис.10, б-в). Прототип обеспечивает разрешение системы >20 лн/° с уровнем контраста > 0.2 (рис.10, г).



Рис.10 Экспериментальная установка очков ДР: а) принципиальная схема установки; б) схема подсветки НГД и ГОЭ, формируемый выходной зрачок с пятью зонами для анализа изображения; в) виртуальное изображение, наблюдаемое с разных позиций выходного зрачка системы; г) частотно-контрастная характеристика оптической системы очков ДР.

В четвертой главе приводятся результаты исследований по разработке метода увеличения поля зрения в оптической системе ПД с использованием волновода с размножением выходного зрачка с помощью дифракционных оптических элементов и с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения.

Формирование автостереоскопического 3D изображения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка осуществляется путем дополнения системы ДВУМЯ оптическими модулями, способствующими формированию двух зон видения (ЗВ) (для левого и правого глаза) в плоскости выходного зрачка, для наблюдается автостереоскопических изображений (рис.11) [П2, Ж3]. Модуль формирования автостереоскопических изображений (МФАИ) представляет собой оптическую систему, формирующую как минимум 2 виртуальных изображения, расположенных на бесконечности, с одинаковым полем зрения, и наблюдаемых в пределах одного выходного зрачка. Система включает в изображения, например LCOS себя источник HED-5201 с разрешением 1280х720пикс, и проекционную оптику. Модуль формирования зон видения (МФЗВ) представляет собой оптическую систему, осуществляющую разделение излучения для левого и правого глаз в плоскости выходного зрачка устройства ПД. Система вывод ракурсных изображений в МФАИ динамической, т.е. является И формирование зон видения в МФЗВ осуществляется в последовательном режиме

(рис.11). МФЗВ работает синхронно с МФАИ, обеспечивая наблюдение ракурсных изображений в соответствующих ЗВ.



Рис. 11. Оптическая система ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка, дополненная модулями МФАИ и МФЗВ для динамического формирования автостереоскопического 3D изображения.

МФЗВ – тонкий оптический модуль, расположенный после выводного состоящий двух линзовых растров (ЛР1 И ЛР2) и элемента волновода, пространственной маски (ПМ), расположенной между ними (рис.11). ЛР1 и ЛР2 образуют телескопическую оптическую систему с угловым увеличением $M_{JP}=1$, которая сохраняет положение виртуального изображения на бесконечности. Для формирования ЗВ в горизонтальном направлении используются цилиндрические линзовые растры. ПМ представляет собой тонкий слой поглощающего материала с интегрированными в него сегментами фильтров, которые пропускают излучение в последовательном режиме для каждой ЗВ. Размер каждого сегмента фильтра соответствует величине единичного канала линзовых растров ЛР1+ЛР2. Количество фильтров в каждом сегменте соответствует количеству ЗВ системы. В схеме, представленной на рис.11 формируется две динамические ЗВ, следовательно, для каждого сегмента ПМ необходимо два пропускающих фильтра. В динамической схеме (рис.11), ПМ представляет собой пространственный амплитудный модулятор света (Spatial Light Modulator (SLM)), в котором каждый пиксель выполняет роль динамического фильтра и имеет состояния ВКЛ и ВЫКЛ, осуществляя таким образом последовательное пропускание излучения для левой и правой ЗВ. ПМ

расположена в сопряженной плоскости с выходным зрачком ПД (рис.12) относительно ЛР2. ПМ синхронизирована с МФАИ так, что при выводе изображения для одного глаза, соответствующие пиксели ПМ переходят в состояние «ВКЛ». В динамической системе ЗВ можно сдвигать вдоль оси x путем сдвига маски на ПМ, согласно данным о расположении глаз пользователя, полученным с помощью системы слежения за глазами. Изображение, выводимое на ПМ, представляет собой вертикальные полосы «белого» цвета. Количество полос соответствует количеству каналов ЛР в системе МФЗВ, а положение и ширина определяются положением и размерами ЗВ в плоскости выходного зрачка (рис.12).



Рис.12 Параметры МФЗВ: а) статичный период Р_{ЛР} для формирования ЗВ в плоскости выходного зрачка ПД; б) Оптическая система, формирующая зоны видения, путем формирования «изображения» ПМ в плоскости выходного зрачка.

