

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Савинов Сергей Юрьевич

Москва - 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Актуальность работы.....	5
Цель и задачи исследований.....	7
Научная новизна работы.....	7
Практическое использование результатов.....	8
Теоретическая и практическая значимость работы.....	8
Методология и методы исследования.....	10
Положения, выносимые на защиту.....	10
Степень достоверности.....	10
Личный вклад автора.....	11
Апробация работы и публикации.....	11
Структура и объем работы.....	13
Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ И ВОЛНОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	14
1.1 Оптические системы дополненной реальности.....	14
1.1.1 Возникновение устройств дополненной реальности.....	14
1.1.2 Параметры устройств ДР.....	15
1.2 Оптические системы очков ДР.....	17
1.2.1 Системы на основе волноводных оптических элементов.....	18
1.2.2 Системы на основе призм свободной формы.....	20
1.2.3 Системы на основе полупрозрачного зеркала.....	21
1.2.4 Системы на основе голографических оптических элементов.....	22
1.3 Оптические системы проекционных дисплеев дополненной реальности....	26
1.3.1 Системы ПД на основе зеркал.....	27
1.3.2 Системы ПД на основе волноводов.....	28
1.3.3 Системы ПД на основе голографических оптических элементов.....	29

1.3.4 Способы формирования 3D изображения в проекционных дисплеях ...	29
Выводы к первой главе	31
Глава 2. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИНОВИДНОГО, ИЗОГНУТОГО ВОЛНОВОДА	32
2.1 Влияние формы волновода на величину поля зрения	32
2.2 Волновод, образованный концентрическими поверхностями	33
2.3 Волновод, образованный неконцентрическими поверхностями	37
2.3 Изображающие свойства клиновидного волновода	40
2.4 ГОЭ в системе очков ДР на основе клиновидного волновода.	43
2.5 Система очков ДР на основе клиновидного изогнутого волновода	44
Выводы к главе 2	45
Глава 3. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЕВОГО ГОЭ	46
3.1 Аберрации в системах на основе ГОЭ	46
3.2 Параметры осевого ГОЭ в очках ДР	51
3.3 Свойства направленного голографического диффузора	58
3.4 Источник изображения в оптической системе ДР на основе осевого ГОЭ и НГД	62
3.5 Оптическая схема формирования осевого ГОЭ	64
3.6 Оптическая схема формирования направленного голографического диффузора	66
3.7 Экспериментальная установка очков ДР	67
Выводы к главе 3	69
Глава 4. УВЕЛИЧЕНИЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОЕКЦИОННОГО ДИСПЛЕЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВОДА С РАЗМНОЖЕНИЕМ ВЫХОДНОГО ЗРАЧКА	70
4.1 Метод формирования виртуального изображения в системе ДР на основе волновода с размножением выходного зрачка	70

4.2 Параметры ДОЭ	72
4.3 Принцип формирования автостереоскопического 3D изображения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка	76
4.4 Увеличение поля зрения в системе ПД. Параметры МФЗВ	80
4.5 Параметры МФАИ	83
4.6 Параметры волновода с размножением выходного зрачка.	85
4.7 Параметры ДОЭ в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка	86
4.8 Параметры оптической системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка	89
4.9 Экспериментальная установка – формирование автостереоскопического 3D изображения.....	90
4.10 Экспериментальная установка – увеличение поля зрения в системе ПД ...	92
Выводы к главе 4.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	96
БЛАГОДАРНОСТИ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Изображающие системы представляют собой оптические устройства, формирующие изображения для наблюдателя. Одним из видов таких устройств являются системы дополненной реальности. Дополненная реальность (ДР) представляет собой наложение цифровой информации на изображение окружающей действительности. Обычно, цифровая информация 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. Такие устройства уже получили широкое применение в системах навигации, в военной и космической отраслях, в медицине, в строительстве. Зрительная система человеческого глаза весьма чувствительна к подобного рода цифровым изображениям. На данный момент 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 изображение и изображение окружающего мира. В зависимости от типа комбайнера, системы очков ДР делятся на три типа: с использованием волноводов (waveguides), с использованием призм 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 виртуальное изображение такого качества, чтобы оно соответствовало характеристикам зрительной системы человека. А именно, система должна иметь широкое поле зрения, большой выходной зрачок, разрешение, соответствующее разрешению глаза, высокую однородность и контрастность изображения. Всё это должно быть совмещено с малым весом и объемом системы – для комфорта использования.

Автомобильные ПД представляют собой биокулярные системы, формирующие виртуальное изображение для пользователя (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 проекционных дисплеев 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 и задачи исследований

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:

1. 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 работы

1. Для очков ДР на основе волновода впервые предложена оптическая система, формирующая виртуальное изображение в поле зрения 80x40 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 aberrаций 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 поперечных aberrаций, позволяющий формировать широкое поле зрения в системе очков ДР 60 градусов и размером выходного зрачка 10 мм.

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

Теоретические и практические результаты диссертационной работы были использованы в работах, проводимых в ООО «Исследовательский центр Самсунг» (см. Приложение), 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 научно-практической 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 $80^\circ \times 40^\circ$.

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 автостереоскопических 3D изображений, 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 обеспечения 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 автором выполнены необходимые расчеты с использованием 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:

1. «SPIE Photonic Europe 2020», Kalinina A.A., Putilin A.N. Wide-field-of-view augmented reality eyeglasses using curved wedge waveguide;
2. «X международная конференция по фотонике и информационной оптике, МИФИ, 2021», Калинина А.А., Путилин А.Н., Клиновидные волноводы в изображающих устройствах;
3. «SPIE Photonics West 2022», 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;
4. «XI международная конференция по фотонике и информационной оптике, МИФИ, 2022», «Калинина А.А., Путилин А.Н., Оптическая система очков дополненной реальности на основе комбинации голограмм»;
5. «XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO 2022», Калинина А.А., Путилин А.Н., Копёнкин С.С., Осевая голограмма в системе дополненной реальности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

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

Ж1. 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. – №29. – С.36287-36301. [<https://doi.org/10.1364/OE.439855>]

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

Ж3. Калинина А., Путилин А., Копенкин С. Применение осевых голографических оптических элементов в системе дополненной реальности // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – №45(8). – С.3-13.

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. – №11350. – С.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. – №12024 – С.0D. [<https://doi.org/10.1117/12.2608610>]

Патенты:

П1. 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 RU2760473С1 РФ / Морозов А.В., Янусик И.В., Калинина А.А., Ли ДжинХо – 2020.

П.2 Устройство отображения информации с помощью объемных голограмм: патент RU2794409С1 РФ / Калинина А.А., Путилин А.Н. – 2022.

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.

Во ВВЕДЕНИИ дана краткая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулированы цели и задачи исследований.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ приводится обзор современных методов формирования виртуального изображения в устройствах дополненной реальности с использованием волноводных, дифракционных и голографических оптических элементов.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приводятся результаты исследований по разработке оптической системы очков ДР с использованием клиновидного волновода, позволяющего сформировать виртуальное изображение с угловым размером $80^\circ \times 40^\circ$ градусов.

ВО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приводятся результаты исследований по разработке оптической системы очков ДР с использованием комбинации осевого голографического оптических элемента и внеосевого направленного голографического диффузора для формирования виртуального изображения с полем зрения 60° и выходным зрачком системы 10мм

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приводятся результаты исследований по разработке способа увеличения поля зрения в проекционном дисплее на основе волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования автостереоскопического 3D изображения.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ И ВОЛНОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1 Оптические системы дополненной реальности

1.1.1 Возникновение устройств дополненной реальности

Оптическая система дополненной реальности (ДР) – это изображающая система, которая формирует виртуальное изображение, несущее любую информацию для пользователя, при этом не препятствует прохождению излучения от окружающего мира. Впервые такой вид устройства был предложен Иваном Сазерлендом в 1968 году [1] и получил название «нашлемный дисплей» (head-mounted display). В настоящее время, всё чаще используется термин «очки дополненной реальности», поскольку с развитием технологий в области микродисплеев, габариты громоздких шлемов ДР уменьшились до компактных очков ДР. Другой вид устройства ДР – проекционный дисплей (ПД) (head-up display), который отображает цифровую информацию, через комбайнер, чаще всего представляющий собой лобовое стекло транспортного средства. Концептуальные решения такого типа устройств впервые стали использоваться в военной авиации во время второй мировой войны – виртуальное изображение представляло собой статичное изображение в виде прицела, которое помогало пилоту быстро выполнять наводку на цель поражения. Позже, в 1961 году компания BAE Systems начала производство проекционных дисплеев для военной авиации с использованием цифрового источника изображения [2]. В настоящее время, системы ПД получили широкое применение в транспортных средствах различного вида, в военной и космической отраслях, а также в автомобильной промышленности.

Основным элементом в устройствах ДР является комбайнер – оптический элемент, который вводит излучение от цифрового носителя в зрачок пользователя, при этом не препятствует наблюдению изображения окружающей действительности. При использовании устройств ДР пользователь видит

цифровую информацию (виртуальное изображение), накладываемую на изображение окружающего мира. В зависимости от области применения устройства ДР, система может: формировать виртуальное изображение на бесконечности, на конечном расстоянии или на различных расстояниях одновременно; формировать 2D или 3D изображение; быть монохроматической или полихроматической.

Оптические комбайнеры условно делятся на три большие группы: на основе волноводов; на основе призм свободной формы; на основе отражающих элементов. Каждый из видов комбайнеров обладает рядом преимуществ и недостатков, которые влияют на их интеграцию в устройства ДР. Далее будут рассмотрены все три типа комбайнеров и их характеристики в отношении очков ДР и ПД.

1.1.2 Параметры устройств ДР

Изображающая система ДР характеризуется основными параметрами: угловое поле зрения, размер выходного зрачка, разрешение, яркость и однородность виртуального изображения, объем и вес системы. Для обеспечения полного погружения пользователя в «дополненную реальность», человеческий глаз не должен отличать цифровое изображение от изображения окружающего мира. Это значит, что система ДР должна сформировать изображение такого качества, чтобы оно соответствовало оптическим характеристикам зрительной системы человека. Наиболее важным и чувствительным к восприятию оптическим параметром является разрешение. Человеческий глаз обладает разрешением в 1 угловую минуту, а это значит, что устройство ДР должно обеспечивать разрешение 60 пикселей/° [3]. Поле зрения человеческого глаза составляет 60° внутрь и 105° наружу (для зеленого цвета). Поэтому проводимые исследования направлены на достижение такого же поля зрения для устройств ДР. Диаметр зрачка глаза варьируется в пределах от 2 до 8 мм [3] в зависимости от освещенности, при этом глазное яблоко диаметром 22 мм может вращаться в пределах $\pm 45^\circ$ в горизонтальном направлении [4] вокруг центра вращения, расположенного в 15.3 мм от роговицы [5]. Чтобы обеспечить наблюдение виртуального изображения при

любом положении глаза и любой освещенности, выходной зрачок устройства ДР должен составлять более 30 мм. На практике же, для комфортного использования очков достаточно, чтобы выходной зрачок был диаметром ≥ 10 мм. Стоит отметить, что при описании устройств очков ДР, термин «выходной зрачок» связан с ограничением световых пучков, как в системе «лупа-глаз» [6], где выходным зрачком и одновременно апертурной диафрагмой является зрачок глаза человека. Выходной зрачок в системе ДР представляет собой область, в пределах которой виртуальное изображение не виньетировано и пользователь видит его в полном поле зрения. Другим важным параметром является вертексное расстояние (eye relief) – это расстояние от роговицы глаза до ближайшего оптического элемента. Величина вертексного расстояния определяется, исходя из назначения и габаритов устройства, для очков ДР вертексное расстояние обычно составляет более 15 мм. Яркость изображения в очках дополненной реальности должна быть порядка ~ 300 нит, для наблюдения изображения в солнечную погоду, а для проекционных дисплеев виртуальное изображение должно обладать яркостью более 10 000 нит. И, конечно, важными конструктивными параметрами являются вес и объем системы, поскольку пользователь должен иметь возможность сколько угодно долго носить очки ДР и не испытывать чувство тяжести на ушных раковинах, переносице или на голове. А в случае ПД – устройство необходимо сделать компактным для возможной интеграции в различные транспортные средства.

В случае проекционных дисплеев – основные задачи связаны с разработкой методов увеличения поля зрения в системах ПД и способов формирования 3D изображения. Увеличение поля зрения влечет к увеличению объема устройства [7], а формирование 3D изображения снижает разрешение виртуального изображения при текущих параметрах и габаритах устройства. Поэтому, исследования направлены на совмещение требуемых выходных оптических характеристик с компактностью устройства для возможности интеграции в различные транспортные средства.

1.2 Оптические системы очков ДР

Системы очков дополненной реальности принято делить на три группы в зависимости от типа используемого комбайнера [8]: системы на основе волноводов (рис.1, а) [9], системы на основе призм свободной формы [10], работающих по принципу полного внутреннего отражения (ПВО) (рис.1, б) и системы на основе полупрозрачного зеркала (рис.1, в) [11]. Однако, следует выделить еще один тип систем ДР – на основе голографического оптического элемента [12]. Такие системы обладают рядом преимуществ, о которых будет подробно изложено дальше. Каждая система очков ДР включает в себя источник изображения (дисплей), систему подсветки, проекционную оптику и сам комбайнер. В качестве источника изображения могут использоваться различные типы дисплеев, например LCOS, OLED, uLED и фазовые модуляторы SLM, а также сканирующие лазерные проекторы на основе MEMS зеркал.

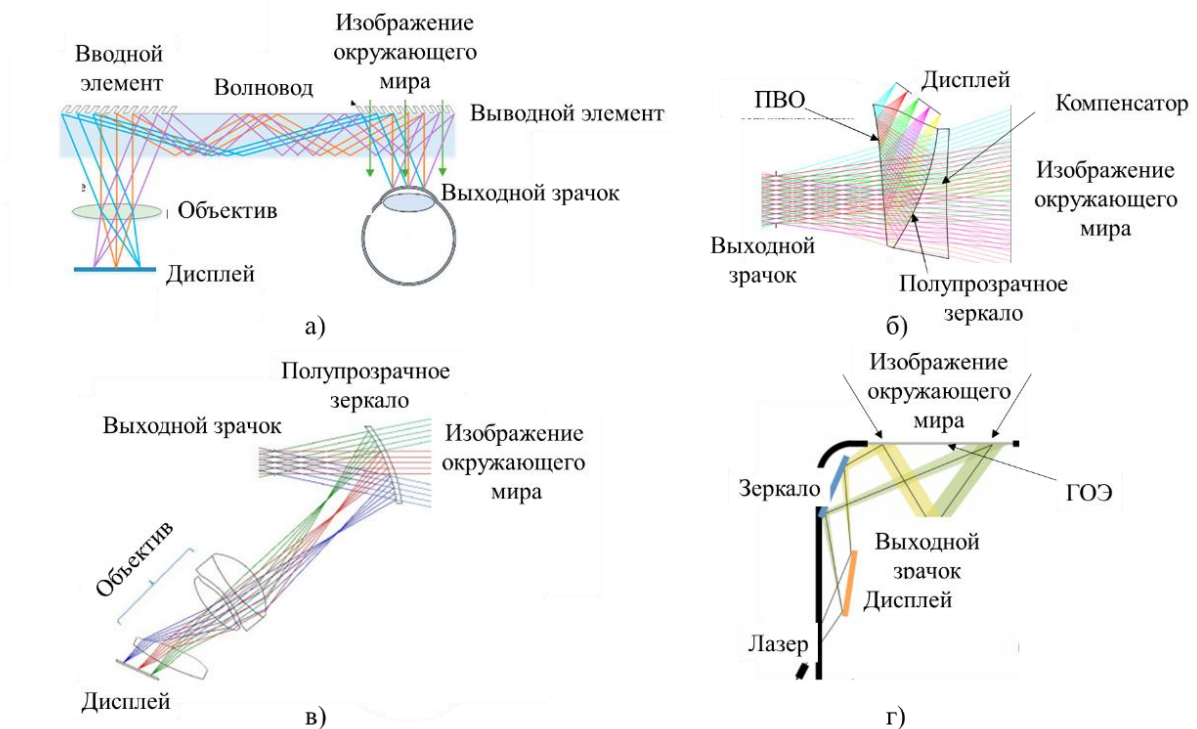


Рис. 1. Основные типы схем очков дополненной реальности: а) на основе волноводов [9]; б) на основе призмы свободной формы [10]; в) на основе полупрозрачного зеркала [11]; г) на основе голографического оптического элемента [12].

1.2.1 Системы на основе волноводных оптических элементов

Очки ДР с использованием волноводов работают по принципу перископов. Проекционная система формирует угловое изображение, которое вводится в волновод с помощью зеркальных (рис.2, а), дифракционных (рис.2, б) или голографических оптических элементов (рис.2, в). 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. Поскольку формируемый проекционной системой выходной зрачок имеет довольно малый размер $\sim 5-10$ мм, а толщина волновода составляет $\sim 2-4$ мм, то для вывода излучения всех угловых направлений и формирования широкого выходного зрачка излучение выводится из волновода не за один раз, а за несколько (рис.2), таким образом происходит размножение выходного зрачка. Такие схемы с размножением выходного зрачка формируют большой выходной зрачок и обладают высокой степенью компактности. Главным недостатком этой системы является ограничение по углу поля зрения системы.

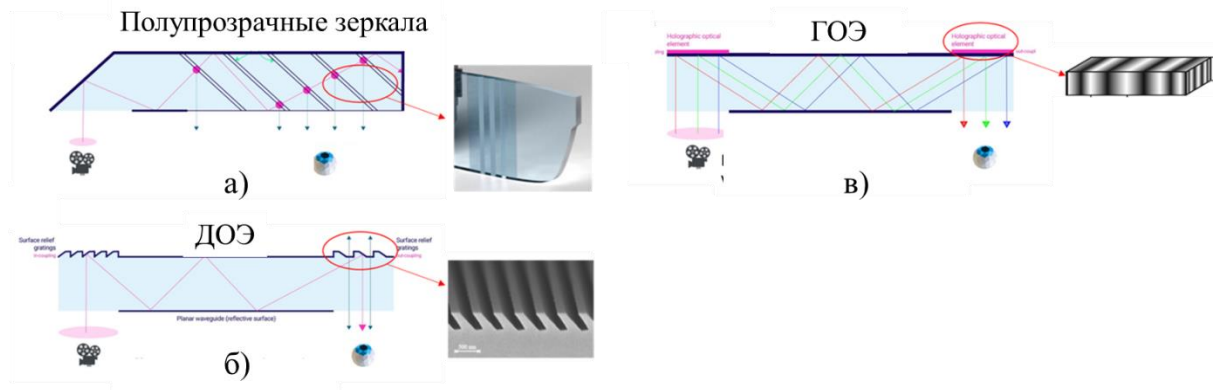


Рис. 2. Варианты ввода излучения в волновод и его вывода с помощью а) зеркальных, б) дифракционных или с) голографических оптических элементов. (изображение заимствовано с сайта:[13])

Поле зрения в системах с использованием волноводов ограничено геометрическими параметрами волновода (толщина, длина) и значением показателя преломления его материала n . Минимальный угол (или критический

угол), при котором излучение может распространяться внутри волновода в условиях ПВО, определяется формулой [14]:

$$\theta_{ПВО} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right). \quad (1.1)$$

При этом максимальный угол θ_{max} распространения излучения определяется длиной d и толщиной t волновода, из геометрических соображений:

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{d}{t}. \quad (1.2)$$

Таким образом теоретически достижимое поле зрения, которое волновод способен пропустить определяется выражением:

$$FOV = \theta_{max} - \theta_{ПВО} = \tan^{-1}\left(\frac{d}{t}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right), \quad (1.3)$$

Однако, обычно, максимальный угол выбирают не более 70° (рис.3, а), чтобы обеспечить равномерный вывод излучения для всех угловых направлений. Поле зрения системы на основе волновода может быть увеличено за счет увеличения показателя преломления подложки. Однако, как видно из графика на рис.3 (б), его величина все равно не будет превышать 40° .

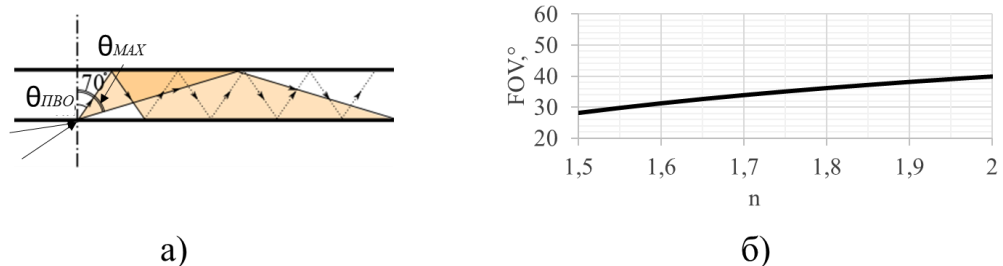


Рис. 3. Ограничение поля зрения в системах ДР с использованием волноводов: а) распространение излучение внутри волновода; б) зависимость поля зрения от показателя преломления подложки.

Благодаря компактности и большому выходному зрачку, волноводные системы уже получили широкое распространение на рынке устройств ДР и используются в продуктах многих компаний: Microsoft [15], Magic Leap [16], Digilens [17], Vuzix [18], Lumus [19] и др. Подробный анализ существующих решений для систем дополненной реальности с использованием волноводов

представлен в монографии [20]. В работе [21] показано, что изогнутый волновод способен обеспечивать более широкое поле зрения системы, чем планарный. Однако, кривизна волновода влияет на однородность и параллельность пучков при распространении внутри волновода. Таким образом, в системе возникают aberrации, которые необходимо скомпенсировать, например, путем модификации вводящего дифракционного элемента [22].

1.2.2 Системы на основе призм свободной формы

Поверхностью свободной формы (freeform) называют нерегулярную поверхность, не обладающую симметрией вращения [23]. Для описания такой поверхности не существует универсального уравнения, однако чаще всего используются полиномы Цернике или X-Y полиномы, которые, будучи математическими функциями, соотносятся с формами aberrаций волнового фронта и могут быть использованы для коррекции конкретных видов aberrаций. Использование оптических поверхностей свободной формы, позволяет сократить количество элементов в оптической системе, уменьшить ее габариты, вес, а также эффективно компенсировать aberrации, повышая качество изображения. Системы ДР с использованием призм свободной формы (рис.1, б) обладают такими преимуществами, как высокое качество изображения (высокое разрешение, яркость, однородность), приемлемое соотношение поля зрения и выходного зрачка. Однако, большая степень свободы поверхностей свободной формы вызывает сложности при изготовлении и контроле таких поверхностей. Поскольку призма является внеосевым элементом и обладает неравномерной оптической силой для различных угловых направлений, она искажает изображение окружающего мира, поэтому система дополняется оптическим компенсатором, расположенным с внешней стороны призмы. Призмы свободной формы не получили широкого воплощения в устройствах ДР. Одним из примеров реализации устройства ДР на основе призмы свободной формы является Lenovo Daystar AR [24].

1.2.3 Системы на основе полупрозрачного зеркала

Системы на основе полупрозрачных зеркал можно разделить на осевые и внеосевые схемы. В осевых схемах для переноса изображения от дисплея используется полупрозрачное сферическое зеркало [25-26]. Дисплей расположен в фокальной плоскости полупрозрачного сферического зеркала. Излучение от дисплея отражается от поляризационной светоделительной пластинки и затем проходя через четвертьволновую пластину, отражается от зеркала. Таким образом параллельные пучки с ортогональной поляризацией образуют выходной зрачок системы и формируют виртуальное изображение на бесконечности. Очки Google Glass [26] работают по принципу осевой схемы (рис.4, а). Такие решения обеспечивают в устройствах ДР поле зрения порядка 30° , однако выходной зрачок и вертексное расстояния ограничены.