Увеличение поля зрения в описанной системе может быть выполнено путем изменения увеличения в оптической системе модуля МФЗВ. Оптическая система «ПМ + ЛР2 + Выходной зрачок ПД» (рис.12, б) связана выражением:

$$a_{\Pi M} = a'_{\Pi M} / M_{JP2}, \qquad (3)$$

где $M_{ЛP2}$ – увеличение ЛР2, расстояние $a'_{\Pi M}$ есть вертексное расстояние системы – расстояние от ЛР2 до выходного зрачка ПД (рис.12). Таким образом, фокусное расстояние для ЛР2 определяется выражением:

$$f_{JP2} = a_{IIM} \cdot a'_{IIM} / (a_{IIM} + a'_{IIM}).$$

$$\tag{4}$$

Период линзовых растров $P_{ЛP}$ и фокусное расстояние $f_{ЛP2}$ связаны с параметрами линзовых растров выражениями:

$$P_{JP} = f_{JP2} / F \#_{JP2}, \tag{5}$$

$$f_{JP2} = f_{JP2} \cdot M_{JP}. \tag{6}$$

Поле зрение, формируемое волноводом *FOV*_{IN} и поле зрения, формируемое системой ПД *FOV*_{OUT} связаны соотношением:

$$FOV_{OUT} = FOV_{IN} \cdot M_{JIP}.$$
⁽⁷⁾



Рис.13 а) энергетическое пропускание телескопической системы ЛР в зависимости от увеличения M_{JP} для горизонтального поля $FOV_{OUT} = 20^{\circ}$; б) телескопическая система единичного канала линзовых растров с увеличением $M_{JP} = 1.6$; в) параметры системы МФЗВ.

Далее все расчеты выполнялись, основываясь на целевом значении для зрения ПД *FOV_{OUT}=20°*. При увеличении $M_{\Pi P}=1$, горизонтального поля энергетическая эффективность системы МФЗВ составляет лишь 30% из-за виньетирования излучения на апертурах линзовых растров, а при увеличении *М*_{ЛР}=1.6 эффективность достигает 48% (рис.13, а). Для модуля МФЗВ была рассчитана телескопическая апохроматическая система, состоящая ИЗ цилиндрических линзовых растров (рис.13, б), с угловым увеличением $M_{JP}=1.6$, которая обеспечивает энергетическую эффективность системе МФЗВ >48% (рис.13, б-в) [Т2]. Параметры МФЗВ представлены в Таблице 2.

Габлица	3. П	араметры	волновод	a
---------	------	----------	----------	---

Таблица 4. Параметры ДОЭ

Параметр	Величина
FOV	20°x7°
l	800 мм
Выходной зрачок ПД	130 мм × 60 мм
ДОЭ1	6.65 мм × 6.65 мм
ДОЭ2	10 мм÷42 мм × 194.5 мм
ДОЭЗ	412 мм × 158 мм
Толщина	3 мм
Материал	BASF64

	Дл	Кол-во		
Период	635 нм	520 нм	462 нм	дискретных решеток
ДОЭ1	0.5040	0.4101	0.3624	1
ДОЭ2	0.3560	0.2900	0.2562	10
ДОЭЗ	0.5040	0.4101	0.3624	32



Рис.14 Геометрические параметры ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка.

Для формирования виртуального изображения в поле зрения $FOV_{OUT} = 20^{\circ} \times 7^{\circ}$, увеличении MΦ3B $M_{\Pi P} = 1.6$, волновод должен формировать при угловое изображение размером $FOV_{IN} = 12.5^{\circ} \times 7^{\circ}$, согласно выражению (7). Выходной зрачок для системы ПД выбран 130х60 мм, расстояние от волновода до выходного зрачка системы составляет *l*=800 мм. Размножение выходного зрачка в волноводе происходит последовательно: сначала ВДОЛЬ одной оси, затем вдоль перпендикулярной оси (рис.14, а). Для формирования RGB изображения используются 3 волновода – отдельно для каждой длины волны (рис.14, б). Параметры волновода представлены в Таблице 3, а сам волновод отображен на рис.14. Периоды ДОЭ были выбраны для каждого волновода таким образом, чтобы обеспечить угол дифракции центрального поля θ_d =48° для каждой длины волны (Таблица 4).