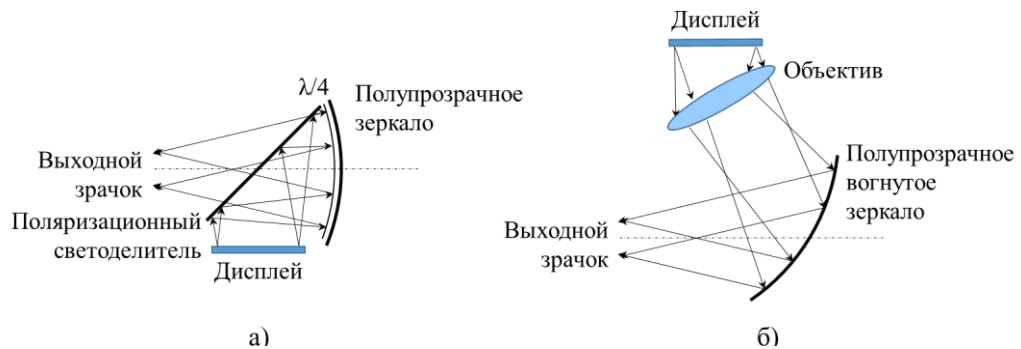


Рис.4. Схемы очков ДР на основе полупрозрачного зеркала: а) осевая схема; б) внеосевая схема.

Внеосевые системы (рис.4, б) имеют более удачную эргономику, обладают широким выходным зрачком, большим вертексным расстоянием [27] и формируют изображение в более широком поле зрения – порядка 50° [28]. Однако, внеосевое зеркало порождает высокие aberrации в системе, которые компенсируются использованием внеосевых, децентрированных, ассиметричных объективов [29]. Такие оптические элементы вызывают большие сложности при производстве, контроле и дальнейшей юстировке очков ДР.

Схемы на основе полупрозрачных зеркал обладают рядом преимуществ, в числе которых отсутствие хроматических aberrаций, приемлемое соотношение поля зрения и выходного зрачка, высокое качество изображения. Однако, чем

больше поле зрения системы – тем большими поперечными размерами обладает зеркало, поэтому использование таких систем в повседневных устройствах ДР ограничено. Системы получаются громоздкими из-за больших поперечных размеров зеркала [30-31]. Из-за особенностей эргономики, полупрозрачные комбайнеры чаще используются в специализированных областях, например, в очках ДР для велосипедистов [32].

1.2.4 Системы на основе голографических оптических элементов

Голографический оптический элемент (ГОЭ) – это голограмма, интерференционная картина которой представляет собой объемную дифракционную решетку, сформированную в регистрирующей среде достаточной толщины [33]. Формирование интерференционной картины возникает в результате взаимодействия «опорной» и «объектной» когерентных волн в толще регистрирующей среды. При освещении ГОЭ волной, конфигурация которой совпадает с «опорной» волной, конфигурация дифрагированной волны в точности совпадает с «объектной» волной записи. Процесс освещения ГОЭ также называют «восстановлением ГОЭ». Такой тип голограмм еще называют Брэгговскими решетками, поскольку отклик излучения, возникающий на объемной дифракционной решетке, описывается так же, как и дифракция рентгеновского излучения на кристалле, условия которой описаны У.Л. Брэггом, У.Г. Брэггом и Г.В. Вульфом [34, 35]. В отличие от «тонких» голограмм, дифракционная структура которых плоская, объемные ГОЭ обладают селективностью по углу и по длине волны. ГОЭ могут быть просветные и отражательные, осевые и внеосевые, Если ГОЭ сформирован сферическими волнами, то положения перетяжек сферических волн называются конструктивными точками записи ГОЭ. ГОЭ привлекают широкий интерес, поскольку функция любого оптического элемента, например, линзы, зеркала, призмы, диффузора, спектрального фильтра или поляризатора может быть представлена в виде плоского элемента ГОЭ.

ГОЭ являются наиболее перспективными элементами для интеграции в очки ДР. Чаще всего, в качестве регистрирующего материала используются

фотополимеры – тонкие светочувствительные пленки, которые наклеиваются на стеклянную подложку. Полученные в фотополимере ГОЭ обладают высоким коэффициентом пропускания для видимого спектрального диапазона – более 80%, высокой спектральной и угловой селективностью, дифракционная эффективность объемных голограмм достигает 100% [36]. При этом регистрирующий материал для записи голограмм стоит во много раз дешевле, чем производство любого оптического элемента, а замена массивных оптических элементов тонкой пленкой голограммы в разы уменьшает вес и размер устройства. В системах ДР комбайнеры на основе ГОЭ чаще всего получены в виде внеосевого сферического зеркала (рис.5, а).

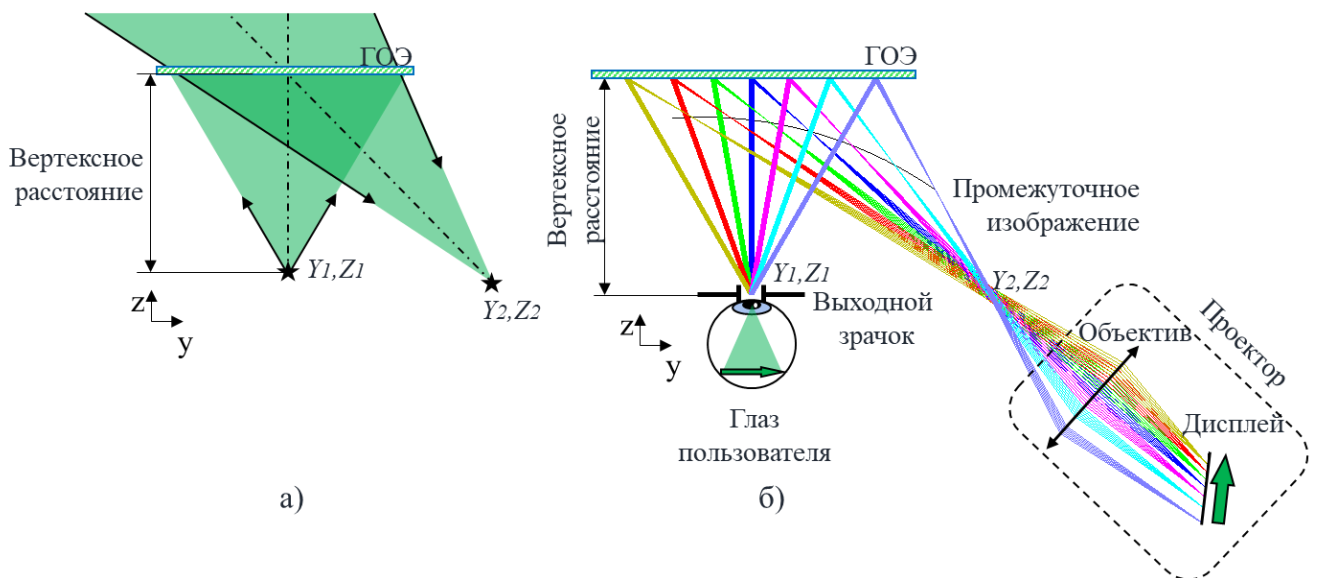


Рис. 5. Схема работы внеосевого ГОЭ в очках ДР: а) формирование внеосевого ГОЭ сферическими волнами – схема «из точки в точку»; б) формирование виртуального изображения с помощью ГОЭ в изображающей системе очков ДР.

Внеосевые ГОЭ представляют собой объемные фазовые отражательные голограммы. Формирование такого ГОЭ происходит с помощью двух сферических волн из точки в точку. Для внеосевого ГОЭ, конструктивная точка опорной расходящейся волны определяется точкой Y_1, Z_1 и ее положение соответствует положению выходного зрачка очков ДР (рис.5, а). Конструктивная точка объектной сходящейся волны находится вне поля зрения глаза и характеризуется точкой Y_2, Z_2 и ее положение определяется эргономикой устройства (расположением дисплея, оптических элементов проекционной системы). Сформированный по такой схеме

ГОЭ обладает промежуточным изображением – плоскостью, в которой фокусируются пучки, при освещении ГОЭ параллельными пучками из положения выходного зрачка (Y_l, Z_l) (рис.5, б). В изображающей системе очков ДР формирование изображения дополненной реальности происходит следующим образом: проектор формирует пространственное изображение, положение и форма которого соответствует промежуточному изображению ГОЭ. Тогда расходящиеся из этой плоскости изображающие сферические пучки дифрагируют на периодической структуре ГОЭ и преобразуются в параллельные, заполняя выходной зрачок системы (рис.5, б). Параллельные пучки, попадая в глаз пользователя, создают изображение на сетчатке.

Системы на основе внеосевых ГОЭ формируют виртуальное изображение в широком поле зрения $\sim 90^\circ$ [37], что не может быть достигнуто ни в одном из других типов очков ДР. Способ переноса и формирования изображения на сетчатке, показанный на рис.5, б называется “Maxwellian-view display” [38]. Особенностью данного способа является то, что виртуальное изображение формируется сразу на всех дистанциях от пользователя, независимо от миопии (дефекта зрения) [37-41]. Это происходит потому, что изображающие пучки имеют узкий диаметр пучка, который практически не преломляется на оптических поверхностях глаза. Таким образом, куда бы не был аккомодирован глаз, т.е. где бы не располагался реальный объект, пользователь всегда будет видеть резкое виртуальное изображение. Недостатком такой системы является очень маленький выходной зрачок – не более 1 мм (зрачок глаза варьируется от 2 мм до 8 мм) [3]. Это значит, что повороте глаз вправо, влево, вверх и вниз – виртуальное изображение будет виньетироваться. Поэтому, несмотря на преимущества данных систем, выраженных в виде широкого поля зрения, высокой энергетической эффективности устройства, а также формирования виртуального изображения на всех дистанциях сразу, системы на основе ГОЭ до сих пор не интегрированы в устройства дополненной реальности из-за маленького выходного зрачка, ограничения которого вызывают зрительный дискомфорт. Но из-за высокого потенциала, разработкой систем на основе ГОЭ занимаются множество

исследовательских групп, например, Apple [42], Samsung [37], Bosch [43], Microsoft [44] и другие.

Существуют подходы для увеличения выходного зрачка в системах на основе ГОЭ. Например, в работе [45] представлена схема очков ДР на основе внеосевого ГОЭ, в которой подсветка является динамичной. При сдвиге точки Y_2, Z_2 (рис.5, а) вдоль оси Z при восстановлении ГОЭ волнового фронта, выходной зрачок смещается вдоль оси Y . Данная схема дополнена системой слежения за зрачком (eye tracking), которая позволяет смещать выходной зрачок системы в соответствии с положением зрачка глаза. Суммарная величина динамического выходного зрачка достигает 9 мм. Другой способ увеличения выходного зрачка основан на разбиении ГОЭ на несколько дискретных ГОЭ, при этом каждый элементарный ГОЭ формирует выходной зрачок в разных позициях вдоль оси Y [46]. Таким образом суммарный выходной зрачок расширен, однако авторы не указывают актуальных размеров полного выходного зрачка. В работе [47] представлена схема расширения выходного зрачка путем дополнения системы волноводом с размножением выходного зрачка. В этом случае позади ГОЭ располагается волновод с дифракционным оптическим элементом. В результате этого, та часть излучения, которая не дифрагирует в результате взаимодействия с периодической структурой ГОЭ, а именно «0» порядок дифракции, попадает в волновод, где дифрагирует на периодической структуре дифракционного оптического элемента волновода и перенаправляется в область выходного зрачка системы. Таким образом удается увеличить выходной зрачок до 10 мм. В работе [48] показан метод увеличения выходного зрачка в схеме с внеосевым ГОЭ за счет использования сразу двух ГОЭ, расположенных по обеим сторонам подложки. В данном случае выходной зрачок удастся увеличить до 7.5 мм. Все представленные решения существенно усложняют систему (метод подсветки, метод формирования ГОЭ), а некоторые увеличивают габариты системы. Так или иначе, оптимальный метод адаптации ГОЭ к очкам ДР все еще не найден.

1.3 Оптические системы проекционных дисплеев дополненной реальности

Проекционные дисплеи можно условно разделить на три большие группы в зависимости от способа формирования виртуального изображения: стандартные системы на основе зеркал (рис.6, а), системы на основе волноводов (рис.6, б), голографические проекционные дисплеи (рис.6, в). Любая система включает себя модуль генерации изображения, который содержит источник изображения (дисплей), осветительную систему дисплея, а также может быть дополнен проекционной оптикой. В различных системах ПД используются разные источники изображения. К примеру, в схемах на основе зеркал чаще всего используются просветные TFT LCD дисплеи, в схемах с использованием волноводов используются LCOS, uLED, OLED дисплеи, а в схемах с использованием ГОЭ могут использоваться лазерные проекторы.

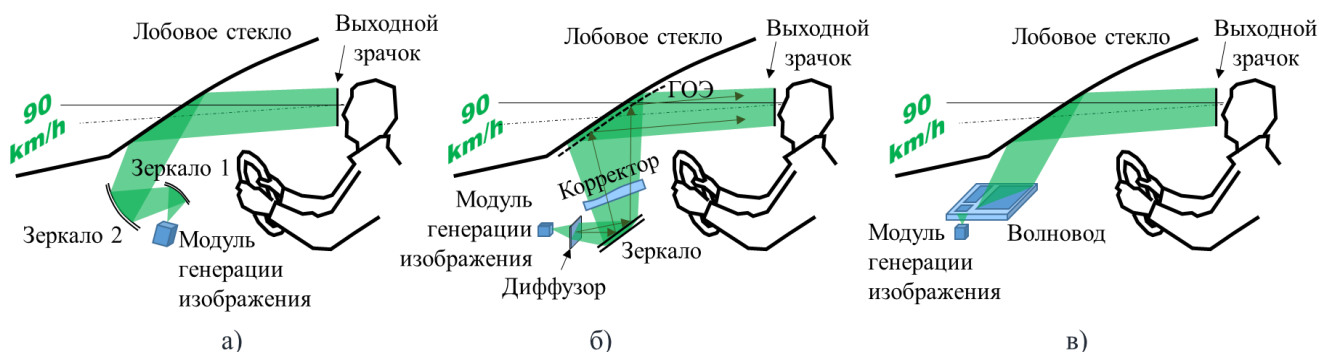


Рис.6 Схемы проекционных дисплеев дополненной реальности: а) на основе зеркал; б) на основе волновода; в) на основе ГОЭ.

В зависимости от назначения и используемой технологии, ПД формируют изображение на конечном расстоянии от пользователя, или на бесконечности. При этом важно, чтобы виртуальное изображение накладывалось на изображение дорожного полотна, поэтому излучение направляется оптической системой в выходной зрачок под некоторым углом к линии горизонта (look down angle). Изображающая система формирует выходной зрачок $\sim 120 \times 60$ мм и обеспечивает яркость виртуального изображения $\sim 10\,000$ нит (для пользователей, не использующих поляризационные солнцезащитные очки). В то же время система не

должна вызывать паразитную засветку, возникающую при отражении солнечного излучения от оптических поверхностей системы и попадающую в выходной зрачок ПД (чтобы не ослепить водителя), а также иметь конфигурацию, при которой солнечное излучение не фокусируется на дисплее и не вызывает его перегрев и воспламенение. Примеры спецификаций ПД для различных автомобилей приведены в работе [49]. Главным направлением развития систем ПД является увеличение поля зрения, что несомненно влияет как на объем устройства, так и на потребляемую устройством мощность, паразитную засветку, перегрев дисплея.

1.3.1 Системы ПД на основе зеркал

В системах ПД на основе зеркал виртуальное изображение формируется путем переноса изображения с помощью проекционной системы, образованной системой зеркал в совокупности с лобовым стеклом [50]. Изображение от модуля генерации изображения отражается от Зеркала 1, затем от Зеркала 2, после чего отражается от лобового стекла (френелевское отражение) и заполняет выходной зрачок, формируя виртуальное изображение (рис.6, а). В системах с небольшим полем зрения ($\sim 5^\circ \times 2^\circ$) может использоваться только одно зеркало. При поле зрения системы более $7^\circ \times 3^\circ$ чаще используются схемы с двумя зеркалами. Поскольку лобовое стекло обладает сложной несимметричной формой, а расположение зеркал в системе зависит от выделенного для ПД объема внутри автомобиля, для компенсации возникающих аберраций используют зеркала свободной формы, описываемые полиномами Цернике, или X-Y полиномами. Данные системы позволяют скомпенсировать аберрации и достичь высокого качества изображения, получить достаточную яркость. Также, данные системы могут быть дополнены элементами для формирования 3D изображения [51]. Однако, из-за больших поперечных размеров зеркал, схема является громоздкой. ПД располагаются в транспортных средствах под приборной панелью, где также находятся поперечная балка автомобиля, элементы рулевого управления, проходят провода электропитания, соответственно объем для интеграции проекционного дисплея сильно ограничен. При увеличении поля зрения в системе возрастает поперечный

размер зеркал, что приводит к увеличению объема устройства, к увеличению солнечной нагрузки на дисплей, а также к высокому риску возникновения паразитных засветок. Также, чем больше поле зрения системы, тем большую мощность подсветки необходимо использовать в модуле генерации изображения. Авторами [52] была предложена технология устранения солнечной засветки путем использования поляризаторов в схеме, а также путем нанесения двух типов покрытий на зеркала: одно устраняет ультрафиолетовую часть спектра, другое – инфракрасную. Таким образом солнечная нагрузка на дисплей может быть снижена в 20 раз.

1.3.2 Системы ПД на основе волноводов

Системы с использованием волноводов еще не получили большого распространения в индустрии ПД, однако обладают высоким потенциалом (рис.6, б). Такие системы, по меркам ПД, способны обеспечить широкое поле зрения - порядка $20^\circ \times 10^\circ$ [53] при малом объеме устройства (<7 литров). При этом в схемах с использованием волноводов практически полностью решается проблема солнечной нагрузки на дисплей, поскольку в схеме отсутствуют зеркала, вызывающие концентрацию излучения высокой плотности на дисплее. Однако, в данных системах существует большой риск возникновения паразитных засветок в области выходного зрачка устройства из-за отражения солнечного излучения от поверхности волновода и лобового стекла. Системы ПД с использованием волноводов формируют виртуальное изображение на бесконечности, в то время как для ПД чаще требуется формирование изображения на расстоянии 3-6 м от пользователя. Другим недостатком системы является сложность в формировании 3D изображения. Одним из способов формирования 3D изображений в таких системах является использование компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ(СГН)), формируемых на фазовом модуляторе, выступающего в качестве источника изображения [54], однако формирование видеоряда фазовых изображений требует больших вычислительных мощностей, а также использования дополнительных систем для компенсации фазовой задержки,

возникающей в случае использования таких модуляторов в волноводах, поэтому пока данная технология не получила широкого распространения.

1.3.3 Системы ПД на основе голографических оптических элементов

Голографические проекционные дисплеи позволяют сформировать виртуальное изображение в широком поле зрения. В данной схеме ГОЭ интегрируется прямо в лобовое стекло, что позволяет использовать большую площадь поверхности голограммы для формирования изображения в широком поле зрения [55]. Модуль генерации изображения формирует пространственное изображение в плоскости направленного диффузора, который выполняет функцию вторичного источника изображения. Излучение от диффузора отражается от зеркала и проходит через корректор, который вносит искажения в волновой фронт. Далее излучение дифрагирует на поверхности ГОЭ и перенаправляется в область выходного зрачка, формируя виртуальное изображение. Данная система является компактной и энергетически эффективной, а также формирует изображение в широком поле зрения. Однако, интеграция ГОЭ в лобовое стекло – сложная технологическая задача, которая требует создания особой технологии изготовления лобового стекла для каждой модели транспортного средства и внедрения ГОЭ. Технологические сложности на текущий момент ограничивают интеграцию голографических систем в автомобили, однако данная схема является наиболее перспективной с точки зрения таких выходных характеристик, как поле зрения, разрешение, размер выходного зрачка, яркость, объем устройства.

1.3.4 Способы формирования 3D изображения в проекционных дисплеях

Особенностью устройств ПД, применяемых в ТС, является формирование виртуального изображения не на бесконечности, а на конечном расстоянии. Виртуальное изображение накладывается на плоскость дорожного покрытия, таким образом водителю не требуется перефокусироваться между реальными и виртуальными объектами для отслеживания цифровой информации. Для формирования виртуального изображения на различных от пользователя

дистанциях применяются мульти-фокальные и вари-фокальные решения [56-58]. Для создания 3D изображения используются автостереоскопические методы, а также лайт-филд (light-field) технологии с использованием линзовых растров [59-61]. При автостереоскопическом методе система формирует две зоны видения – для правого и левого глаза. В пределах каждой зоны видения виртуальное изображение отличается, согласно диспаратности бинокулярного зрения (изображение объекта, формируемое оптическими системами левого и правого глаз, отличается благодаря тому, что глаза расположены на расстоянии друг от друга). Именно благодаря диспаратности, зрительная система человека позволяет чувствовать объем окружающих объектов и определять расстояние до них. Формируемые виртуальные изображения также называются «ракурсными», поскольку изображение объекта зависит от ракурса, с которого наблюдается объект. В этом случае пользователь наблюдает псевдо 3D изображение. При лайт-филд технологии формируется сразу множество зон видения, при этом в каждой зоне видения изображение соответствует определенному ракурсу отображаемого 3D объекта. Такие системы необходимо дополнять системами слежения за глазами для расчета и вывода нужных ракурсов изображения, в зависимости от направления взгляда пользователя. Как было отмечено ранее, другим способом формирования 3D изображений является использование КСГ. КСГ формируются посредством создания фазового профиля на структурах пространственного фазового модулятора (ПФМ (SLM)). Распределение фазы на ПФМ соответствует распределению фазы 3D объекта, который может находиться на любом расстоянии от пользователя. При наблюдении виртуального изображения, сформированного с использованием КСГ, пользователь наблюдает 3D изображение, при этом в данном случае отсутствует конфликт конвергенции и аккомодации для зрительной системы человека. В работах [62-63] показаны примеры применения данной технологии в 3D дисплеях.

Описанные подходы в большинстве случаев применяются к системам на основе зеркал свободной формы, а это значит, что увеличение поля зрения системы будет способствовать увеличению объема устройства. Наиболее компактным решением для транспортных средств остается система с использованием

волновода. К примеру, в работе [64] представлены параметры и архитектура устройства, формирующего 2D изображение на бесконечном расстоянии от пользователя. Стоит отметить, что авторами не показана возможность формирования 3D изображения в ПД с использованием волновода.

Выводы к первой главе

1. Устройства дополненной реальности имеют множество конфигураций и реализаций, однако каждая технология имеет свои ограничения, препятствующие формированию виртуального изображения с высокими характеристиками, соответствующими параметрам зрительной системы человека.
2. Наиболее перспективными технологиями для формирования виртуальных изображений в устройствах ДР являются схемы с использованием волноводов и голографических оптических элементов. Тем не менее, качество виртуального изображения в данных системах ограничено.
3. Формируемые виртуальные изображения на данный момент не отличаются высоким качеством, что требует проведения дополнительных исследований для усовершенствования устройств дополненной реальности и их успешной интеграции в различные сферы применения.

Глава 2. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛИНОВИДНОГО, ИЗОГНУТОГО ВОЛНОВОДА

2.1 Влияние формы волновода на величину поля зрения

В оптических системах ДР с использованием техники размножения выходного зрачка используются планарные волноводы (рис.7, а). Параметры волновода и вводного/выводного элементов выбираются таким образом, чтобы весь введенный в волновод угловой спектр излучения был также выведен из него (рис.7, б).