Параметры ДОЭ подобраны для формирования виртуального изображения в поле зрения $FOV_{IN} = 12.5^{\circ} \times 7^{\circ}$. Для достижения однородной засветки в плоскости выходного зрачка ПД, ДОЭ2 был разбит на 10 элементарных решеток (рис.15, а), а выводной элемент ДОЭ3 на 32 элементарные решетки (рис.15, б), дифракционная эффективность каждой из которых определяется, как:

$$C_{i-1} = \frac{C_i(1-\alpha)}{1+C_i(1-\alpha)},$$
(8)

где *С* – дифракционная эффективность, *i* – номер дискретной решетки ДОЭ, αпотери, возникающие в волноводе. При взаимодействии излучения с дифракционными структурами, возникает сразу несколько порядков дифракции, которые необходимо учитывать в модели системы:

$$n_d \sin(\theta_d) - n_0 \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{d}, \qquad (9)$$

где n_0 и n_d – показатели преломления воздуха и волновода, θ_0 и θ_d – угол падения и угол дифракции, $m = 0, \pm 1, \pm 2... -$ порядки дифракции, d – период дифракционной решетки. При моделировании системы в программе LighTools были использованы четыре порядка дифракции, взаимное соотношение дифракционных эффективностей которых отражено в Таблице 5. Эти соотношения были получены путем анализа среднего значения дифракционной эффективности для всех угловых с помощью RCWA [5]. направлений излучения метода Распределение дифракционных эффективностей элементов ДОЭ2 и ДОЭ3 показано на рис.15 (а-б).

Таблица 5. Параметры ДЭ ДОЭ

Порядок дифракции и тип дифракции							т			
«2»		«1»		«O»		тип пор				
е Пропускание	Отражение	Пропускание	Отражение	Пропускание	Отражение	Пропускание	Отражение	доз		
-	-	0	0	0	0	0	1	ДОЭ1		
-	-	0	0	0	1-Y	0	Y	ДОЭ2		
0	0.21*X	Х	0.97*X	0	1-2.18*X	0	0	ДОЭЗ		
		0 X	0 0.97*X	0	1-Y 1-2.18*X	0	1 Y 0	доэт доэ2 доэ3		



Рис.15. а) Дифракционная эффективность дискретных дифракционных решеток ДОЭ2; б) Дифракционная эффективность дискретных дифракционных решеток ДОЭ3.

Моделирование системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка (рис.16) показывает, что оптическая система ПД без модуля МФЗВ обеспечивает однородную засветку в плоскости выходного зрачка для поля зрения $FOV_{IN} = 12.5^{\circ} \times 7^{\circ}$ (рис.16, б). При включении в симуляцию модуля МФЗВ с угловым увеличением M=1.6 система обеспечивает однородную освещенность в плоскости выходного зрачка с полем зрения $FOV_{OUT} = 20^{\circ} \times 7^{\circ}$ (рис.16, в). При включении в симуляцию ПМ с фильтрами пропускания излучения, система формирует две зоны видения (рис.16, г) размерами 65×60 мм. Таким образом, система позволяет формировать виртуальное автостереоскопическое 3D изображение в поле зрения $20^{\circ} \times 7^{\circ}$.



Рис.16 Симуляция системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка и модулем МФЗВ: а) модель оптической системы; б) распределение интенсивности излучения в плоскости выходного зрачка без модуля МФЗВ (12.5°×7°) и с модулем МФЗВ (20°×7°); в) формирование зон видения в плоскости выходного зрачка.

Параметр	Величина
FOV	20°×7°
Выходной зрачок ПД	130 мм × 60 мм
Кол-во зон видения	2
Размер зон видения	65 мм
Разрешение изображения	1200 × 420 пикселей
Увеличение Млр	1.6
Длины волн	462 нм, 520 нм, 635 нм
Энергетическая эффективность системы	0.1%
Объем системы	3Л

Таблица 6. Параметры оптической системы ПД



Рис.17 Экспериментальная установка ПД с размножением выходного зрачка и с возможностью вывода автостереоскопических изображений: а) принципиальная схема экспериментальной установки; б) оптическая система ПД; в) оптическая система модуля МФЗВ; г) формирование зон видения в последовательном режиме и вывод виртуальных изображений.



Рис.18 Увеличение поле зрения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка: а) экспериментальная установка формирования виртуального изображения на бесконечности; б) увеличение поля зрения путем дополнения системы цилиндрическими линзами с увеличением $M_{ЛP}$ =1.54; в) виртуальное изображение без увеличения $M_{ЛP}$ =1 и с увеличением $M_{ЛP}$ =1.54.

Экспериментальная установка, собранная на основе коммерчески доступных оптических элементов, подтверждает возможность формирования зон видения в плоскости выходного зрачка устройства ПД (рис.17). При этом в динамической системе ПД, в каждый момент времени t_i в ЗВ наблюдаются ракурсные изображения, позволяя наблюдать ЗD изображение обоими глазами при частоте смены кадров 50*fps*. Способ увеличения поля зрения с помощью изменения углового увеличения модуля МФЗВ был также проверен на экспериментальной установке, в которой линзовые растры представлены в виде единичных цилиндрических линз, образующих телескопическую систему с угловым увеличением $M_{ЛP}$ =1.54 (рис.18).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и состоят они в следующем.