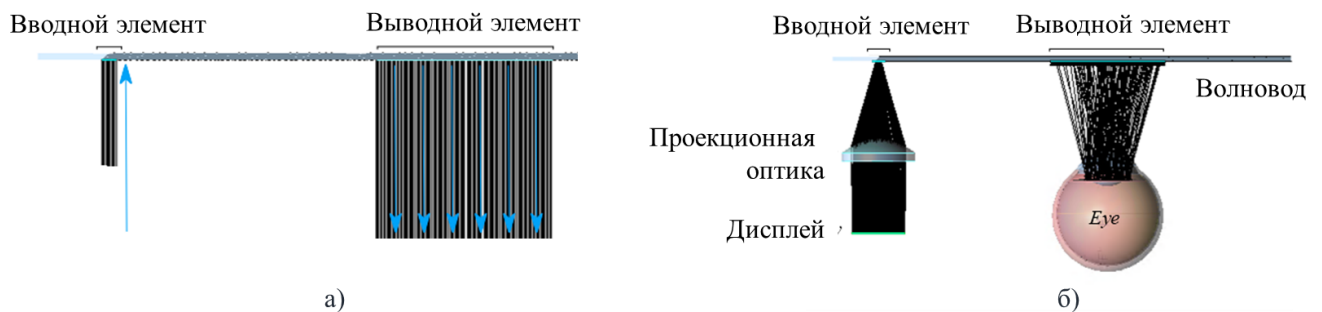


Рис. 7. Принцип работы системы ДР на основе волновода с размножением выходного зрачка: а) ход лучей через систему с размножением выходного зрачка; б) проекционная система формирует угловое изображение, поле зрения которого остается неизменным при выводе излучения из волновода.

При выборе проекционной оптики, ее параметры выбираются такими, чтобы излучение всего углового спектра формируемого изображения могло распространяться внутри волновода в условиях ПВО. Параметры вводного и выводного элементов выбираются таким образом, чтобы поле зрения на входе в волновод соответствовало полю зрения на выходе волновода. Угловое изображение, формируемое проекционной системой в пределах некоторого выходного зрачка, представляет собой набор параллельных пучков, где каждое угловое направление излучения соответствует одному пикселю дисплея. Вводной и выводной элементы волновода не имеют оптической силы и не влияют на плоскостность вводимых изображающих пучков. Величина поля зрения в данных системах ограничивается показателем преломления подложки, а также

геометрическими параметрами волновода согласно уравнению (1.3). Для увеличения поля зрения системы применяется два подхода – увеличение показателя преломления подложки или изменение формы волновода. Стекла с максимальным показателем преломления имеют значения меньше $n = 2$. Поэтому далее будут рассмотрены именно геометрические свойства волновода, способствующие увеличению поля зрения.

2.2 Волновод, образованный концентрическими поверхностями

Рассмотрим случай, когда подложка волновода образована концентрическими цилиндрическими поверхностями. Обозначим величину внешнего радиуса R , толщину волновода t , величину внутреннего радиуса $R-t$. Вычисление поля зрения, которое концентрический волновод может пропустить через себя, будет отличаться от случая планарного волновода из-за наличия радиусов кривизны у поверхностей. В данном случае удобнее воспользоваться $Q-U$ методом трассировки лучей [65].

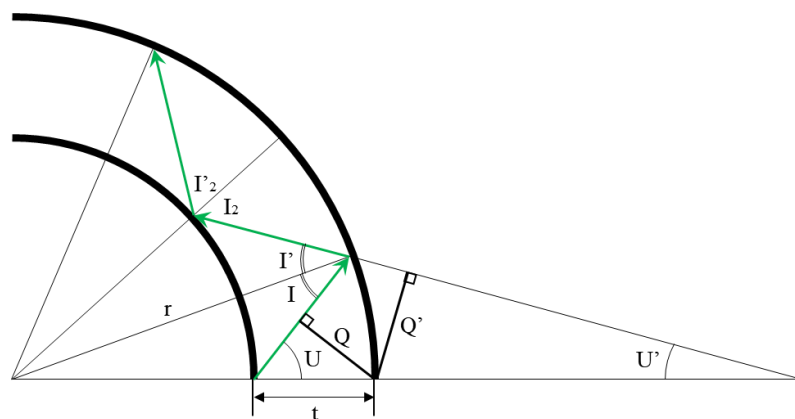


Рис. 8. Параметры $Q-U$ метода трассировки лучей в концентрическом волноводе.

В данном методе U – угол падения луча на поверхность, относительно оптической оси, Q – перпендикуляр, опущенный из вершины сферической поверхности до луча (Рис.8, а). Параметры Q и U связаны соотношением:

$$Q = t \cdot \sin U . \quad (2.1)$$

Угол между лучом и нормалью к сферической поверхности обозначается, как I и связан с параметрами Q и U соотношением:

$$\sin I = \frac{Q}{R} + \sin U = \frac{t \cdot \sin U}{R} + \sin U, \quad (2.2)$$

$$\sin I = \left(\frac{R+t}{R} \right) \sin U. \quad (2.3)$$

Согласно закону Снеллиуса:

$$n \sin I = -n' \sin I'. \quad (2.4)$$

Когда угол I меньше минимального угла ПВО, выполняется условие:

$$I = -I'. \quad (2.5)$$

Исходя из геометрии, новые параметры U' и I' связаны с U и I :

$$U' - I' = U - I. \quad (2.6)$$

Тогда, Q' рассчитывается, как:

$$Q' = R(\sin I' - \sin U') \quad (2.7)$$

Таким образом выполняется расчет угла падения и отражения от поверхности с радиусом R , при этом учитывается знак радиуса кривизны, а также направление, в котором определяется толщина. Далее вычисляется Q_2 :

$$Q_2 = Q' + t \sin U \quad (2.8)$$

и выполняется последовательный расчет, начиная с формулы 2.2.

Последовательный пример расчета, при исходных данных U , t , R представлен в *Таблице 1*. Угол U определялся как минимальный угол ПВО. В колонке I видно, что угол падения на поверхность с радиусом кривизны R имеет чередующиеся, повторяющиеся значения, что и соответствует распространению излучения в волноводе с концентрическими поверхностями. Излучение распространяется в волноводе, пока не достигнет выводного элемента.

Таблица 1. Трассировка луча в концентрическом волноводе

№	U	$\sin(U)$	t	Q	R	$\sin(I)$	I	n	I'	$\sin I'$	U'	$\sin U'$	Q'	Q_2
1	45.10	0.71	5.00	3.54	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-38.52	-0.62	3.73	6.84
2	-38.52	-0.62	-5.00	6.84	-80.00	-0.71	-45.10	1.50	45.10	0.71	51.68	0.78	6.10	10.02
3	51.68	0.78	5.00	10.02	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-31.94	-0.53	11.70	14.34
4	-31.94	-0.53	-5.00	14.34	-80.00	-0.71	-45.10	1.50	45.10	0.71	58.26	0.85	11.37	15.62
5	58.26	0.85	5.00	15.62	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-25.36	-0.43	20.25	22.40
6	-25.36	-0.43	-5.00	22.40	-80.00	-0.71	-45.10	1.50	45.10	0.71	64.83	0.91	15.74	20.27
7	64.83	0.91	5.00	20.27	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-18.79	-0.32	29.29	30.90
8	-18.79	-0.32	-5.00	30.90	-80.00	-0.71	-45.10	1.50	45.10	0.71	71.41	0.95	19.16	23.90
9	71.41	0.95	5.00	23.90	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-12.21	-0.21	38.69	39.75
10	-12.21	-0.21	-5.00	39.75	-80.00	-0.71	-45.10	1.50	45.10	0.71	77.99	0.98	21.58	26.47
11	77.99	0.98	5.00	26.47	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-5.63	-0.10	48.33	48.82

Для того, чтобы определить угловой спектр, пропускаемый концентрическим волноводом, необходимо вычислить максимальный и минимальный угол распространения излучения внутри волновода. Угол полного внутреннего отражения $U_{ПВО}$ определяет минимальный угол падения луча внутри волновода. Согласно условию полного внутреннего отражения (1.1), и уравнению (2.3), минимальный угол равен:

$$U_{\min} = \sin^{-1}\left(\frac{R}{n(R+t)}\right). \quad (2.9)$$

Максимальный угол U_{\max} равен $\pi/2$. Тогда максимально достижимый угловой спектр, распространяемый в цилиндрическом волновод с концентрическими поверхностями, определяется величиной:

$$FOV = U_{\max} - U_{\min} = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{R}{n(R+t)}\right) \quad (2.10)$$

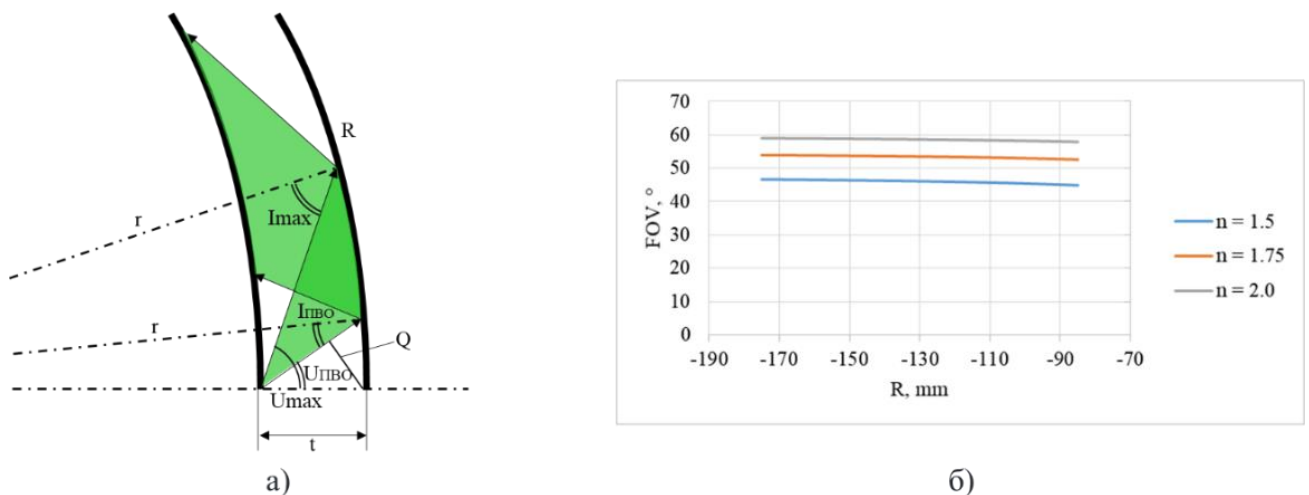


Рис. 9. Параметры концентрического изогнутого волновода: а) максимально достижимое поле зрения определяется углами U_{\max} и U_{\min} при использовании Q-U метода трассировки лучей; б) зависимость поля зрения системы от величины радиуса кривизны R концентрического волновода.

Как видно из графика, отображенного на рис.9 (б), поле зрения в системе с использованием волновода, образованного концентрическими поверхностями, может достигать 60° . Однако, при использовании концентрического волновода в схеме с размножением выходного зрачка возникают следующие эффекты. При вводе параллельного излучения в волновод излучение начинает фокусироваться

ввиду наличия оптической силы у поверхностей волновода (рис.10, а). Это нарушает плоскостность распространяемых изображающих пучков. Как следствие, излучение выводится из волновода неравномерно – при каждом взаимодействии с выводным элементом диаметр пучка меняется. Помимо этого, каждое взаимодействие излучения с выводным элементом, способствует формированию виртуального изображения на различных дистанциях, поэтому пользователь видит размытое и неоднородное виртуальное изображение (рис.10, б).

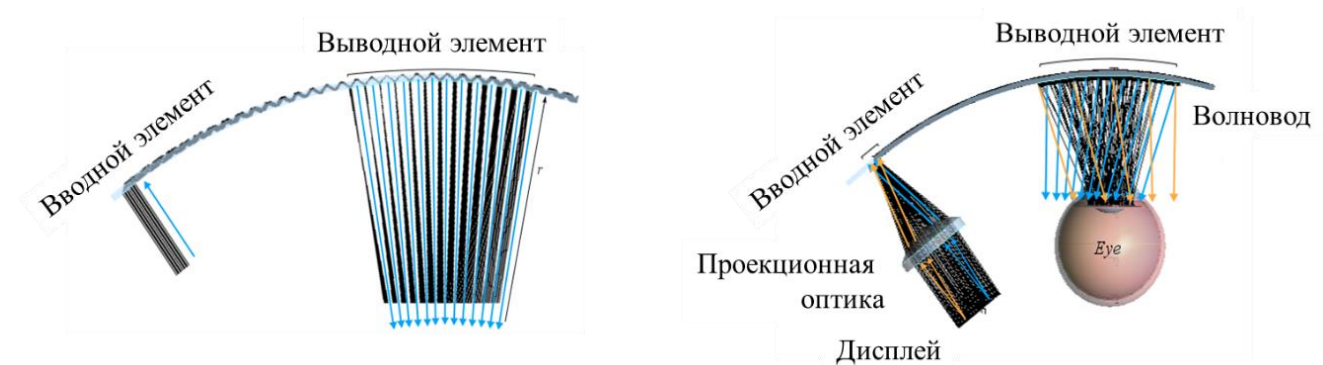


Рис.10. Схема на основе изогнутого концентрического волновода: а) ход лучей в концентрическом волноводе – излучение фокусируется внутри волновода и перестает быть однородным; б) при выводе излучения из волновода, виртуальное изображение имеет неоднородную структуру и искажения.

Другим эффектом является то, что кривизна подложки может вносить искажение при наблюдении изображения окружающего мира. Согласно стандартной формуле, оптическая сила определяется как:

$$\Phi = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n-1)^2 t}{nR_1 R_2} \quad (2.11)$$

Таким образом, если подложка волновода образована поверхностями с радиусами кривизны $R_1 = -80$ мм, $R_2 = -85$ мм при толщине $t = 5$ мм и показателе преломления $n = 1.5$, оптическая сила составит $\Phi = -0,25$ дптр в сагиттальной плоскости. Данный эффект необходимо учитывать при разработке изображающих систем на основе изогнутых волноводов.

2.3 Волновод, образованный неконцентрическими поверхностями

Волновод, образованный концентрическими поверхностями, может обеспечить более широкое поле зрения системы, чем система на основе планарного волновода [66]. Однако, необходимо рассмотреть случай, когда подложка волновода образована неконцентрическими поверхностями с радиусами кривизны R_1 и R_2 такими, что $|R_1/t \neq R_2/t|$. Данное условие вносит клин в волновод. Таким образом волновод не только изогнутый, но и клиновидный. Клиновидность влияет на распространение излучения в волноводе, и теперь углы падения I и отражения I' будут уменьшаться по мере распространения, т.е. будет выполняться условие:

$$I_{i+2} < I_i \quad (2.12)$$

После нескольких отражений, луч достигнет точки $A_i(r, \varphi_i)$, в которой условие полного внутреннего отражения будет нарушено, и луч будет выведен из системы – без использования выводных элементов (рис.11).

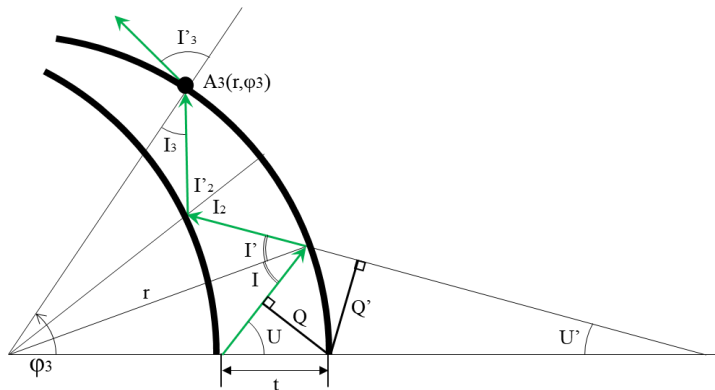


Рис. 11. Распространение излучение внутри волновода, образованного неконцентрическими поверхностями.

Внешний радиус волновода обозначен r . Положение точки $A_i(r, \varphi_i)$ соответствует лучу с углом ввода U_i и углом отражения I_i (рис.12, а). Тогда угол φ_i определяется, как:

$$\varphi_i = U_i - I_i, \quad (2.13)$$

где i – это номер взаимодействия с поверхностью волновода.

Поскольку при каждом взаимодействии с волноводом угол падения изменяется, в данной системе не может быть использована технология

размножения выходного зрачка. Однако, если изображение при вводе в волновод будет представлять собой набор параллельных пучков малого диаметра, варьируя форму волновода, можно добиться формирования пространственного изображения на внешней поверхности волновода. В этом случае выведенные из системы пучки могут быть перенаправлены в зрачок пользователя с помощью, к примеру, ГОЭ. Тогда, как видно из рис. 12, б, система сформирует изображение в широком поле зрения, величину которого можно вычислить, используя Q_U метод трассировки лучей.

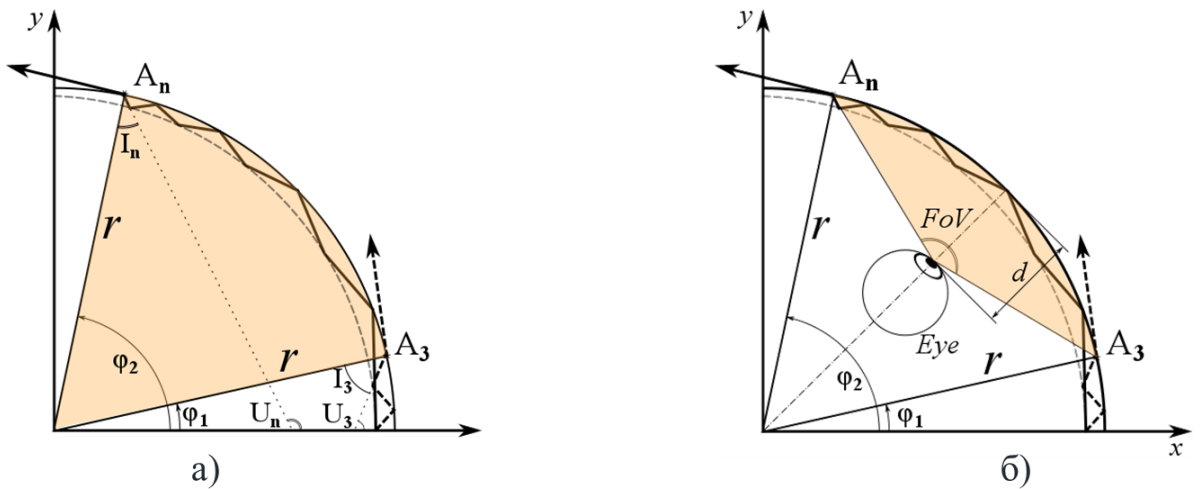


Рис.12. Параметры изогнутого клиновидного волновода: а) вывод излучения при достижении точки $A_i(r, \varphi_i)$, в которой нарушается условие полного внутреннего отражения; б) перенаправив выведенные из волновода пучки в плоскость зрачка, можно сформировать ультра широкое поле зрения в системе дополненной реальности.

Для вычисления теоретически достижимого поля зрения в системе на основе изогнутого, клиновидного волновода, воспользуемся Q_U методом трассировки лучей. Итак, поле зрения можно оценить относительно позиции выходного зрачка системы, как показано на рис.12, б. Тогда формула максимально достижимого поля зрения будет выглядеть следующим образом:

$$FOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{r}{d} \tan \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) \right). \quad (2.14)$$

Воспользуемся формулами (2.1) – (2.8) для трассировки лучей. При этом минимальный угол U_{min} вычисляется согласно формуле (2.9), а максимальный угол определим, как $U_{max} = \pi/2$. Условие ПВО определяется формулой:

$$I_{min} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right). \quad (2.15)$$

Соответственно, при условии $I_i < I_{min}$ – излучение выводится из волновода. Рассмотрим в качестве примера волновод, образованный поверхностями с радиусами кривизны $R_1 = -85$ мм, $R_2 = -85$ мм толщиной $t = 5$ мм. При $U = U_{min}$, расчет согласно формулам (2.1)-(2.8) представлен в *Таблице 2*:

Таблица 2. Трассировка луча с углом U_{min} в неконцентрическом волноводе

i	U	$\sin(U)$	t	Q	R	$\sin(I)$	I	n	I'	$\sin I'$	U'	$\sin U'$	Q'	$Q2$	I_{min}	ϕ
1	45.10	0.71	5.00	3.54	-85.00	0.67	41.81	1.50	-41.81	-0.67	-38.52	-0.62	3.73	6.84	41.81	3.29
2	-38.52	-0.62	-5.00	6.84	-85.00	-0.70	-44.69	1.50	44.69	0.70	50.86	0.78	6.15	10.03		6.17
3	50.86	0.78	5.00	10.03	-85.00	0.66	41.12	1.50	80.58	0.99						9.74

При вводе излучения в волновод с углом $U = U_{max} = \pi/2$, излучение проходит гораздо больше отражений, пока не нарушится условие ПВО:

Таблица 3. Трассировка луча с углом U_{max} в концентрическом волноводе

i	U	$\sin(U)$	t	Q	R	$\sin(I)$	I	n	I'	$\sin I'$	U'	$\sin U'$	Q'	$Q2$	I_{min}	ϕ
1	90.00	1.00	5.00	5.00	-85.00	0.94	70.25	1.50	-70.25	-0.94	-50.50	-0.77	14.41	18.27	41.81	19.75
2	-50.50	-0.77	-5.00	18.27	-85.00	-0.99	-80.60	1.50	80.60	0.99	110.70	0.94	-4.34	0.33		30.10
3	110.70	0.94	5.00	0.33	-85.00	0.93	68.68	1.50	-68.68	-0.93	-26.66	-0.45	41.05	43.29		42.02
4	-26.66	-0.45	-5.00	43.29	-85.00	-0.96	-73.32	1.50	73.32	0.96	119.99	0.87	-7.80	-3.47		46.67
5	119.99	0.87	5.00	-3.47	-85.00	0.91	65.09	1.50	-65.09	-0.91	-10.20	-0.18	62.05	62.93		54.90
6	-10.20	-0.18	-5.00	62.93	-85.00	-0.92	-66.55	1.50	66.55	0.92	122.90	0.84	-6.61	-2.41		56.35
7	122.90	0.84	5.00	-2.41	-85.00	0.87	60.23	1.50	-60.23	-0.87	2.44	0.04	77.41	77.19		62.67
8	2.44	0.04	-5.00	77.19	-85.00	-0.87	-59.94	1.50	59.94	0.87	122.32	0.85	-1.74	2.49		62.38
9	122.32	0.85	5.00	2.49	-85.00	0.82	54.66	1.50	-54.66	-0.82	12.99	0.22	88.45	87.33		67.66
10	12.99	0.22	-5.00	87.33	-85.00	-0.80	-53.38	1.50	53.38	0.80	119.74	0.87	5.58	9.93		66.37
11	119.74	0.87	5.00	9.93	-85.00	0.75	48.72	1.50	-48.72	-0.75	22.30	0.38	96.14	94.24		71.02
12	22.30	0.38	-5.00	94.24	-85.00	-0.73	-46.82	1.50	46.82	0.73	115.94	0.90	14.46	18.96		69.12
13	115.94	0.90	5.00	18.96	-85.00	0.68	42.55	1.50	-42.55	-0.68	30.83	0.51	101.05	98.48		73.38
14	30.83	0.51	-5.00	98.48	-85.00	-0.65	-40.25	1.50	40.25	0.65	111.33	0.93	24.26	28.92		71.08
15	111.33	0.93	5.00	28.92	-85.00	0.59	36.25	1.50	62.50	0.89						75.08

Таким образом, при заданных параметрах волновода, первая точка выхода излучения из волновода соответствует $i=3$ (*Таблица 2*) - $A_3(r, \varphi_3)$, вторая точка выхода соответствует $i=15$ (*Таблица 3*) - $A_{15}(r, \varphi_{15})$. Согласно формуле (2.13), можно вычислить $\Delta\varphi = \varphi_{15} - \varphi_3$ и определить теоретически достижимое поле зрения системы, используя формулу (2.14). В данной системе, поле зрения составляет $FOV = 130^\circ$, при вертексном расстоянии $d = 25$ мм. При других параметрах волновода, например при $R_1 - R_2 \neq 0$, теоретически достижимое поле зрения, которое может обеспечить

системе ДР волновод с неконцентрическими поверхностями, может достигать $FOV=160^\circ$ (рис.13).

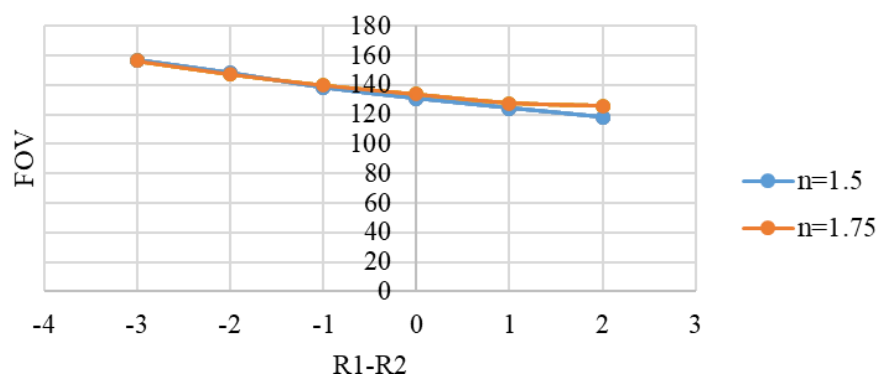


Рис.13. Зависимость теоретически достижимого поля зрения в клиновидном изогнутом волноводе в зависимости от разницы радиусов кривизны поверхностей, образующих подложку волновода.

Таким образом, впервые показано, что поле зрения в системе на основе волновода теоретически может достигать 160° . Свойство изогнутого клиновидного волновода заключается в преобразовании вводного излучения с углом U в выходную координату A .

2.3 Изображающие свойства клиновидного волновода

Клиновидный изогнутый волновод обладает свойством преобразования угловой информации в пространственную (каждому лучу, вводимому под углом U в волновод, соответствует пространственная координата A выхода излучения из волновода). Однако, в разделе 2.1 было показано, что излучение, распространяемое внутри изогнутого волновода, испытывает преобразования, выражающиеся в виде фокусировки излучения. На рис. 14 показан пример распространения излучения в изогнутом клиновидном волноводе: при вводе расходящихся пучков лучей, выводится излучение крайне неоднородно.

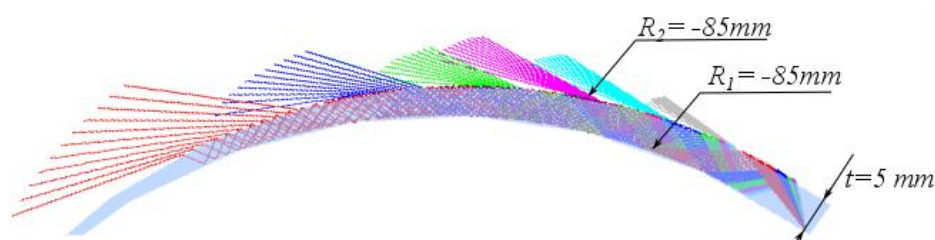


Рис.14. Угловая неоднородность при выходе излучения из волновода.

В предлагаемой системе очков ДР волновод должен не только «пропустить» излучение в условиях ПВО и вывести его, но и обеспечить формирование виртуального изображения. Угловая неоднородность выведенного из волновода излучения обусловлена не только наличием оптической силой поверхностей, образующих волновод, но и высокими значениями аберраций, возникающих в изображающей системе. Для того, чтобы минимизировать аберрации, предлагается выполнить волновод такой формы, чтобы при вводе параллельных изображающих пучков малого диаметра, они фокусировались и формировали пространственное изображение на внешней поверхности волновода, при этом угол падения каждого изображающего пучка был меньше критического угла ПВО. Для того, чтобы обеспечить такую функцию, при моделировании оптической системы, внутренняя поверхность волновода была описана с помощью полиномов Цернике [67]:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=1}^{66} C_{(j+1)} ZP_j, \quad (2.16)$$

где z – прогиб поверхности, параллельно оси z , c – вершина кривизны, k – коническая константа, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальное расстояние, ZP_j – j -тый полином Цернике ($j = 1-66$), C_{j+1} коэффициент. Для описания использовались только полиномы, описывающие симметричные системы (поскольку у данной схемы присутствует симметрия в меридиональной плоскости). Параметры внутренней поверхности приведены в *Таблице 4*.

Таблица 4. Геометрические параметры внутренней поверхности волновода

R	85.813	Z1	7.409817	Z7	0	Z13	13.09101	Z19	-33.1639	Z25	5.280858	Z31	0
		Z2	0	Z8	0	Z14	13.89662	Z20	6.454736	Z26	1.753784	Z32	0
		Z3	-15.6721	Z9	-28.3228	Z15	40.48744	Z21	102.6153	Z27	5.777512	Z33	-12.0814
Norm. radius	120	Z4	0	Z10	82.11722	Z16	0	Z22	0	Z28	16.54403	Z34	-9.11795
		Z5	17.71024	Z11	0	Z17	0	Z23	0	Z29	0	Z35	7.647031
		Z6	31.40221	Z12	0	Z18	0	Z24	0	Z30	0	Z36	13.19981

Внешняя поверхность волновода описывалась как поверхность с разными радиусами кривизны для меридионального $R = 76,0888$ мм и сагиттального $R = 89.665$ мм сечений. Моделирование системы выполнялось в программе CodeV. Указанные коэффициенты были оптимизированы для достижения обозначенного

условия фокусировки излучения на внешней поверхности волновода. Далее, излучение, преодолевая ПВО выводится из волновода и попадает в воздух. Для перенаправления излучения в зрачок пользователя, оптическая система дополнена отражательным ГОЭ, расположенным на расстоянии 1 мм от поверхности волновода. Параметры ГОЭ будут подробно рассмотрены в разделе 2.4 данной главы.

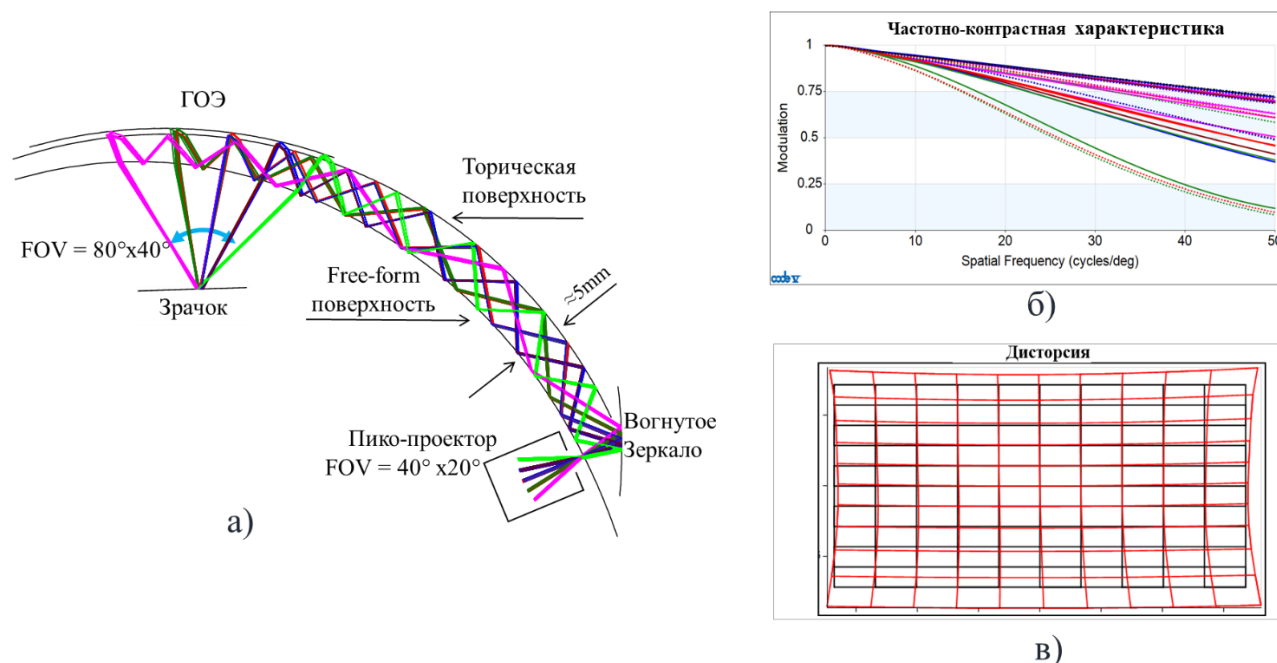


Рис. 15. Формирование виртуального изображения в оптической системе очков ДР с использованием клиновидного изогнутого волновода: а) ход лучей в оптической системе; б) частотно-контрастная характеристика; в) дисторсия изображающей системы.

В качестве источника изображения использовался набор параллельных пучков в пределах $40^\circ \times 20^\circ$ диаметра 0.5 мм, вводимых в волновод с помощью вогнутого зеркала (рис.15). В качестве источника изображения, формирующего угловое изображение, может использоваться лазерный пикопроектор. Материал волновода – полиметилметакрилат (PMMA), длина волны – 532 нм. Таким образом, при вводе углового изображения в клиновидный волновод с помощью вогнутого зеркала ($R = -108.99$ мм, $C=51,897$), излучение распространяется внутри волновода. Радиусы кривизны и коэффициенты полиномов были оптимизированы в программе CODE V таким образом, чтобы пространственное изображение формировалось на

внешней поверхности волновода. При этом, угол падения каждого изображающего пучка был меньше критического угла ПВО. Таким образом, достигая поверхности волновода, изображающие пучки выводятся из волновода и взаимодействуют с ГОЭ, который перенаправляет излучение в глаз пользователя. При данной конфигурации системы и приведенных параметрах волновода, при вводе изображения с угловым размером $FOV=40^\circ \times 20^\circ$, на выходе системы формируется виртуальное изображение с угловым размером $FOV = 80^\circ \times 40^\circ$.

2.4 ГОЭ в системе очков ДР на основе клиновидного волновода.

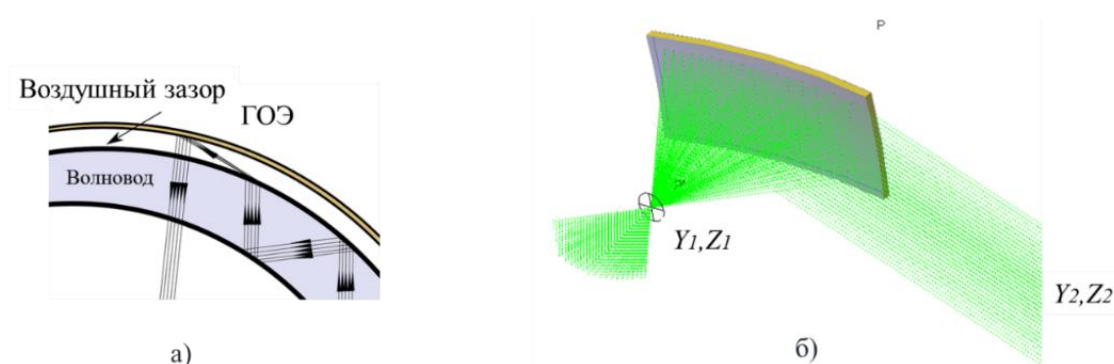


Рис. 16. ГОЭ в системе очков ДР на основе клиновидного волновода: а) воздушный зазор для вывода излучения из волновода; б) расположение конструктивных точек ГОЭ.

Для выхода излучения из волновода необходимо, чтобы была разница показателей преломления сред. Поэтому, для перенаправления излучения в зрачок пользователя и формирования виртуального изображения, необходимо разместить ГОЭ на некотором расстоянии от волновода (рис.16, а), например 1мм. Изображающая система с клиновидным волноводом ранее была исследована группой из компании Microsoft [68], однако в данном исследовании авторам удалось сформировать действительное изображение в плоскости внешней поверхности волновода, однако виртуальное изображение сформировать не удалось - из-за отсутствия воздушного зазора между подложкой волновода и ГОЭ. ГОЭ характеризуется конструктивными точками записи – это положения перетяжек сферических волн, с помощью которых записан данный ГОЭ. При записи плоскими волнами, конструктивные точки расположены на бесконечности.

ГОЭ осуществляет перенаправление излучения от волновода в зрачок пользователя и в данной системе представляет собой элемент, записанный сферическими волнами с конструктивными точками записи: $Y_1=0\text{мм}$, $Z_1=-25\text{мм}$, $Y_2 = -1.4 \times 10^8\text{мм}$, $Z_2 = -3.8 \times 10^7\text{мм}$ (рис.16, б).

2.5 Система очков ДР на основе клиновидного изогнутого волновода

В результате проведенного исследования, была разработана оптическая система очков дополненной реальности, которая позволяет формировать виртуальное изображения в широком поле зрения $\text{FOV} = 80^\circ \times 40^\circ$. При этом изображение распространяется по волноводу, и, не смотря на ограничения вызванные условиями ПВО для каждого материала, волновод распространяет и одновременно преобразует входное излучение и позволяет формировать виртуальное изображение высокого качества в широком поле зрения. На рис.17 показан результат моделирования оптической системы в программе Light Tools, которая позволяет выполнить симуляцию изображения формируемого на сетчатке глаза, при этом симуляция цифрового изображения и изображения окружающего мира дает результат, наиболее приближенный к реальному восприятию человеческим глазом.

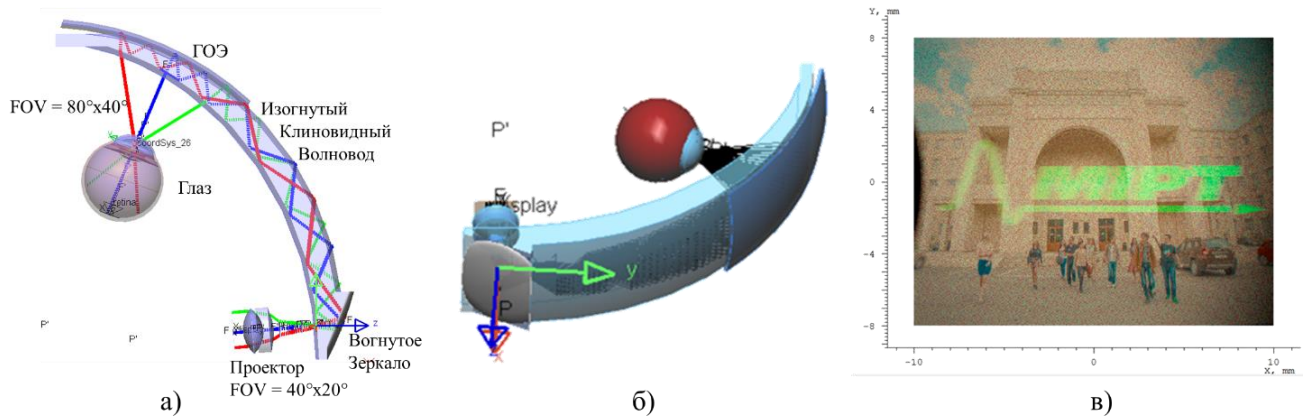


Рис.17. Оптическая система очков ДР с использованием изогнутого клиновидного волновода: а) ход лучей в изображающей системе; б) 3D модель системы; в) симуляция изображения на сетчатке человеческого глаза.

Выводы к главе 2

1. Поле зрения виртуального изображения, формируемое системами ДР с использованием планарного волновода с размножением выходного зрачка ограничено геометрическими параметрами волновода, а также его показателем преломления, при этом излучение распространяется внутри волновода в условиях полного внутреннего отражения обычно в пределах менее 40° .
2. Поле зрения виртуального изображения в системах с использованием волновода с размножением выходного зрачка может быть увеличено на $\approx 25\%$ путем изгиба волновода.
3. Увеличение поля зрения на $\approx 200\%$ в системах с использованием волновода может быть достигнуто введением клиновидности в изогнутый волновод, с целью создания условий вывода излучения из волновода без использования дополнительных элементов.
4. Изогнутый клиновидный волновод осуществляет преобразование углового изображения в пространственное, формируемое на внешней поверхности волновода.
5. Указанные в п.3 и п.4 свойства применены при разработке очков ДР на основе изогнутого клиновидного волновода и внеосевого ГОЭ для формирования виртуального изображения с угловым размером $80^\circ \times 40^\circ$ и с угловым разрешением более $40 \text{ лн}/^\circ$.

Глава 3. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЕВОГО ГОЭ

В разделе 1.2.4 раскрыты особенности ГОЭ, которые препятствуют формированию большого выходного зрачка в системе голографических очков ДР. Поэтому, несмотря на широкое поле зрения, формируемое системой, голографические очки до сих пор не используются в качестве носимых устройств из-за дискомфорта, вызванного ограниченным 1мм выходным зрачком. В данной главе будет рассмотрен метод увеличения выходного зрачка в системах на основе ГОЭ при сохранении широкого поля зрения системы.

3.1 Аберрации в системах на основе ГОЭ

В изображающих системах очков ДР чаще всего используются внеосевые ГОЭ, которые работают по принципу, отображенному на рис.5. и описанному в разделе 1.2.4. ГОЭ записывается сферическими волнами, характеризующимися конструктивными точками записи Y_1Z_1 и Y_2Z_2 (рис.18).

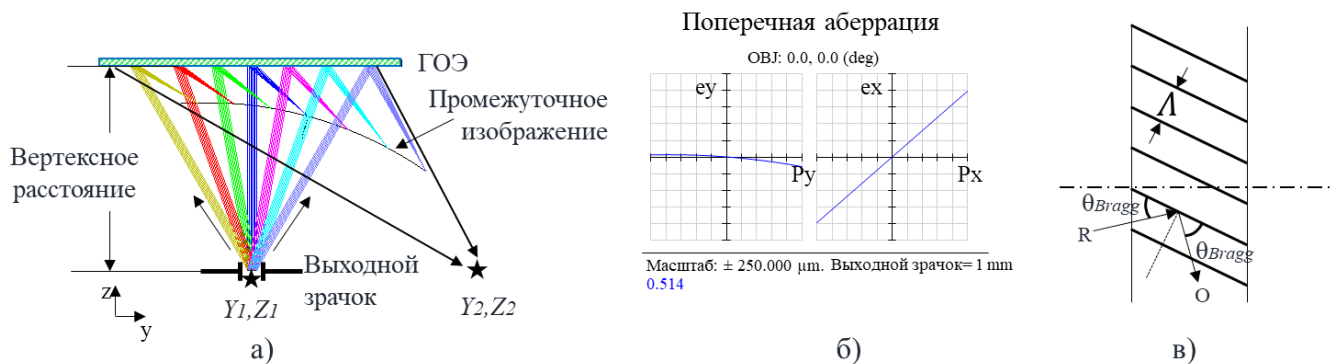


Рис.18 Аберрации, возникающие в системе на основе ГОЭ при его освещении параллельными пучками диаметром 1мм из точки Y_1Z_1 : а) ход лучей в системе; б) поперечные аберрации, оцениваемые в плоскости промежуточного изображения; в) угол Брэгга при формировании объемной дифракционной решетки.

В результате взаимодействия опорной и объектной волн, образующих угол $2\theta_{\text{BRAGG}}$ в регистрирующей среде с показателем преломления n , формируется интерференционная картина (рис.18, в). Период интерференционной картины Λ в локальной точке ГОЭ определяется законом Брэгга:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \theta_{\text{Bragg}}} . \quad (3.1)$$

Безабберрационное восстановление волнового фронта возможно лишь в случае, когда конфигурация волны при освещении ГОЭ полностью совпадает с конфигурацией волны, используемой при записи ГОЭ. Другими словами, выполняется условие:

$$\lambda_c = \lambda_0; \quad \theta_c = \theta_0, \quad (3.2)$$

где λ_0 и θ_0 – длина волны и углы записи ГОЭ, λ_c и θ_c – длина волны и углы освещения ГОЭ. Однако, освещение ГОЭ в изображающей системе очков ДР происходит волной, формирующей пространственное изображение, форма и положение которого соответствуют промежуточному изображению ГОЭ. Следовательно, восстанавливающая волна отличается от волны записи, а значит в системе неизбежны aberrации. Внеосевая схема записи ГОЭ вызывает высокие aberrации в изображающей системе. Это происходит ввиду высокой неоднородности интерференционной картины, возникающей при записи ГОЭ наклонными пучками. Для анализа aberrаций в изображающей системе на основе ГОЭ было выполнено моделирование с помощью программного обеспечения Zemax. Отражательный ГОЭ задавался с использованием типа поверхности «Hologram 2». ГОЭ освещается в модели параллельными пучками диаметром 1 мм под углами $-30^\circ..30^\circ$. Aberrации, возникающие в системе, оценивались в плоскости промежуточного изображения ГОЭ. Конструктивные точки записи ГОЭ, изображенного на рис.18, а соответствуют положению $Y_1 = 0$ мм, $Z_1 = -50$ мм, $Y_2 = -50$ мм, $Z_2 = -45$ мм, длина волны записи и подсветки голограммы $\lambda_0 = \lambda_c = 514$ нм. При данных условиях, величина поперечной aberrации (рис.18, б) составляет 50 мкм в сагиттальном сечении и более 200 мкм в меридиональном.

Размер выходного зрачка в очках ДР должен быть не менее 10 мм для комфортного использования устройства и наблюдения цифровой информации. Для формирования такого зрачка необходимо увеличить угловую апертуру изображающих пучков. Рассмотрим систему в обратном ходе – когда ГОЭ освещается пучками с диаметром 10 мм в угловых пределах $-30^\circ..30^\circ$ (рис.19).

Пятна рассеяния в плоскости промежуточного изображения, имеют несимметричные формы, что свидетельствует о наличии aberrаций видов кома и астигматизм. Величина пятен рассеяния для некоторых угловых направлений составляет более 6000 мкм. В таком случае, в обратном ходе, проекционная оптика дисплея должна будет сформировать пространственное изображение с обратными величинами aberrаций. Чтобы сформировать пространственное изображение с такими неоднородными aberrациями потребуется громоздкая и сложная оптическая система проектора, которая из-за больших габаритов будет попадать в поле зрения пользователя и препятствовать обзору окружающего мира.

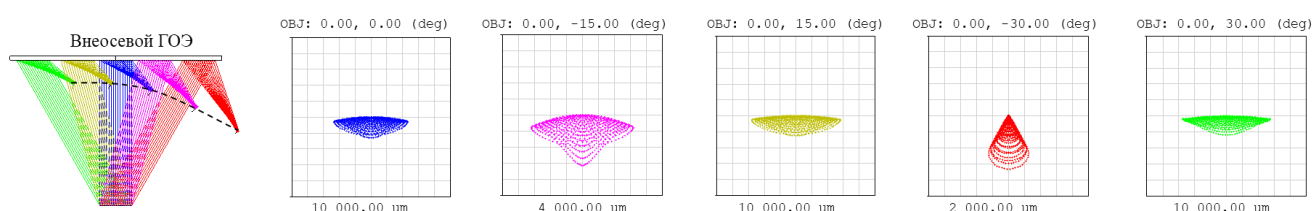


Рис. 19. Пятна рассеяния в плоскости промежуточного изображения внеосевого ГОЭ при выходном зрачке системы 10мм.

Высокие значения aberrаций внеосевых ГОЭ не позволяют увеличить выходной зрачок системы очков ДР путем увеличения угловой апертуры изображающих пучков, поскольку требуется еще и внесение aberrаций в проекционную систему. Однако, увеличение выходного зрачка может быть достигнуто путем уменьшения aberrаций, возникающих в системе.