1. Впервые разработана оптическая система очков дополненной реальности с использованием изогнутого, клиновидного волновода и внеосевого голографического оптического элемента, которая позволяет существенно снизить ограничение по полю зрения, вызванное условиями распространения излучения внутри волновода в условиях полного внутреннего отражения, и обеспечить формирование виртуального изображения с угловым размером 80°×40°.

2. Предложена оптическая система устройства формирования виртуального изображения на основе комбинации голографических оптических элементов, которая впервые позволила достичь одновременно большого выходного зрачка устройства (>10мм) и широкого поля зрения виртуального изображения 60°.

Созданное экспериментальное устройство – макет очков дополненной реальности на основе предложенной оптической системы подтвердило указанные характеристики.

3. Впервые разработан способ увеличения поля зрения в системе проекционного дисплея дополненной реальности с использованием волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения. Создан экспериментальный прототип проекционного дисплея и продемонстрирована возможность увеличения поля зрения системы в 1.54 раза.

Исследованные свойства голографических и волноводных оптических элементов, а также разработанные на основе этих свойств методы формирования виртуального изображения и предложенные оптические системы дополненной реальности обладают большим потенциалам для внедрения в современные изображающие устройства и могут найти применение в различных областях науки и техники.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в журналах, индексируемых в международных базах данных *Web of Science* и *Scopus*:

Ж1. Калинина А., Путилин А., Копенкин С. Применение осевых голографических оптических элементов в системе дополненной реальности // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – №8. – С.3-13. [переводная версия: Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т.50. – С.311-317. https://doi.org/10.3103/S1068335623080067]

Ж2. Kalinina A., Putilin A., Kopenkin S. Eyebox enlargement in holographic AR glasses // Appl. Opt. – 2023. – T.62. – №10. – C.D163-D170.
[https://doi.org/10.1364/AO.478529]

K3. Yanusik I., Kalinina A., Morozov A., Lee J.-H. Pupil replication waveguide system for autostereoscopic imaging with a wide field of view // Opt. Express. – 2021. – T.29. – №22. – C.36287-36301. [https://doi.org/10.1364/OE.439855]

Труды конференций, индексируемые в международных базах данных *Web* of Science и Scopus:

T1. Kalinina A., Putilin A. Wide-field-of-view augmented reality eyeglasses using curved wedge waveguide. // Proc. SPIE, Digital Optics for Immersive Displays II. – 2020. – T.11350. – C.005. [https://doi.org/10.1117/12.2559320]

T2. Kalinina A., Yanusik I., Dubinin G., Morozov A., Lee J.-H. Full-color AR 3D head-up display with extended field of view based on a waveguide with pupil replication // Proc. SPIE, Advances in Display Technologies XII. – 2022. – T.12024 – C.0D. [https://doi.org/10.1117/12.2608610]

Патенты:

П1. Устройство отображения информации с помощью объемных голограмм: патент RU2794409C1 РФ / Калинина А.А., Путилин А.Н. – 2022.

П2. Устройство дополненной реальности с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования трехмерного изображения и способ формирования изображения посредством указанного устройства дополненной реальности с размножением выходного зрачка: патент RU2760473C1 РФ / Морозов А.В., Янусик И.В., Калинина А.А., Ли Джинхо – 2020.

Список цитируемой литературы

- Vostrikov, G.N., Muravyev, N.V., Angervaks, A.E., Okun, R.A., Perevoznikova, A.S., Ryu, J., Putilin, A.N. Method for Compensating Aberrations of a Virtual Image Formed by an Augmented Reality Display Based on a Cylindrical Diffractive Waveguide // Appl. Sci. – 2023. – T.13. – №4. – C. 2400.
- Dereniak, E. L., and Dereniak, T. D. Geometrical and Trigonometric Optics. Cambridge University, 2008.
- Shin B., Kim S., Druzhin V., Malinina P., Dubynin S., Bolotova A., Kopenkin S., Putilin A., Seo W., Lee C.-K., Sung G.,Kim Y.-T., Seo J., Chung J.-C., Lee H.-S. Compact augmented-reality glasses using holographic optical element combiner // Proc. SPIE. – 2019. – T.10944. – C.0G.
- Kogelnik, H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // Bell System Technical Journal. – 1969. – T.48. – №9. – C. 2909-2947.
- Moharam M. G., Gaylord T. K., Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // J. Opt. Soc. Am. – 1981. – T.71. - №7. – C. 811-818.