Рассмотрим, как изменяются aberrации системы при смещении наклонной объектной волны к оси (т.е. при уменьшении значения $|Y_2|$) при записи ГОЭ. При анализе системы промежуточное изображение описывалось уравнением сферы. На рис.20 (а-б) показана зависимость кривизны поля и дисторсии от положения конструктивной точки объектной волны, а именно от координаты Y_2 . При смещении точки Y_2 к оси кривизна поля и дисторсия уменьшаются, при этом существует два частных случая, при которых дисторсия нулевая. Первый случай соответствует ГОЭ, у которого промежуточное изображение описывается уравнением сферы (рис.20, в). Второй случай соответствует осевому ГОЭ – т.е.

когда опорная и объектная волны расположены на оси – в этом случае и кривизна поля, и дисторсия равны нулю (рис.20, г).

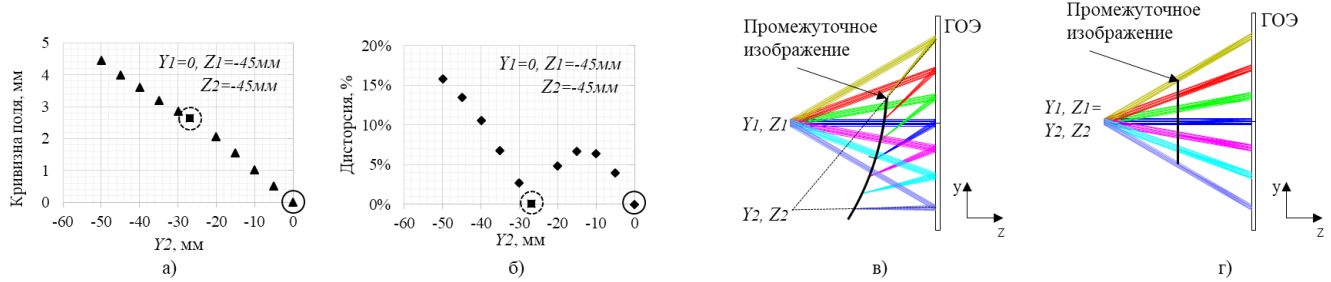


Рис. 20. Аберрации ГОЭ: а) зависимость кривизны поля от положения объектной волны Y_2 ; б) зависимость дисторсии от положения объектной волны Y_2 ; в) частный случай - промежуточное изображение ГОЭ описывается уравнением сферы; г) частный случай – осевой ГОЭ имеет промежуточное изображение с нулевой кривизной.

Осевой ГОЭ обеспечивает ряд преимуществ системе. Осевой ГОЭ обладает однородной, симметричной интерференционной картиной, представляющей собой набор концентрических колец. Такой ГОЭ вызывает малые аберрации в изображающей системе, соответственно угловая апертура изображающих пучков может быть увеличена для достижения большого выходного зрачка. Промежуточное изображение осевого ГОЭ обладает симметричной формой, что потенциально способствует упрощению оптической системы проектора. Но главной особенностью осевого ГОЭ является то, что его промежуточное изображение может представлять собой плоскость с нулевой кривизной. На рис. 21 представлены конфигурации осевых ГОЭ, отличающиеся положением конструктивной точки записи координаты Z_2 и соответствующие им схемы освещения ГОЭ параллельными пучками из точки Y_1Z_1 , отличающиеся положением S_i и радиусом кривизны r промежуточного изображения. Моделирование осуществлялось в программе Zemax с использованием типа поверхности «Hologram 2». В первом случае (Рис.21, а), осевой ГОЭ записан сферическим опорным пучком ($Z_1=-45$ мм) и объектным пучком из бесконечности ($Z_2=-\infty$). При такой конфигурации промежуточное изображение ГОЭ расположено на расстоянии $S_i = Z_1$ и имеет радиус кривизны $r=-32.055$ мм. Положение выходного

зрчка совпадает с положением промежуточного изображения, а значит такой ГОЭ не может быть использован в оптической системе очков ДР. Поскольку источник изображения в такой схеме должен располагаться непосредственно на зрчке пользователя, при этом иметь линейный размер, соответствующий размеру самого ГОЭ. По мере приближения объектной волны к точке опорной волны в схеме записи ГОЭ радиус кривизны промежуточного изображения увеличивается по модулю, а расстояние S_i сокращается (рис.21, б). При достижении условия $Z_1=Z_2$, т.е. когда конструктивные точки записи опорной и объектных волн совпадают, промежуточное изображение ГОЭ становится плоским (рис.21, в). При дальнейшем смещении объектной волны вдоль оси промежуточное изображение приближается к ГОЭ, и при этом меняется знак радиуса кривизны.

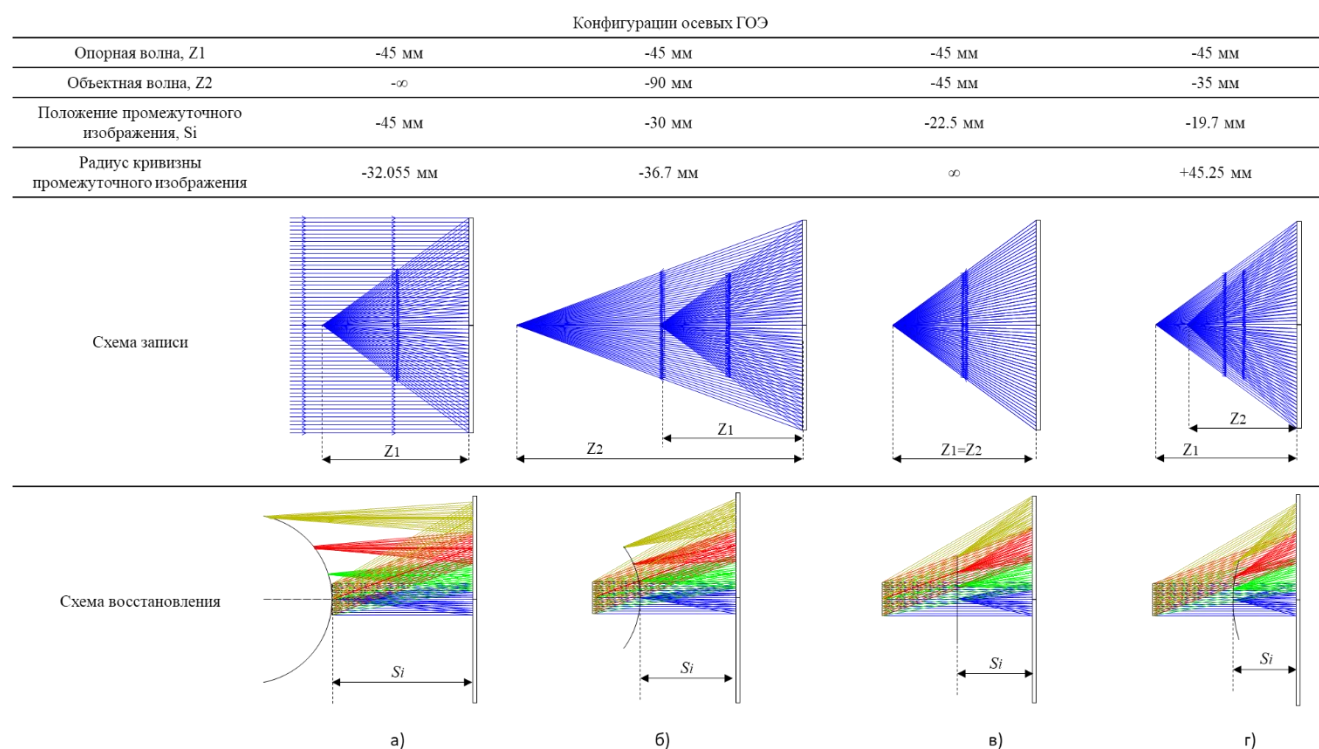


Рис. 21. Формы и положения промежуточного изображения осевого ГОЭ в зависимости от расположения опорной и объектных волн записи ГОЭ (а-г).

Осевой ГОЭ обладает порождает меньшие aberrации в изображающей системе, чем внеосевой ГОЭ, а значит угловая апертура изображающих пучков может быть увеличена для достижения более широкого размера выходного зрчка системы [69]. Рассмотрим также размеры и формы пятен рассеяния в плоскости

промежуточного изображения при освещении ГОЭ параллельными пучками диаметром 10 мм в угловом поле $-30^\circ..30^\circ$. Моделирование осуществлялось в программе Zemax с использованием типа поверхности «Hologram 2» для задания осевого ГОЭ. Конструктивные точки опорной и объектной волн при записи осевого ГОЭ $Z_1=Z_2=-45$ мм. Пятна рассеяния в плоскости промежуточного изображения не превышают в диаметре 140 мкм (рис.22), что в >42 раза меньше, чем системе с внеосевым ГОЭ (рис. 19).

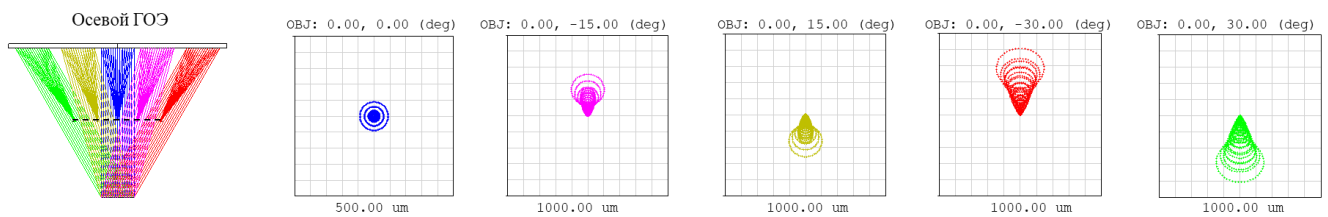


Рис. 22. Пятна рассеяния в плоскости промежуточного изображения осевого ГОЭ при выходном зрачке 10мм.

Таким образом внеосевой ГОЭ вызывает большие aberrации в изображающей системе очков ДР. Поэтому, при формировании виртуального изображения с помощью ГОЭ используются изображающие пучки малой угловой апертуры, которые формируют узкий выходной зрачок менее 1мм. Осевой ГОЭ обладает в >40 раз меньшими поперечными aberrациями, что позволяет увеличить угловую апертуру изображающих пучков в изображающей системе с использованием ГОЭ и обеспечить формирование большого выходного зрачка.

3.2 Параметры осевого ГОЭ в очках ДР

В ходе разработки оптической системы очков ДР на основе осевого ГОЭ в качестве целевых спецификаций устройства выбраны следующие параметры: поле зрения $FOV = 60^\circ(H) \times 33.75^\circ(V)$, ширина выходного зрачка $w_{\text{ЕВ}} = 10$ мм, вертексное расстояние $S_i > 20$ мм и плоское промежуточное изображение ГОЭ. Исходя из указанных выше целевых значений, расстояние от осевого ГОЭ до конструктивных точек записи опорной и объектной волн были выбраны такими, что $S_R = S_O = -45$ мм. При такой конфигурации ГОЭ обладает плоским промежуточным изображением, расположенным на расстоянии $S_i = -22.1$ мм, тогда вертексное расстояние

составляет 22.9 мм. Моделирование системы выполнялось в программе Zemax, для задания ГОЭ использовался тип поверхности «Optically Fabricated Hologram». Данный тип поверхности позволяет задавать опорную и объектную волны, сформированные оптическими системами, aberrации которых также учитываются при анализе изображающей системы с использованием ГОЭ. Для записи ГОЭ предлагается использовать схему по типу записи Денисюка [70]. В данной схеме, опорная волна проходит через стеклянную подложку и нанесенный на него фоточувствительный материал, затем отражается и преобразуется объектом (в нашем случае объект – сферическое зеркало), и проходит через систему в обратном направлении, при этом в толще фоточувствительного материала формируется объемная интерференционная картина. На рис.23 (а) представлена схема записи ГОЭ, а в *Таблице 5* указаны параметры модели. Схема восстановления волнового фронта из плоскости выходного зрачка показана на рис.23 (б). Параллельные пучки диаметром 10 мм освещают ГОЭ с расстояния S_0 в угловом диапазоне $-30^\circ..30^\circ$. После взаимодействия с ГОЭ изображающие пучки фокусируются в плоскости промежуточного изображения. Таким образом, в оптической системе очков ДР с использованием осевого ГОЭ, его необходимо осветить из плоскости промежуточного изображения пучками с угловой апертурой ϕ , тогда ширина выходного зрачка системы будет определяться формулой:

$$w_{EB} = 2 \cdot S_i \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\phi}{2} \right). \quad (3.3)$$

Чтобы сформировать выходной зрачок 10 мм, угловая апертура должна быть как минимум 25.5° .

Опорная волна в схеме записи ГОЭ представляет собой сферическую волну с конструктивной точкой Y_l, Z_l . Расходящаяся сферическая волна характеризуется угловой апертурой 2σ . Величина угловой апертуры для записи ГОЭ определяется не только величиной поля зрения и размером выходного зрачка. Также учитывается сторона подложки, на которую нанесен фоточувствительный материал для регистрации интерференционной картины. В текущей системе предлагается

наклеивать фоточувствительный материал на внешнюю сторону подложки, как показано на рис. 23 (б). Ранее было указано, что конфигурация волн записи выбирается такой, чтобы при восстановлении волнового фронта из плоскости промежуточного изображения расходящимися пучками ГОЭ преобразовывало сферические пучки в параллельные. Поэтому схема записи ГОЭ должна быть выбрана такой, чтобы обеспечить преобразование сферических пучков в плоские в нужном диапазоне поля зрения, как показано на рис.23 (в). Для вычисления угловой апертуры волны записи необходимо учитывать показатель преломления подложки. Исходя из геометрических параметров описываемой схемы, была выведена формула, связывающая угловую апертуру 2σ с параметрами системы:

$$S_0 \frac{\sin(\sigma)}{\sqrt{1 - \sin^2(\sigma)}} + t \frac{\sin(\sigma)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\sigma)}} = \frac{w_{EB}}{2} + S_0 \frac{\sin(HFOV)}{\sqrt{1 - \sin^2(HFOV)}} + t \frac{\sin(HFOV)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(HFOV)}} \quad (3.4)$$

где t – толщина подложки, n – показатель преломления подложки, $HFOV$ - половина величины поля зрения системы, w_{EB} – диаметр выходного зрачка. Зная угловую апертуру σ , можно оценить диапазон углов, используемый в записи осевого ГОЭ как $0.. \sigma_o$, а также в схеме восстановления волнового фронта ГОЭ $0.. \sigma_R$ (рис.23,в):

$$\sigma_o = \text{asin}\left(\frac{\sin(\sigma)}{n}\right), \quad (3.5)$$

$$\sigma_R = \text{asin}\left(\frac{\sin(HFOV)}{n}\right). \quad (3.6)$$

Согласно уравнениям (3.4)-(3.6), чтобы обеспечить $HFOV=30^\circ$ и выходной зрачок $w_{EB}=10\text{мм}$, угловая апертура опорной волны должна быть не менее $2\sigma = 68.92^\circ$. Таким образом, осевой ГОЭ записывается в углах $0..22.7^\circ$, и восстанавливается с помощью углов $\sigma_R 0..19.74^\circ$.

Таблица 5. Параметры модели осевого ГОЭ

Подложка	толщина	2mm
	материал	ВК7
ГОЭ	порядок	1
	толщина	16 μm
	n	1.495
	Δn	0.035

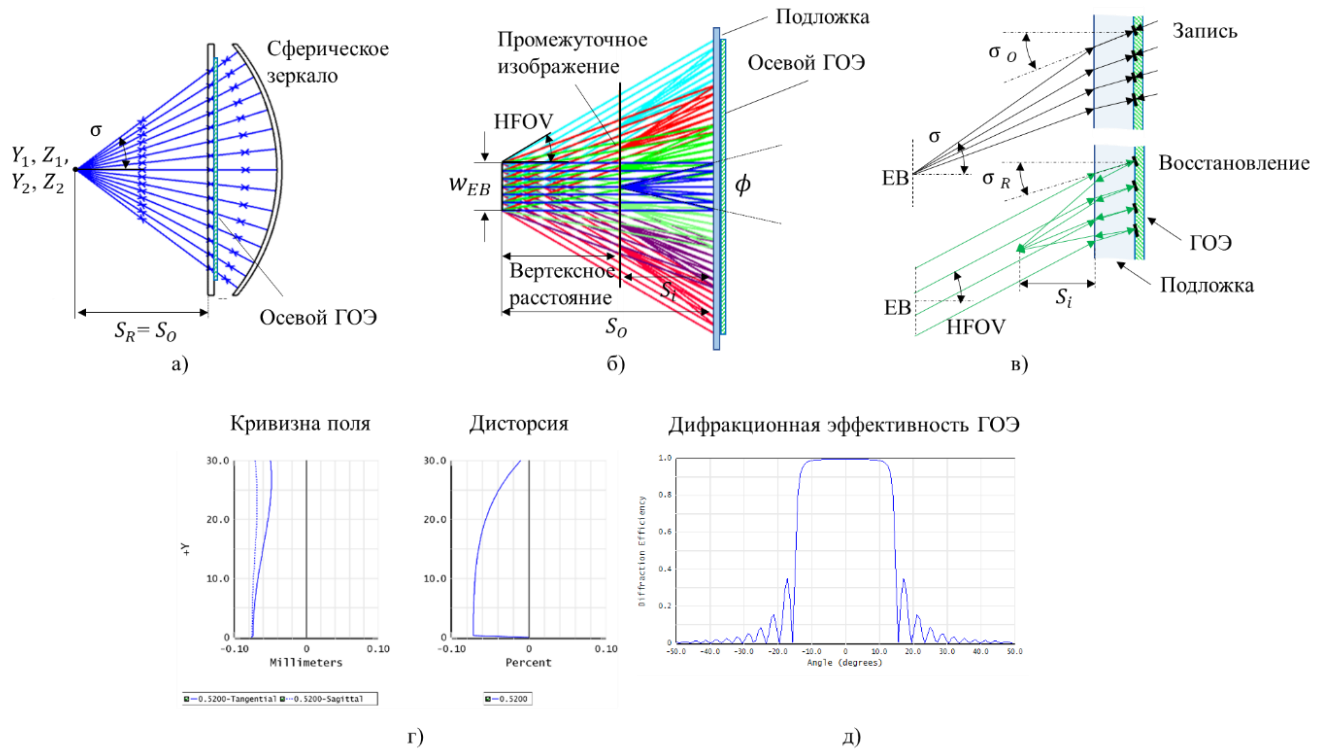


Рис.23. Схема работы осевого ГОЭ в изображающей системе: а) схема записи ГОЭ концентрическими волнами; б) схема восстановления волнового фронта; в) Запись осевого ГОЭ точечным источником с угловой апертурой 2σ обеспечивает формирование необходимого поля зрения при освещении ГОЭ; г) осевой ГОЭ обладает малой кривизной поля и дисторсией; д) зависимость дифракционной эффективности от угла подсветки для длины волны $\lambda=514$ нм.

Осевой ГОЭ, записанный согласно схеме записи, представленной на рис.23, с использованием параметров системы, отраженных в *Таблице 5*, обладает малыми aberrациями (рис.23, г). Дифракционная эффективность такого ГОЭ достигает 100% при освещении ГОЭ в пределах $\pm 16^\circ$ от условий Брэгга. При этом угловая апертура изображающих пучков $\phi = 25.5^\circ$, тогда угловая апертура пучков в плоскости ГОЭ будет равна:

$$\phi' = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\phi/2)}{n} \right), \quad (3.7)$$

а это значит, что для всего поля зрения дифракционная эффективность будет составлять 100% и таким образом однородность виртуального изображения будет высокой.

Интенсивность голографического поля I в фоточувствительном материале определяется как [71]:

$$I = R^2 + O^2 + RO^* + R^*O \quad (3.8)$$

где R и O – комплексные амплитуда опорной и объектных волн соответственно. Первые два члена уравнения (3.8) определяют интенсивности волн, третий и четвертый члены определяют периодичность интенсивности в пространстве. Третий и четвертый члены можно определить как:

$$RO^* + R^*O = 2 \cdot R \cdot O \cdot \cos(\varphi_R - \varphi_O). \quad (3.9)$$

Пространственная частота интерференционной картины определяется скоростью изменения разности фаз в уравнении (3.9). Разность фаз между опорной и объектной волной определяется как:

$$\varphi_R - \varphi_O = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l \quad (3.10)$$

где Δl – оптическая разность хода в точке (x,y) в плоскости ГОЭ. Для осевого ГОЭ величин Δl симметрична относительно вершины ГОЭ и вычисляется как:

$$\Delta l = \frac{x^2 + y^2}{2} \left(\frac{1}{S_R} - \frac{1}{S_O} \right) = \frac{\rho^2}{2} \left(\frac{1}{S_R} - \frac{1}{S_O} \right) \quad (3.11)$$

где S_R и S_O – расстояния от плоскости ГОЭ до конструктивных точек записи опорной и объектной волн соответственно. Ввиду симметрии ГОЭ, ρ – расстояние между вершиной ГОЭ и точки в плоскости ГОЭ. Локальная пространственная частота в точке ρ может определяться как дифференциал $\Delta l / \lambda$. Тогда в нашем случае при условии $S_R = -S_O$ локальная частота равна:

$$v(\rho) = \frac{2\rho}{S_R \lambda}. \quad (3.12)$$

Уравнение (3.12) показывает, что спектр пространственных частот в точке ρ осевого ГОЭ зависит только от длины волны и расположения конструктивной точки записи голограммы. Интерференционная картина в данном случае имеет структуру концентрических колец с увеличивающейся пространственной частотой по мере увеличения расстояния от вершины ГОЭ к ее краям (рис.24, а). Величину локальной частоты необходимо учитывать при выборе материала для записи

голограммы. Разрешение материала должно превышать локальную частоту для данной схемы. В нашем случае, при $\rho = 16$ мм, разрешение регистрирующей среды должно превышать 1384 лн/мм.

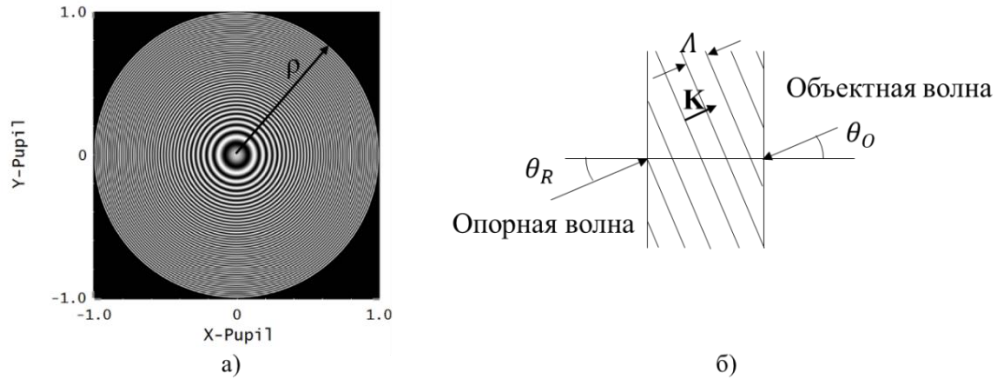


Рис.24. Структура осевого ГОЭ: а) пространственное распределение интерференционной картины; б) схематичное изображение элементарной отражательной Брэгговской решетки **К**, образованной встречными пучками опорной θ_R и объектной волн θ_0 .

Интерференционная картина, образованная встречными сферическими пучками, имеет симметричную кольцевую структуру (рис.24, а). Период распределения интерференционных полос внутри регистрирующей среды связан с уравнением Брэгга (3.1). Поскольку осевой ГОЭ записан встречными пучками, то $\sin\theta=1$, что приводит к формированию наименьшего из возможных периодов в данной среде, при данной длине волны $\Lambda = \lambda/2n$.

Дифракционную эффективность объемных Брэгговских решеток можно оценить, используя теорию связанных волн, описанную Когельником [72]. Так, дифракционная эффективность отражательных ГОЭ определяется выражением:

$$DЭ_R = \left[1 + \frac{1 - \xi^2 / v^2}{\sinh^2 \sqrt{v^2 - \xi^2}} \right]^{-1}, \quad (3.13)$$

где параметры v и ξ определяются параметрами схемы записи и восстановления волнового фронта ГОЭ:

$$v = \frac{i\pi d \Delta n}{\lambda \sqrt{\cos \theta_R \cos \theta_0}}, \quad (3.14)$$

$$\xi = -\frac{\Gamma d}{2 \cos \theta_0}, \quad (3.15)$$

где Δn – модуляция показателя преломления в среде, d – толщина регистрирующего материала. Параметр Γ является константой, определяющей отклонение параметров восстанавливающей волны от волны записи, и определяется выражением:

$$\Gamma = \Delta \theta \cdot K \sin(\theta_{Bragg} - \theta_R) - \frac{\Delta \lambda K^2}{4\pi n} \quad (3.16)$$

где $\Delta \theta$ – отклонение угла освещения ГОЭ от угла записи, $\Delta \lambda$ – отклонение длины волны освещения ГОЭ от длины волны записи, $K=2\pi/\Lambda$ – длина волнового вектора. Для осевого ГОЭ, записанного во встречных пучках, выполняется условие:

$$\theta_0 = \theta_R \quad (3.17)$$

тогда, после преобразований, при $\Delta \theta=0$ параметр ξ приобретает вид:

$$\xi = \frac{2\pi n d \Delta \lambda}{\lambda^2 \cos \theta_0}. \quad (3.18)$$

Для конфигурации ГОЭ, отраженного на рис.23, записанного с помощью источника, работающего на длине волны $\lambda=514$ нм, в фотополимер Вауег НХ200 ($n = 1.505$, $\Delta n = 0.03$, $d = 16$ мкм), дифракционная эффективность достигает 100% для $\theta_0=0^\circ$, $\theta_0=15^\circ$, $\theta_0=30^\circ$ (Рис.25). При этом спектральная селективность осевого элемента составляет $\Delta \lambda_{FWHM}=12$ нм (Рис. 25).

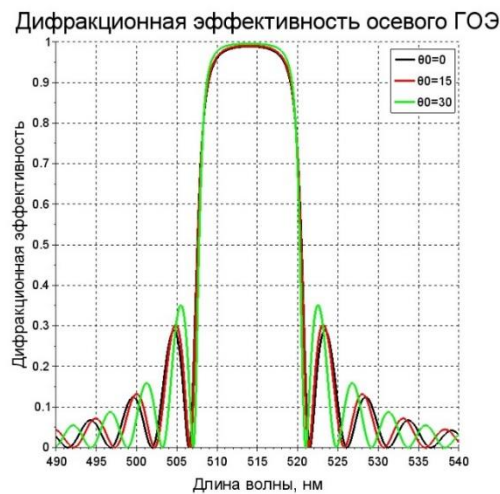


Рис.25. Дифракционная эффективность осевого ГОЭ как функция от λ при фиксированных значениях θ_0 .

Моделирование и анализ осевого ГОЭ показывает, что предложенная концентрическая конфигурация записи ГОЭ позволяет использовать его в оптической системе очков ДР для создания виртуального изображения в широком поле зрения и с большим выходным зрачком одновременно. Однако, данная система предполагает освещение ГОЭ из плоскости промежуточного изображения, расположенного на оси системы. А это значит, что потребуется прозрачный для видимого диапазона источник изображения с возможностью формирования изображающих пучков с угловой апертурой $\phi = 25.5^\circ$ и нужным угловым распределением. В качестве такого источника изображения предлагается использовать направленный голографический диффузор в комбинации с лазерным сканирующим проектором [73].

3.3 Свойства направленного голографического диффузора

В отличие от внеосевой схемы очков ДР, в осевой схеме источник изображения находится непосредственно в поле зрения пользователя. Такой источник изображения в осевой схеме должен формировать изображения с нужным угловым распределением, должен быть незаметным для глаза пользователя, а также не должен препятствовать прохождению излучения видимого диапазона от окружающего мира. В качестве такого источника изображения может выступать внеосевой направленный голографический диффузор (НГД), работающий в комбинации с лазерным проектором (рис.26, а).

Проектор формирует пространственное изображение в плоскости НГД. Луч от каждого пикселя проектора характеризуется углом падения на НГД δ_i и угловой апертурой ϕ_{in} . НГД представляет собой внеосевой фазовый пропускающий ГОЭ, который перенаправляет излучение по определенному закону, в данном случае:

$$\gamma_i = \frac{(\delta_i - \delta_{n/2})}{\cos(\delta_i)} \cdot p, \quad (3.19)$$

и увеличивает угловую апертуру изображающих пучков, согласно выражению:

$$\phi = m \cdot \phi_{in}. \quad (3.20)$$

В выражениях (3.19)-(3.20) параметры p – коэффициент преобразования углового направления излучения, m – угловое увеличение НГД, δ_i - угол падения излучения от i -го пикселя в проекционной системе, n – разрешение (кол-во пикселей) в пространственном изображении, ϕ_{in} – угловая апертура падающего на НГД излучения, ϕ - угловая апертура дифрагированных пучков, γ_i - угловое направление дифрагированных пучков. Коэффициенты p и m выбираются исходя из геометрических параметров очков ДР. В предлагаемой схеме для достижения поля зрения 60° параметр $p = 1.9$, а для достижения выходного зрачка 10 мм, параметр $m = 4.84$.

На рис. 26 (б) изображена принципиальная схема записи НГД. Объектная волна в данном случае образована изображающей оптической системой, которая формирует изображение оптического диффузора размером D в плоскости НГД. Опорная волна представляет собой расходящуюся сферическую волну, освещающую НГД под углом $\delta_{n/2}$. Расстояние H и угол $\delta_{n/2}$ определяются эргономикой и геометрией очков ДР. В текущей системе $H=50$ мм, $\delta_{n/2}=60^\circ$. согласно выбранным параметрам, можно оценить диапазон углов, в пределах которых работает НГД:

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{H \sin(\delta_{n/2}) - D/2}{H \cos(\delta_{n/2})}, \quad \delta_n = \tan^{-1} \frac{H \sin(\delta_{n/2}) + D/2}{H \cos(\delta_{n/2})}. \quad (3.21)$$

Для описываемой системы диапазон углов составляет $\delta_1=49.5^\circ \dots \delta_n=66.7^\circ$. Используя полученные значения, можно определить числовую апертуру для опорной волны записи НГД, которая в данной схеме составляет $NA=0.182$. Для объектной волны, пространственное изображение размера D может быть образовано объективом с фокусным расстоянием:

$$f' = \frac{a}{\omega(1-b)}, \quad (3.22)$$

где a – расстояние от диффузора до объектива, ω – угловое увеличение. К примеру, для формирования НГД размером с угловой расходимостью $\phi=25.5^\circ$ можно использовать диффузор с углом расходимости 8° и объектив $f'=121.7$ мм. При этом

для формирования НГД размером $D=28 \times 15.75$ мм необходимо использовать диффузор с размером 80×45 мм.

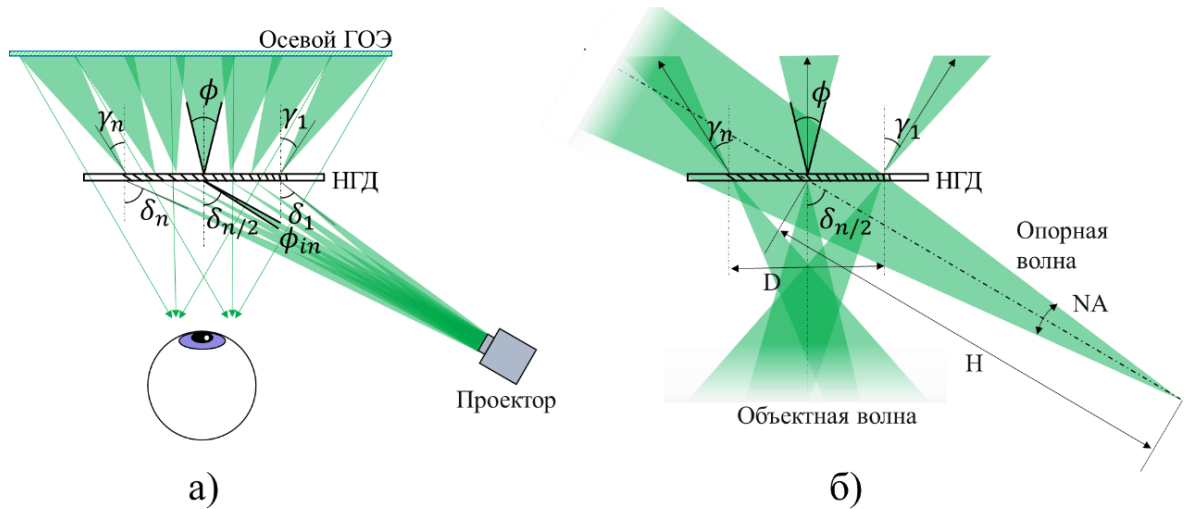


Рис.26. Принцип работы внеосевого НГД: а) НГД осуществляет перенаправление излучения и увеличение угловой апертуры изображающих пучков; б) принципиальная схема записи НГД с помощью объектной волны, сформированной изображающей оптической системой, и опорной сферической наклонной волны.

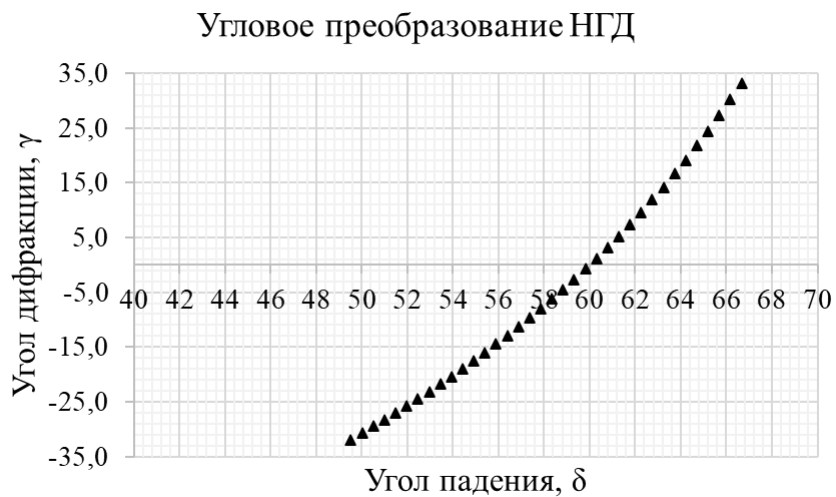


Рис.27. Угловое преобразование НГД

Дифракционную эффективность просветного элемента НГД можно оценить, используя теорию связанных волн, как и в случае с отражательным осевым ГОЭ [72]. Дифракционная эффективность просветной голограммы определяется выражением:

$$D_{\Theta_T} = \frac{\sin^2 \sqrt{v^2 + \xi^2}}{1 + \xi^2 / v^2}, \quad (3.23)$$

где параметры v и ξ определяются параметрами схемы записи и освещения ГОЭ:

$$v = \frac{\pi d \Delta n}{\lambda \sqrt{\cos \theta_R \cos \theta_0}}, \quad (3.24)$$

$$\xi = \frac{\Gamma d}{2 \cos \theta_0}, \quad (3.25)$$

при этом углы θ_0 и θ_R определяются как:

$$\theta_R = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \sigma_1}{n} \right) \dots \sin^{-1} \left(\frac{\sin \sigma_n}{n} \right); \quad \theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \gamma_1}{n} \right) \dots \sin^{-1} \left(\frac{\sin \gamma_n}{n} \right) \quad (3.26)$$

При соблюдении условий Брэгга, т.е. когда $\Gamma=0$, можно воспользоваться следующей формулой для анализа дифракционной эффективности просветного НГД при данных условиях записи:

$$D_{\Theta_T} = \sin^2 \left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda \sqrt{\cos \theta_R \cos \theta_0}} \right). \quad (3.27)$$

Угол Брэгга θ , возникающий при взаимодействии опорной и объектной волн определяется согласно выражению:

$$\theta = \frac{\theta_0 - \theta_R}{2} \quad (3.28)$$

Таким образом, угол Брэгга в НГД конфигурации, отображенной на рис.26, имеет диапазон от $\theta=8^\circ..25^\circ$. Дифракционная эффективность просветного НГД, для различных углов Брэгга с указанными выше угловыми параметрами записи в фотополимере Bayfol HX200 ($n = 1.505$, $d = 16$ мкм) имеет вид, представленный на рис.28. Согласно спецификациям фотополимера Bayfol HX200, модуляция показателя преломления в материале Bayfol HX200 имеет значения $\Delta n > 0.03$, и его величина зависит от параметров схемы записи, а именно - от мощности опорного и объектного пучка, от времени экспозиции, от усадки материала, возникающей в результате теплового нагрева фотополимера лазерным излучением и в результате выделения тепла в процессе химической реакции формирования решетчатых структур внутри фотополимера.

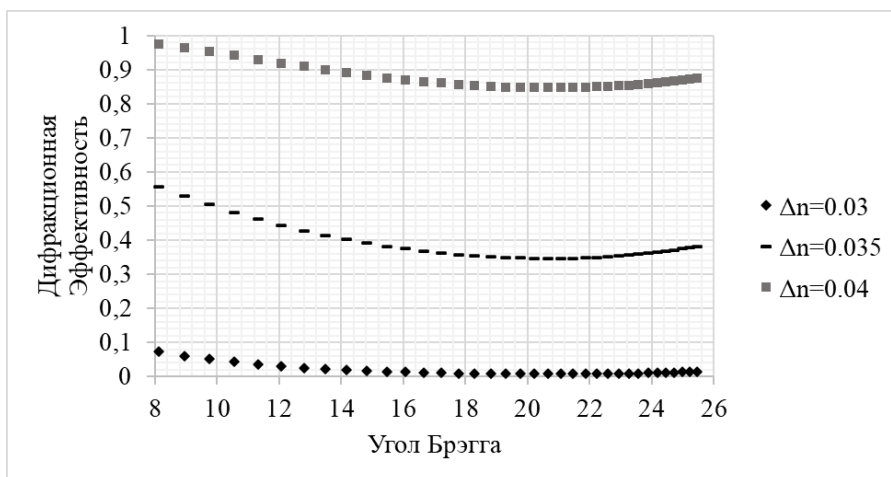


Рис. 28. Дифракционная эффективность НГД в зависимости от величины угла Брэгга и для фиксированных значений модуляции показателя преломления Δn .

3.4 Источник изображения в оптической системе ДР на основе осевого ГОЭ и НГД

Наиболее подходящим источником для интеграции в очки ДР на основе осевого ГОЭ является лазерный сканирующий проектор (laser beam scanning (LBS)) [74-75]. LBS проектор – это устройство, которое формирует пространственное изображение посредством сканирования лазерного луча. Для сканирования излучения используются динамические MEMS зеркала. Существуют схемы на основе двух MEMS зеркал, в которых каждое зеркало вращается вокруг одной оси, а также существуют системы на основе одного двумерного MEMS зеркала [74]. В качестве источника излучения используются RGB лазерные диоды, излучение от которых коллимируется с помощью линз. Диаметр пучка на выходе устройства составляет порядка $\sim 0,5$ мм [74], а перетяжка лазерного излучения растянута от $\sim 0,5$ м до ~ 10 м с наилучшей дистанцией фокусировки $\sim 1,5$ м. Стандартная величина поля зрения, в которой формируется изображение, составляет $\sim 40^\circ \times 20^\circ$. Компактные LBS проекторы обладают высокой яркостью и однородностью изображения, узким спектральным диапазоном излучения. Благодаря перечисленным характеристикам данный тип источника изображения является подходящим для использования в системах на основе ГОЭ.

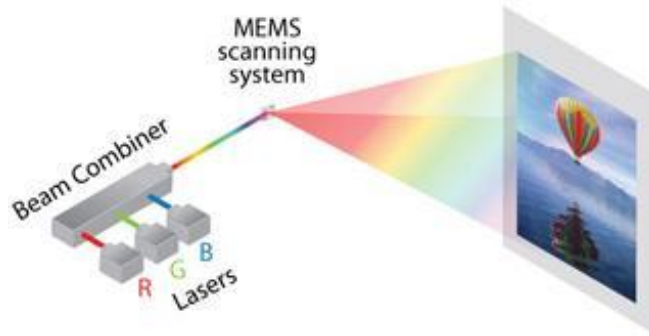


Рис.29. Принцип работы лазерного сканирующего проектора на основе MEMS зеркал [75].

LBS проектор формирует изображение перпендикулярно к своей оси. В схеме очков ДР на основе ГОЭ НГД освещается проектором под углом 60° , согласно схеме, отображенной на рис.26 (а). Поэтому LBS проектор должен быть дополнен оптической системой, которая сформирует наклонный пучок, а также увеличит угловую апертуру изображающих пучков. Одним из решений по преобразованию излучения может являться отражательная призма (рис.30, а).

Отражательная призма, выполненная из пластика РММА, имеет две плоские грани – входную и выходную, и 3 грани с оптической силой, форма которых описана с помощью полиномов Цернике. Коэффициенты Цернике оптимизированы для достижения наилучшего качества пространственного изображения в плоскости НГД. Представленное решение является наиболее компактным и подходящим для эргономики очков ДР.

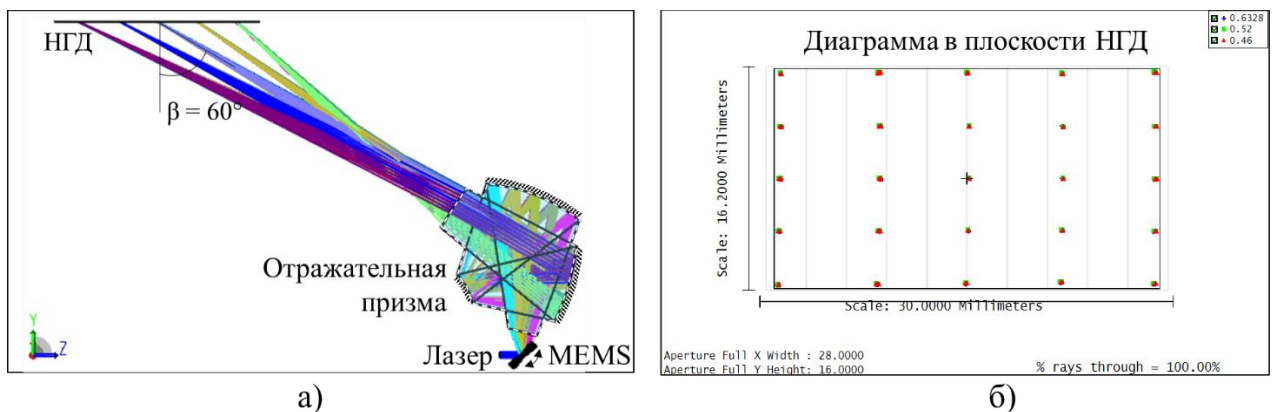


Рис.30. Принцип работы отражательной пятигранной призмы в системе очков ДР: а) ход лучей в системе; б) распределение изображающих пучков в плоскости НГД.

3.5 Оптическая схема формирования осевого ГОЭ

Принцип работы осевого ГОЭ показан на рис.23. Однако наличие в схеме нулевого порядка дифракции приводит к возникновению паразитных засветок в системе, вызванных многочисленными френелевскими отражениями излучения от подложек ГОЭ и НГД. В результате отражений излучение попадает в зрачок пользователя и вызывает шумовую засветку. Чтобы избавиться от помех, схема записи осевого ГОЭ была модифицирована путем поворота подложки ГОЭ на угол $\alpha=5^\circ$. Данный поворот меняет направление распространения шумового излучения и выводит его из системы. Однако, при повороте подложки, конструктивные точки записи ГОЭ должны быть переопределены (рис.31, а), чтобы обеспечить формирование плоского промежуточного изображения (рис.31, б).

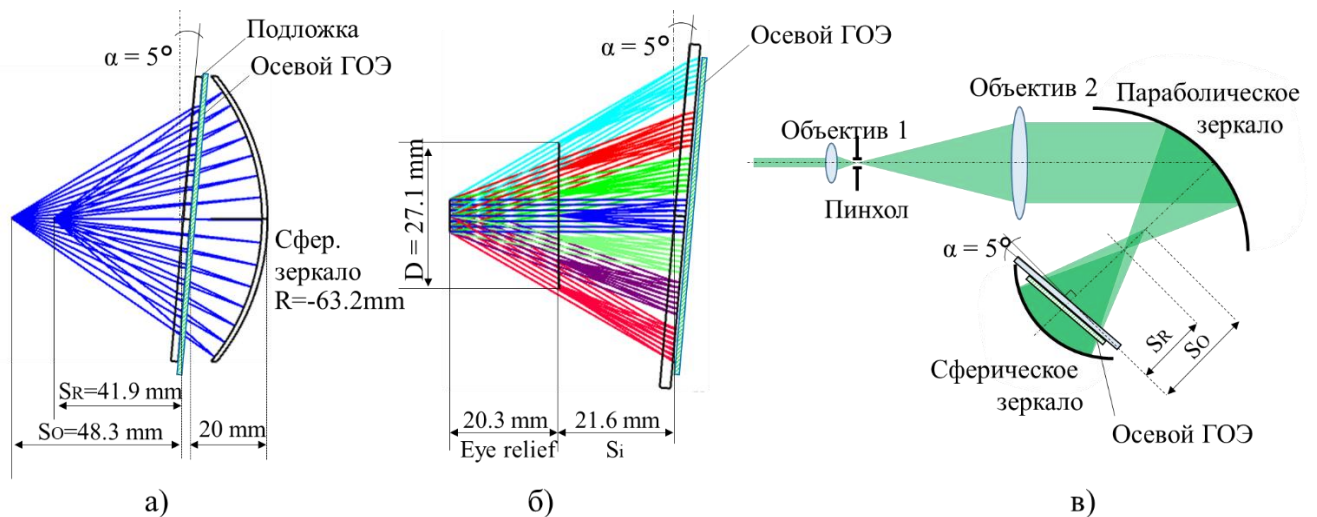


Рис.31. Схема записи осевого ГОЭ: а) конструктивные точки записи осевого ГОЭ; б) ход лучей при освещении ГОЭ из плоскости промежуточного изображения; в) принципиальная схема записи осевого ГОЭ.

Принципиальная схема записи показана на рис.31, в. Ширина пучка лазерного излучения расширяется с помощью телескопической системы объективов 1 и 2. В фокальной плоскости объектива 1 установлено пинхол-отверстие диаметром 15 мкм для частотной фильтрации излучения. Конструктивная точка опорной волны формируется параболическим зеркалом, на расстоянии S_R от подложки с фотополимером, нанесенным на ее внешнюю сторону. Излучение отражается от сферического зеркала и проходит в обратном ходе через

фоточувствительный слой, формируя в нем объемную интерференционную картину.

Таблица 6. Параметры схемы записи осевого ГОЭ

	Параметр	Значение
Подложка	Материал	ВК7
	Толщина	2 мм
Регистрирующая среда	Материал	Bayfol HX200
	Толщина	16 мкм
	Чувствительность	30 мДж/см ²
Запись ГОЭ	Длина волны	514 нм
	Пинхол	15 мкм
	PR опора	0,2 мВт/см ²
	PO объект	0,1 мВт/см ²
	PR/PO	1/2
	Экспозиция	100 с
	S _R	41.85 мм
	S _O	48.25 мм

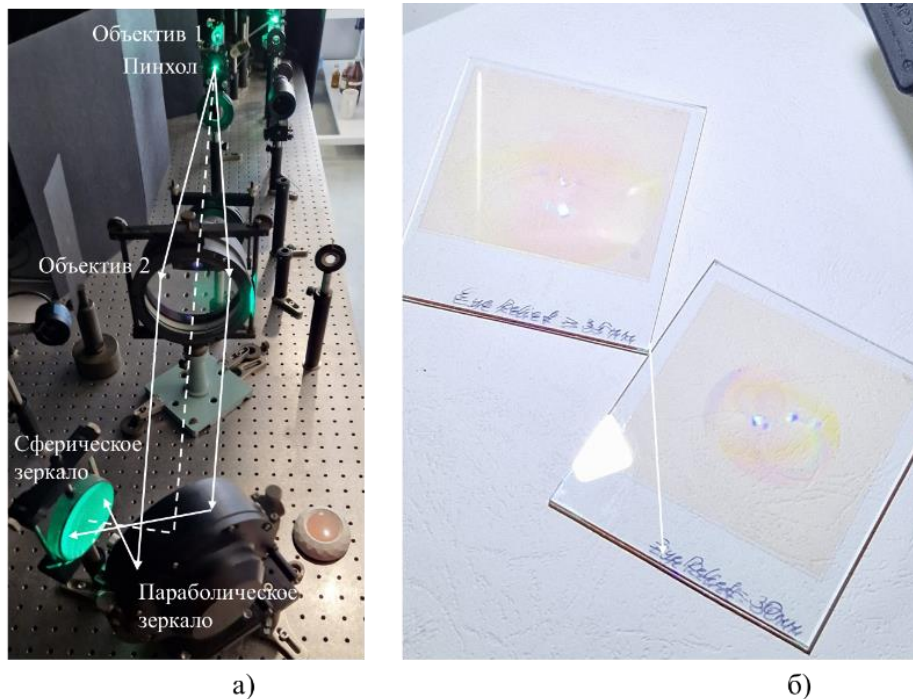


Рис.32. Схема записи осевого ГОЭ: а) схема установки; б) сформированные голограммы.

Согласно разработанной схеме, была собрана экспериментальная установка для записи осевых ГОЭ (рис.32, а). Для записи ГОЭ использовался лазер «Coherent Green 514-1000» с длиной волны 514 нм. Экспозиция для записи ГОЭ определялась согласно формуле:

$$E = \frac{S}{P_R + P_O}, \quad (3.29)$$

где S – чувствительность материала [$\text{мДж}/\text{см}^2$], P_R – мощность опорной волны, P_O – мощность объектной волны. Следуя расчетам и параметрам схемы, отображенным в *Таблице 6*, были записаны экземпляры осевых ГОЭ (рис.32, б).

3.6 Оптическая схема формирования направленного голографического диффузора

Для подтверждения работоспособности предложенной архитектуры очков ДР на основе осевого ГОЭ был записан НГД с заданным пространственным распределением. В качестве маски использовался шаблон пространственного разрешения стандарта USAF 1951 (United States Air Force 1951). Опорная волна в схеме записи представляет собой сферическую волну, освещающую НГД под углом β (рис.33). Лазерное излучение проходит через Объектив 1 (8х), при этом в его фокальной плоскости расположено пинхол отверстие диаметром 10мкм для осуществления частотной фильтрации излучения. Объектная волна образована проекционной системой диффузора. Для записи НГД использовался лазер «Coherent Green 514-1000» с длиной волны 514 нм. В объектной волне лазерный пучок расширялся с помощью Объектива 2 (10х), в фокальной плоскости которого было установлено пинхол отверстие размером 15 мкм для частотной фильтрации излучения. В качестве объекта в изображающей системе использовался диффузор, выполненный из стекла, с углом рассеяния 10° . Фокусное расстояние Объектива 3 составило $f' = 125$ мм, размер диффузора был 80х45 мм, угловое увеличение системы $w = 2.8$. Расстояние a определялось согласно формуле (3.23). Для снижения уровня паразитных засветок в схеме записи также использовалось нейтральное стекло марки «ИКС1», которое находилось в контакте с подложкой НГД и препятствовало отражению излучения от задней поверхности подложки. Параметры схемы записи представлены в *Таблице 7*. При данных условиях записи дифракционная эффективность (отношение энергии дифрагированного излучения к общей энергии излучения, падающего на голограмму) просветного НГД

составила 30%. При этом, благодаря использованию нейтрального стекла «ИКС1» в схеме записи, энергия шумовой засветки составила <4% от энергии «1» порядка дифракции.

Таблица 7. Параметры схемы записи НГД

	Параметр	Значение
Подложка	Материал	ВК7
	Толщина	2 мм
Регистрирующая среда	Материал	Bayfol HX200
	Толщина	16 мкм
Запись НГД	Чувствительность	30 мДж/см ²
	Длина волны	514 нм
	Пинхол	15мкм/10мкм
	PR опора	2,35 мВт/см ²
	PO объект	0,14 мВт/см ²
	PR/PO	16.7/1
Экспозиция	12 с	

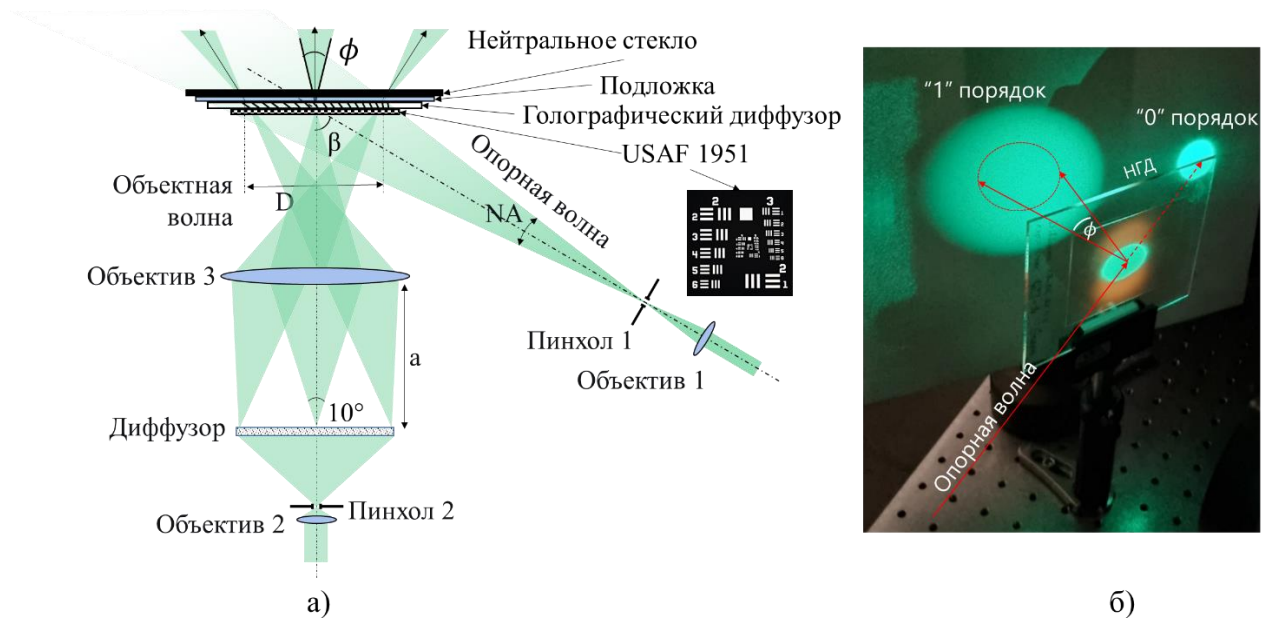


Рис.33. а) схема записи НГД; б) схема освещения НГД.

3.7 Экспериментальная установка очков ДР

На основе записанных элементов ГОЭ и НГД была собрана экспериментальная установка (рис.34, а). НГД освещался сферической волной, сформированной лазерным излучением ($\lambda=514$ нм) и объективом, под углом $\beta = 60^\circ$. НГД пропускал «нулевой» порядок дифракции, перенаправлял и преобразовывал излучение в «1» порядке дифракции. Осевой ГОЭ преобразовывал сферические пучки в параллельные, формируя виртуальное изображение на

бесконечности, наблюдаемое из плоскости выходного зрачка системы. При этом размер выходного зрачка определялся угловой апертурой ϕ НГД. На рис. 34, б показана схема освещения ГОЭ. Лазерный расходящийся пучок освещает НГД, который перенаправляет излучение в сторону осевого ГОЭ. Излучение дифрагирует на структуре ГОЭ и преобразуется из расходящихся сферических пучков в параллельные. Система формирует выходной зрачок более 10 мм. На рис.34 (б) показано, как выглядит выходной зрачок системы. При расположении глаза в плоскости выходного зрачка, пользователь наблюдает виртуальное изображение, показанное на рис.34 (в). Система формирует виртуальное изображение на бесконечности, в поле зрения 60° и с выходным зрачком, размером более 10мм [69,73,76].

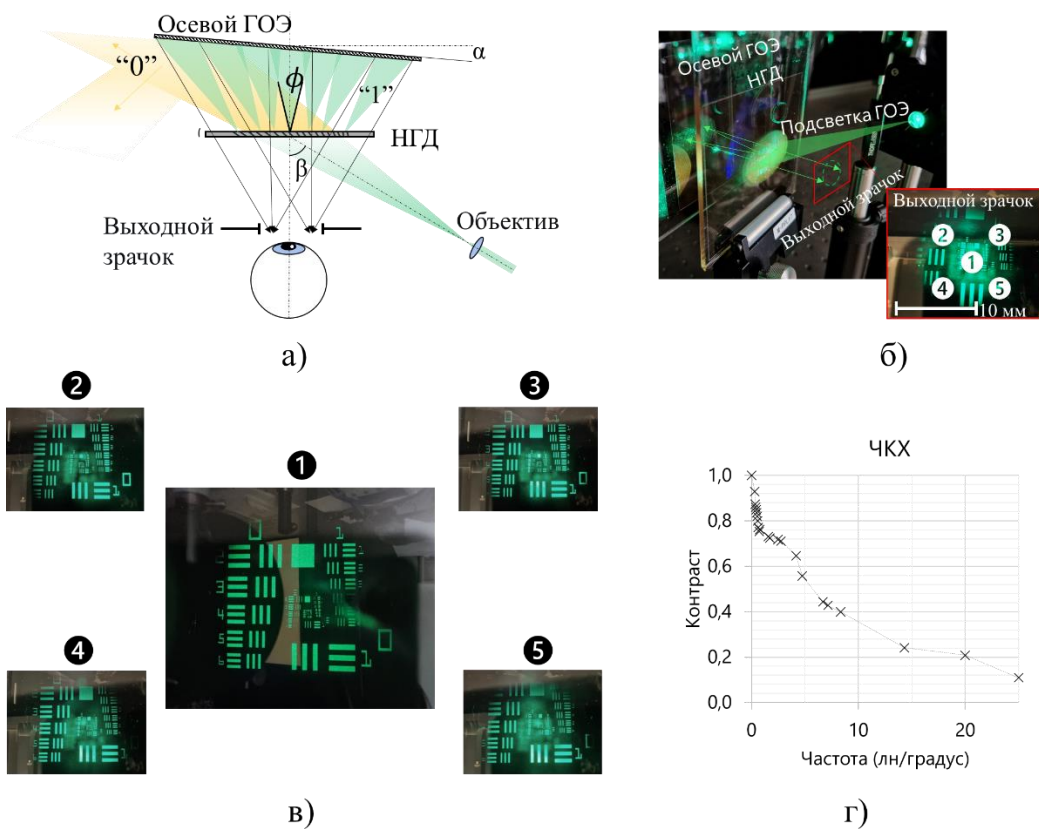


Рис. 34. Экспериментальная установка: а) принципиальная схема установки; б) схема подсветки НГД и ГОЭ, формируемый выходной зрачок с пятью зонами для анализа изображения; в) виртуальное изображение, наблюдаемое с разных позиций выходного зрачка системы; г) частотно-контрастная характеристика оптической системы очков ДР.

Выводы к главе 3

1. Выполнен анализ aberrаций в изображающих системах очков ДР на основе ГОЭ, который показал, что осевой ГОЭ порождает в >40 раз меньшие aberrации в изображающей системе, чем внеосевой ГОЭ;
2. Разработана оптическая система очков ДР на основе комбинации объемных ГОЭ;
3. Расчет и моделирование показали, что оптическая система очков ДР на основе комбинации осевого ГОЭ и внеосевого НГД обладает полем зрения 60° и выходным зрачком 10мм;
4. Разработаны схемы формирования голографических оптических элементов, а именно, широкоапертурной отражательной линзы и внеосевого направленного голографического диффузора;
5. Выполнена запись голографических оптических элементов, на основе которых собрана экспериментальная установка, подтверждающая формирование поля зрения 60° и выходного зрачка 10мм в голографических очках ДР.

Глава 4. УВЕЛИЧЕНИЕ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОЕКЦИОННОГО ДИСПЛЕЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВОДА С РАЗМНОЖЕНИЕМ ВЫХОДНОГО ЗРАЧКА

Схемы проекционных дисплеев (ПД) дополненной реальности на основе волноводных оптических элементов обладают рядом преимуществ, ключевыми из которых являются компактность и универсальность применения. Также, при малом объеме, устройство ПД способно сформировать поле зрения более 15° по горизонтали. Данное свойство особо полезно при внедрении проекционных дисплеев в транспортные средства (ТС), в которых ПД устанавливается в приборную панель, обладающую ограниченными размерами. Например, в работе [53] было показано, что объем ПД с использованием волновода имеет в 3.5 раза меньший объем по сравнению со стандартными схемами ПД. В данной главе будет рассмотрен метод формирования виртуального изображения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка, метод выбора параметров ДОЭ, а также метод увеличения поля зрения в системе ПД с формированием автостереоскопического 3D изображения.

4.1 Метод формирования виртуального изображения в системе ДР на основе волновода с размножением выходного зрачка

В секции 1.2.1 показан принцип работы очков дополненной реальности на основе волноводов с размножением выходного зрачка. Рассмотрим более подробно принцип размножения выходного зрачка с использованием дифракционных оптических элементов на примере ПД. Оптическая система устройства на основе волновода включает в себя дисплей, объектив, формирующий изображение на бесконечности, а также планарный волновод, который содержит вводной и выводной дифракционные оптические элементы (рис.35). Поле зрения, формируемое системой, определяется величиной углового изображения, формируемого системой дисплей + объектив. Период вводного ДОЭ выбирается таким образом, чтобы обеспечить распространение излучения внутри волновода в условиях полного внутреннего отражения. Период дифракционных решеток

выводного элемента, обычно имеет такой же период, что и вводной элемент. Однако выводной элемент разбивается на элементарные решетки с разной дифракционной эффективностью (ДЭ). ДЭ для каждой решетки увеличивается по мере распространения излучения, таким образом при каждом взаимодействии с ДОЭ – выводится излучение одинаковой мощности. Вследствие этого, виртуальное изображение обладает высокой степенью однородности [77]. На рис. 35 представлена схема размножения зрачка вдоль одной оси. Однако, поскольку источником изображения в данной схеме является микродисплей, то оптическая система объектива формирует зрачок величиной менее 10 мм, в дисплеях дополненной реальности требуется размножение зрачка по двум осям, которое может быть выполнено последовательно – сначала по одной оси, затем по перпендикулярной ей [78]. Или же, могут использоваться системы с размножением по двум осям одновременно [79].

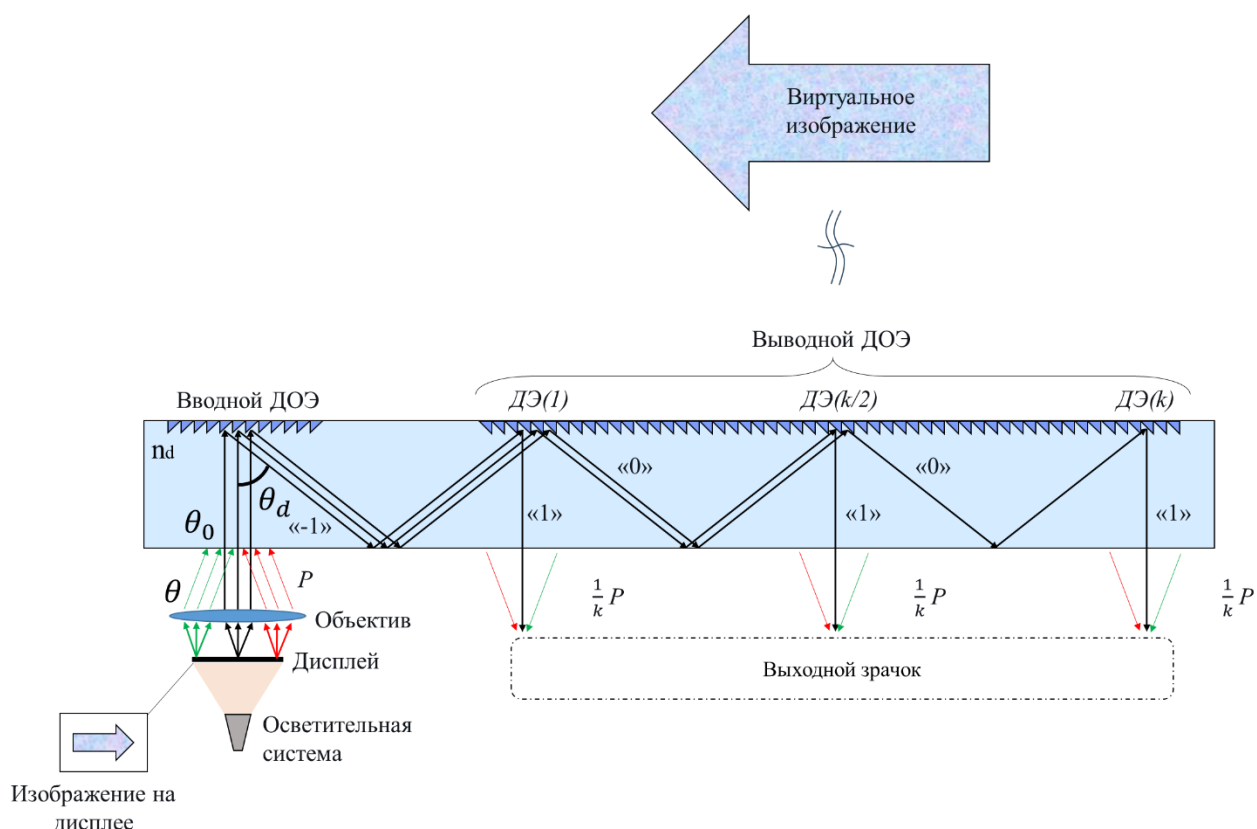


Рис.35. Принципиальная схема формирования виртуального изображения в волноводе с размножением выходного зрачка, обеспеченного элементами ДОЭ.

Таким образом, изображение в системе на основе волновода с размножением выходного зрачка формируется изображающей системой, источником изображения в которой является микродисплей (LCD, LCOS, DLP и др.). Объектив представляет собой оптическую систему окуляра с выносом выходного зрачка. Система формирует угловое изображение, при этом мощность излучения равна P . Плоскость вводного элемента ДОЭ совпадает с положением выходного зрачка проектора. Планарные пучки дифрагируют на поверхности вводного ДОЭ и отражаются от поверхностей волновода в условиях полного внутреннего отражения. Распространяясь внутри плоского волновода, планарность изображающих пучков не нарушается. После нескольких отражений излучение достигает выводного элемента ДОЭ, который сегментирован на дискретные элементы ДОЭ, обладающие разной дифракционной эффективностью. При взаимодействии с дискретным ДОЭ излучение дифрагирует и, таким образом, в зависимости от параметра дискретной ДОЭ выводится только часть излучения, а оставшаяся часть продолжает распространение внутри волновода. Дифракционная эффективность для дискретных ДОЭ выбирается таким образом, чтобы при каждом взаимодействии с решеткой выводилось излучение мощностью P/k , где k – количество отражений в системе. Таким образом, система формирует выходной зрачок, который в k раз больше, по сравнению с изначальным. Поскольку из волновода выводятся параллельные пучки, виртуальное изображение формируется на бесконечности.

4.2 Параметры ДОЭ

Дифракционная эффективность дискретных решеток ДОЭ рассчитывается согласно уравнению:

$$C_{i-1} = \frac{C_i(1-\alpha)}{1+C_i(1-\alpha)}, \quad (4.1)$$

где C – дифракционная эффективность, i – номер дискретной решетки ДОЭ, α – потери, возникающие в материале при распространении излучения. Размер и

количество дифракционных решеток для выводного элемента выбирается исходя из геометрии устройства ДР [80].

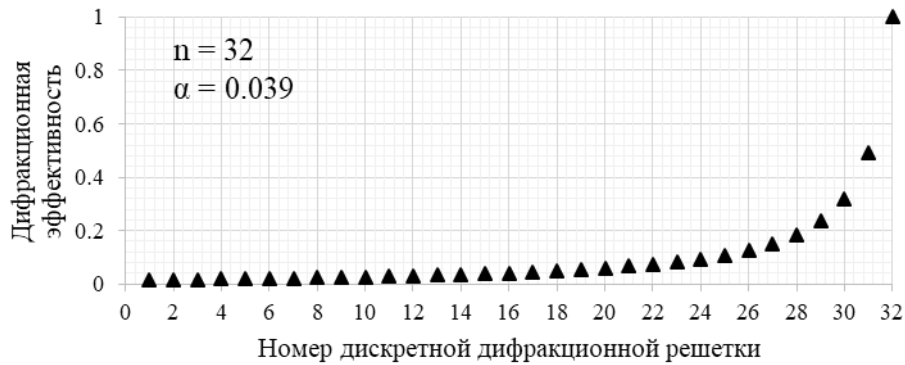


Рис.36 Дифракционная эффективность 32-х дискретных ДОЭ в волноводе с размножением выходного зрачка.

Стоит учитывать, что формула (4.1) подходит только выполнения расчетов для одного углового направления излучения. Каждому угловому направлению распространения излучения внутри волновода соответствует свой уровень потерь. Поскольку чем длиннее оптический путь, тем больше ослабляется энергия излучения (рис. 37).

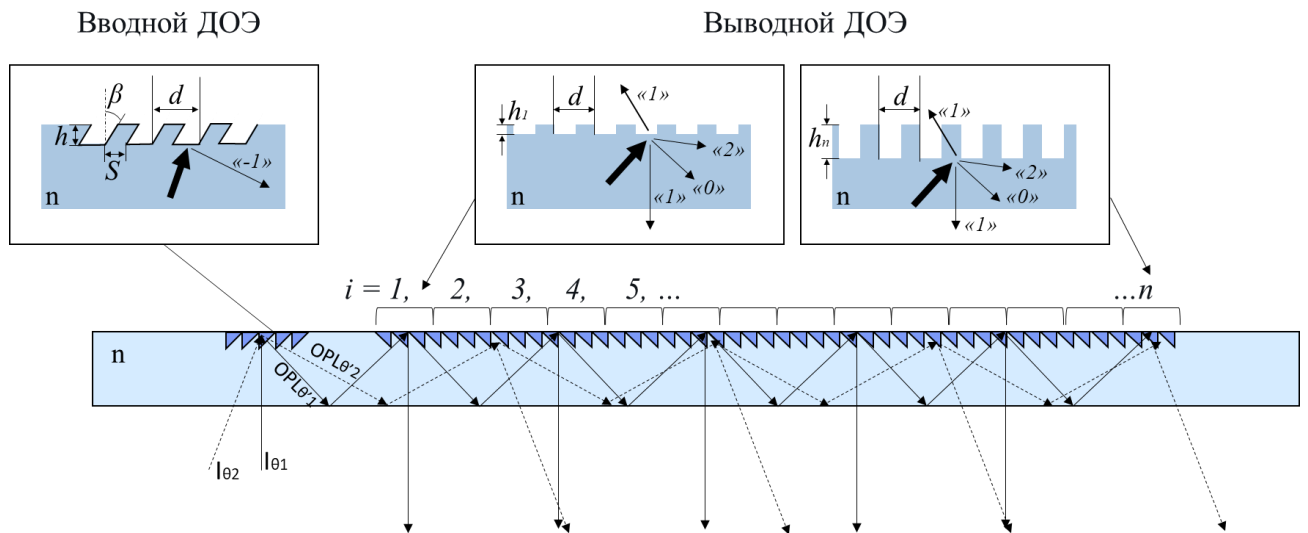


Рис.37. Ввод, вывод и распространение излучения внутри волновода с дифракционными оптическими элементами.

Вводные и выводные элементы ДОЭ имеют разную дифракционную эффективность, которая достигается путем изменения высоты рельефа решеток h , скважности S , а также углом наклона дифракционных структур β (рис.37) [81]. В

волноводах с размножением выходного зрачка используются ДОЭ, которые могут работать на отражение или на пропускание. Однако, более эффективными являются отражательные решетки, особенно для ввода излучения. Вводной ДОЭ может быть выполнен с наклоном дифракционных структур (рис.37), что способствует увеличению ДЭ, а также дополнен отражательным покрытием, способствующим увеличению ДЭ до 100% «-1» порядка дифракции [20]. Выводные элементы чаще представляют собой бинарные решетки (рис.36), при этом ДЭ определяется высотой дифракционных структур h , которая увеличивается по мере распространения излучения в волноводе. При этом на бинарных ДОЭ может возникать дифракция в нескольких порядках (рис.37), которую также необходимо учитывать при расчете и оптимизации параметров ДОЭ для достижения однородного вывода излучения. Уравнение дифракции представляет собой выражение [82]:

$$n_d \sin(\theta_d) - n_0 \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{d}, \quad (4.2)$$

где n_d – показатель преломления среды, в которой возникает дифракция, θ_d – угол дифракции, n_0 – показатель преломления среды до дифракции, θ_0 – угол падения излучения, $m = 0, \pm 1, \pm 2..$ – порядок дифракции, d – период дифракционной решетки. При выборе периода дифракционной решетки, необходимо учитывать параметры системы, а именно поле зрения, которое должен обеспечить волновод. Для этого можно определить верхнюю и нижнюю границу пропускания излучения длины волны λ в волноводе с показателем преломления n_d . Пусть излучение падает на поверхность волновода под углом θ (рис.35). Определим максимально допустимый угол дифракции $\theta_{dmax}=70^\circ$. Тогда, согласно уравнению (4.2), а также (1.2)-(1.3) верхнюю и нижнюю границу угла θ можно определить, согласно выражению:

$$1 - \frac{\lambda}{d} < \theta < n_d \sin(\theta_d \max) - \frac{\lambda}{d}. \quad (4.3)$$

Системы ДР с использованием волновода с размножением выходного зрачка могут быть монохромными и полихромными. Рассмотрим случай, когда для

получения RGB изображения в системе используются 3 длины волны: $\lambda_1 = 462\text{нм}$, $\lambda_2 = 520\text{нм}$, $\lambda_3 = 635\text{нм}$, при этом для каждого спектра используется отдельный волновод, выполненный из оптического стекла BASF64. Тогда, согласно выражению (4.3), доступное поле зрения пропускаемое внутри волновода составляет порядка $FOV < 30^\circ$ (рис.38). Период дифракционных решеток выбирается исходя из параметров оптической системы проектора. Для проекторов с симметричным полем зрения период дифракционной решетки d выбирается таким, чтобы он обеспечил прохождение излучения и формирование виртуального изображения с таким же полем зрения. На рис.38 отмечены периоды дифракционных решеток для каждого волновода, обеспечивающие пропускание углового изображения с симметричным полем зрения.

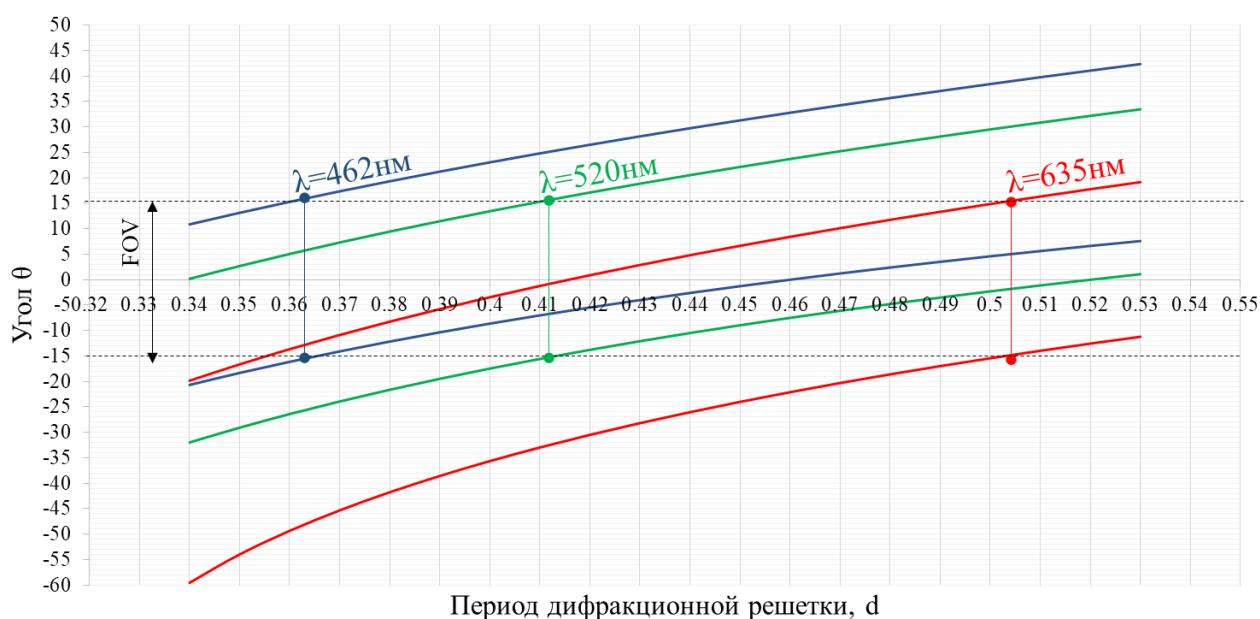


Рис.38. Зависимость предельных значений угла ввода излучения в волновод θ , определяющие значение максимально достижимого поля зрения в системе на основе волновода с размножением выходного зрачка.

На рис.35,37 показано схематичное размножение зрачка вдоль одной оси. Для систем, в которых требуется формирование большого выходного зрачка (например, для проекционных дисплеев выходной зрачок составляет более 120x60мм) необходимо применять размножение зрачка по двум осям. Для этого сначала выполняется размножение вдоль одной оси, с помощью ДОЭ2, а затем

размножение вдоль перпендикулярной оси и вывод излучения с помощью ДОЭЗ (рис.39).

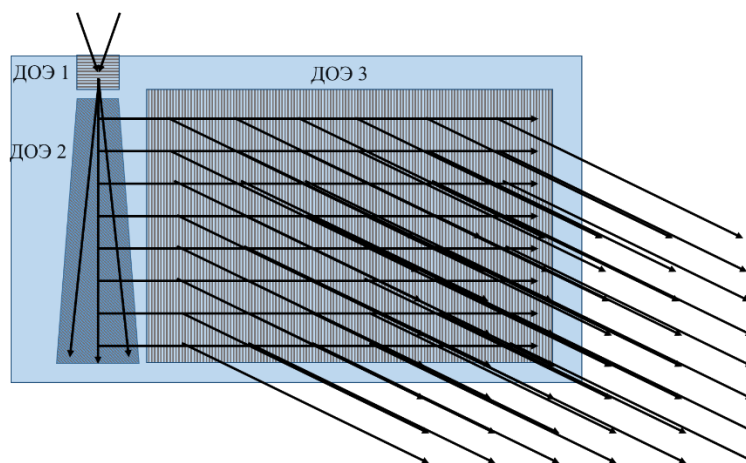


Рис.39. Размножение выходного зрачка вдоль двух осей.

Период вводного ДОЭ1 и выводного ДОЭ3 выбирается одинаковым, а ориентация решеток может быть выбрана таким образом, что если излучение вводится в волновод под углом θ , то выводится под углом $-\theta$. Ориентация и период ДОЭ2 в волноводе типа, как на рис. 39, выбираются такими, чтобы обеспечить поворот излучения внутри волновода на 90° .

4.3 Принцип формирования автостереоскопического 3D изображения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка

Формирование автостереоскопического 3D изображения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка осуществляется путем дополнения системы двумя оптическими модулями, способствующими формированию в плоскости выходного зрачка двух зон видения (ЗВ) (для левого и правого глаза), в каждой из которой наблюдается соответствующее изображение [83-84]. Первый – модуль формирования автостереоскопических изображений (МФАИ) - представляет собой компактную оптическую систему, которая формирует как минимум 2 виртуальных изображения с одинаковым полем зрения, расположенных на бесконечности и наблюдаемых в пределах одного выходного зрачка. Второй - модуль формирования зон видения (МФЗВ) - представляет собой оптическую систему, осуществляющую разделение излучения для левого и правого

глаз в плоскости выходного зрачка устройства ПД. Формирование зон видения и разделение излучения для правого и левого глаза могут осуществляться по одному из нескольких параметров. Например, по длине волны излучения – в данном случае МФАИ формирует изображения для левого и правого глаза, отличающиеся по длине волны, а МФЗВ формирует зоны видения, в каждой из которых наблюдается изображение определенного спектра. Или же система может быть динамической – формирование виртуальных изображений МФАИ для левого и правого глаза, а также разделение излучения модулем МФЗВ осуществляется в последовательном режиме, таким образом, правый и левый глаз наблюдает виртуальное изображение поочередно. Оптическая система с динамическим способом формирования автостереоскопических изображений представлена на рис. 40 [83].

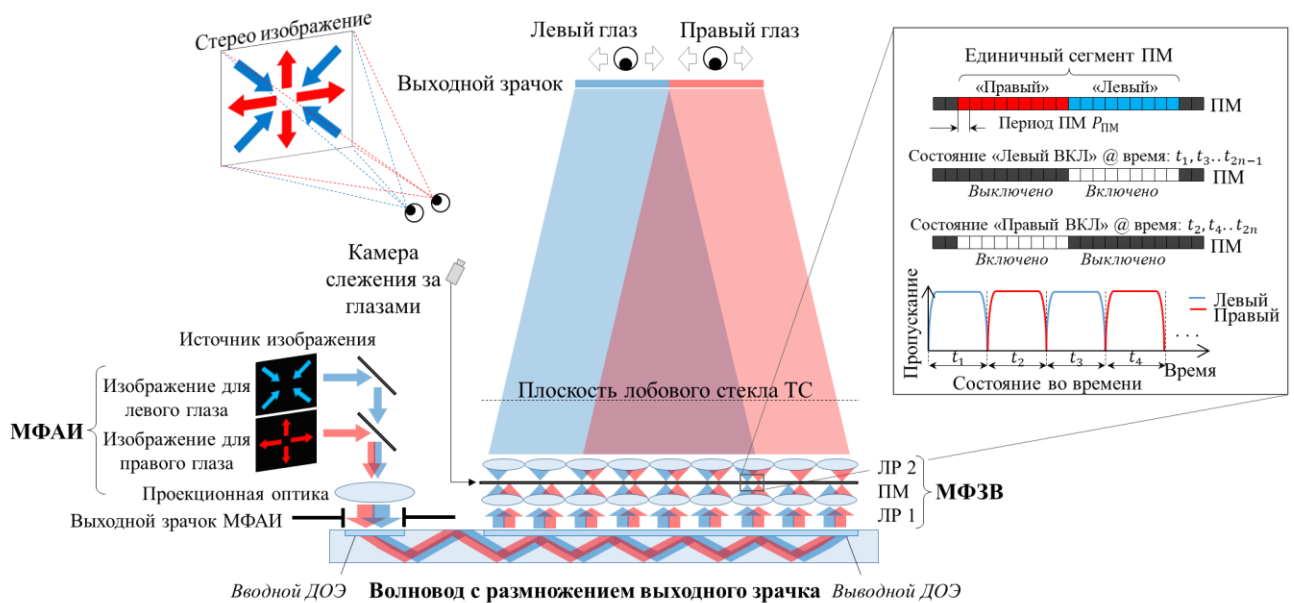


Рис.40 Оптическая система ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка, дополненная модулями МФАИ и МФЗВ для динамического формирования автостереоскопического 3D изображения.

МФЗВ представляет собой тонкий оптический модуль, расположенный после выводного ДОЭЗ, состоящий двух линзовых растров (ЛР1 и ЛР2) и пространственной маски, расположенной между ними. Комбинация ЛР1 и ЛР2 образует телескопическую оптическую систему, которая сохраняет расположение виртуального изображения на бесконечности и имеет увеличение $M_{ЛР}=1$ [83]. ЛР1

и ЛР2 могут быть как сферическими, так и цилиндрическими. Для формирования ЗВ в горизонтальном направлении достаточно использовать цилиндрические линзовые растры. Пространственная маска (ПМ) представляет собой тонкий слой поглощающего материала с интегрированными в нее сегментами фильтров, которые пропускают излучения, в зависимости от выбранного способа разделения излучения для зон видения (по длине волны, или по времени). Размер каждого сегмента фильтра соответствует величине единичного канала системы линзовых растров ЛР1+ЛР2. Количество фильтров в каждом сегменте соответствует количеству зон видения, формируемых в плоскости выходного зрачка системы ПД. В схеме, представленной на рис.40, формируется две динамические зоны видения – для левого и правого глаза. Таким образом для каждого сегмента ПМ необходимо два пропускающих фильтра. В динамической схеме (рис.40), 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 пропускания излучения для левой и правой ЗВ. ПМ расположена в оптически сопряженной плоскости с выходным зрачком ПД (рис.41, а) относительно ЛР2. Также данная система подразумевает синхронизацию выходного сигнала ПМ и МВАИ таким образом, чтобы при выводе изображения для одного глаза, соответствующие пиксели ПМ переходили в состояние «ВКЛ». Поскольку в данной системе используется динамическая ПМ, то ЗВ можно сдвигать вдоль оси X согласно данным о расположении глаз пользователя, полученным с помощью системы слежения за глазами. В случае динамической системы изображение, выводимое на ПМ, представляет собой полосы белого цвета, при этом количество полос соответствует количеству линзовых растров в системе МФАИ, а положение и ширина полос определяются исходя из расположения и размера зон видения в плоскости выходного зрачка (рис.41, в).

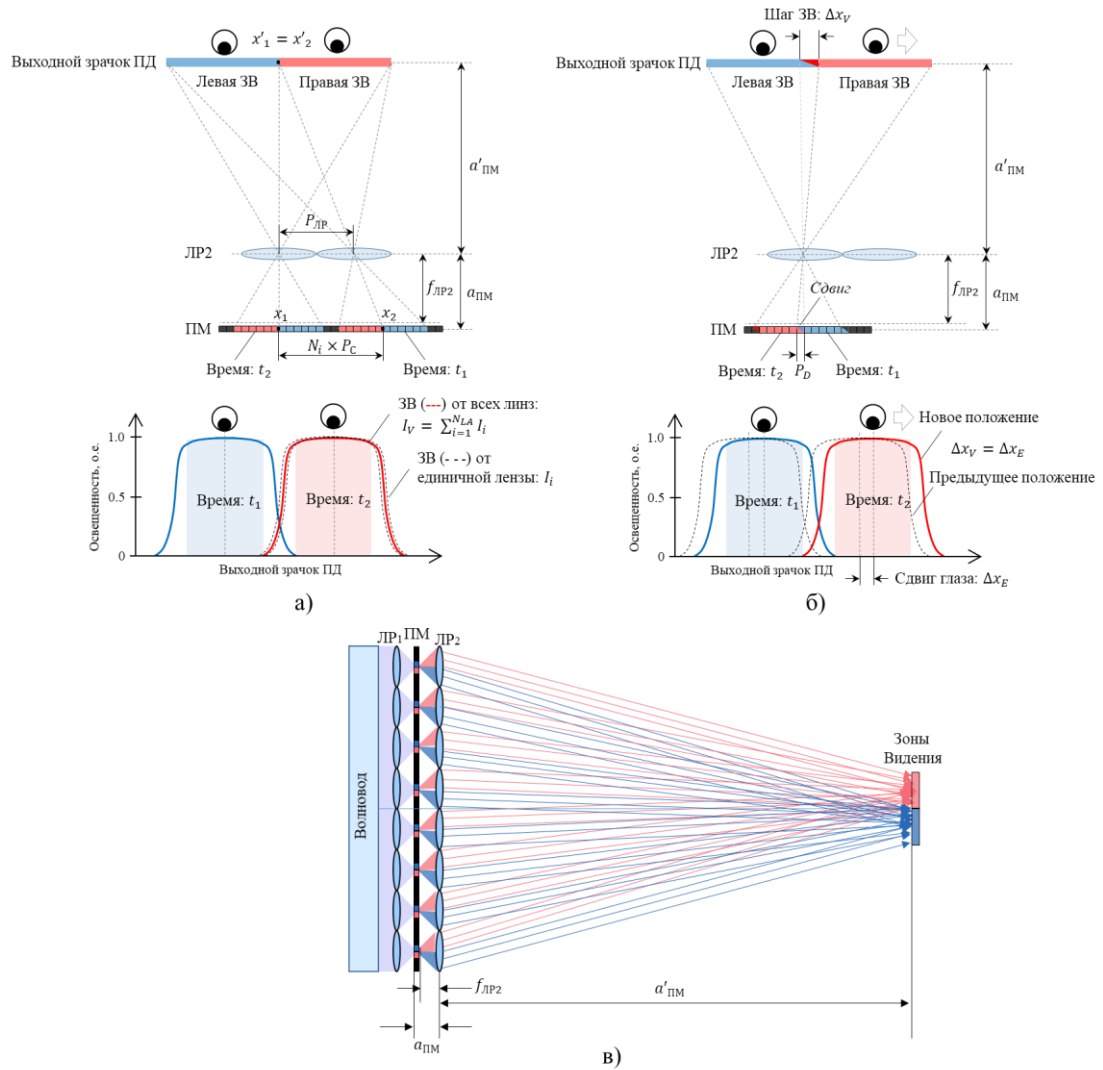


Рис.41. Определение периода ПМ: а) статичный период $P_{ЛР}$ для формирования ЗВ в плоскости выходного зрачка ПД; б) динамический период P_D , используемый для сдвига зон видения ЗВ при смещении глаз; в) оптическая система, формирующая зоны видения, путем формирования «изображения» ПМ в оптически сопряженной плоскости – плоскости выходного зрачка.

ПМ характеризуется размером и количеством пикселей. Для того, чтобы сформировать ЗВ от всех сегментов ПМ в одной позиции, статический период P_c должен быть согласован с периодом линзового растра. Поэтому, необходимо выполнение следующего условия:

$$N_{Pi} \cdot P_c = i \cdot (1 + 1/M_{ЛР2}), \text{ для } i \in [1..N_{ЛР}], \quad (4.4)$$

где N_{Pi} обозначает целое число, $1/M_{ЛР2} = a_{ПМ} / a'_{ПМ}$ - величина, обратная увеличению элемента ЛР2, и $N_{ЛР}$ – количество линз в линзовом растре ЛР2. Единичная ЗВ представляет собой освещенную область, образованную путем пропускания

излучения всеми сегментами ПМ и прохождения излучения через каждую линзу ЛР2. При этом для формирования ЗВ, необходимо, чтобы координата x_1, x_2 соответствовали x'_1, x'_2 , как показано на рис.41, а. Минимальный шаг сдвига ЗВ Δx_V в плоскости выходного зрачка ПД также связан с увеличением системы ПМ+ЛР2, и можно определить динамический сдвиг маски P_D как:

$$P_D = \Delta x_V / M_{ЛР2}. \quad (4.5)$$

Тогда минимальный период ПМ P можно определить, как наибольший общий делитель для P_C и P_D .

4.4 Увеличение поля зрения в системе ПД. Параметры МФЗВ

Увеличение поля зрения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка и с дополнительными модулями МФАИ и МФЗВ может быть выполнено двумя способами. Один способ заключается в увеличении поля зрения системы МФАИ, а также в выборе соответствующих параметров ДОЭ волновода. Другой способ заключается в модификации модуля МФЗВ. В главе 4.3 описана система, в которой увеличение телескопической системы линзовых растров $M_{ЛР}=1$. Если увеличение системы $M_{ЛР}>1$, то итоговое поле зрения системы ПД будет увеличено соответственно [85]. Для выбора оптимального значения увеличения $M_{ЛР}$ и параметров линзовых растров в конкретной системе необходимо выполнить анализ энергетических потерь, возникающий за счет виньетирования излучения на апертурах линзовых растров.

Оптическая система ПМ + ЛР2 + Выходной зрачок ПД (рис.41, а) связана выражением:

$$a_{ПМ} = a'_{ПМ} / M_{ЛР2} \quad (4.6)$$

где $M_{ЛР2}$ определяется выражением (4.5), а расстояние $a'_{ПМ}$ есть вертексное расстояние системы – расстояние от ЛР2 до выходного зрачка ПД (рис.41, а). Таким образом, фокусное расстояние для ЛР2 определяется выражением:

$$f_{ЛР2} = a_{ПМ} \cdot a'_{ПМ} / (a_{ПМ} + a'_{ПМ}) . \quad (4.7)$$

Период линзовых растров $P_{ЛР}$ и фокусное расстояние $f_{ЛР2}$ связаны с параметрами линзовых растров выражениями:

$$P_{LP} = f_{LP2} / F\#_{LP2} , \quad (4.8)$$

$$f_{LP2} = f_{LP2} \cdot M_{LP} . \quad (4.9)$$

Поле зрения, формируемое волноводом FOV_{IN} и поле зрения, формируемое системой ПД FOV_{OUT} связаны соотношением:

$$FOV_{OUT} = FOV_{IN} \cdot M_{LP} . \quad (4.10)$$

Оценку энергетической эффективности системы можно выполнить исходя из геометрических параметров системы линзовых растров (рис.42, а). Относительное количество прошедшей энергии можно оценить, используя выражение (4.15):

$$p_1 = -P_{LP} / 2 , \quad p_2 = P_{LP} / 2 \quad (4.11)$$

$$p_0 = f_{LP1} \cdot \tan(FOV_{IN} / 2) \quad (4.12)$$

$$p_1' = p_0 + f_{LP2} \cdot \tan(\tan^{-1}(p_0 - p_1 / f_{LP1})) \quad (4.13)$$

$$p_2' = p_0 + f_{LP2} \cdot \tan(\tan^{-1}(p_2 - p_0 / f_{LP1})) \quad (4.14)$$

$$ET = (P_{LP} / 2 + p_1') / (p_1' + p_2') \quad (4.15)$$

Если в качестве ПМ используется LCD-матрица, то ЛР2 должен обладать таким относительным отверстием, чтобы обеспечить необходимое разрешение оптической системы, в которой критерием выступает размер пикселя LCD матрицы. Диаметр диска Эйри для ЛР2 определяется выражением:

$$\varnothing_{Эйри} = 2.44 * \lambda * F\#_{LP2} \quad (4.16)$$

Таким образом, согласно выражению (4.15), если размер пикселя динамической ПМ равен 45 мкм (BOE RV101FBB-N00), то для RGB системы с длинами волн $\lambda 1=462\text{нм}$, $\lambda 2=520\text{нм}$, $\lambda 3=635\text{нм}$, относительное отверстие ЛР2 должно быть $F\#_{LP2} < 1.8$.

Пусть итоговое поле зрения ПД составляет $FOV_{OUT} = 20^\circ \times 7^\circ$. Тогда, согласно расчетам по формулам (4.11) - (4.15), при увеличении системы $M_{LP}=1$, энергетическая эффективность системы будет составлять лишь 30% (рис.42, б). Теоретически можно достичь энергетической эффективности 70% при $M_{LP}=3$. Однако, в данном случае фокусные расстояния линзовых растров будут иметь значительную разницу, что может привести к сложным формам оптических

поверхностей ЛР1 и ЛР2. Поэтому, в качестве оптимального параметра для дальнейшего анализа было выбрано увеличение $M_{ЛР}=1.6$.

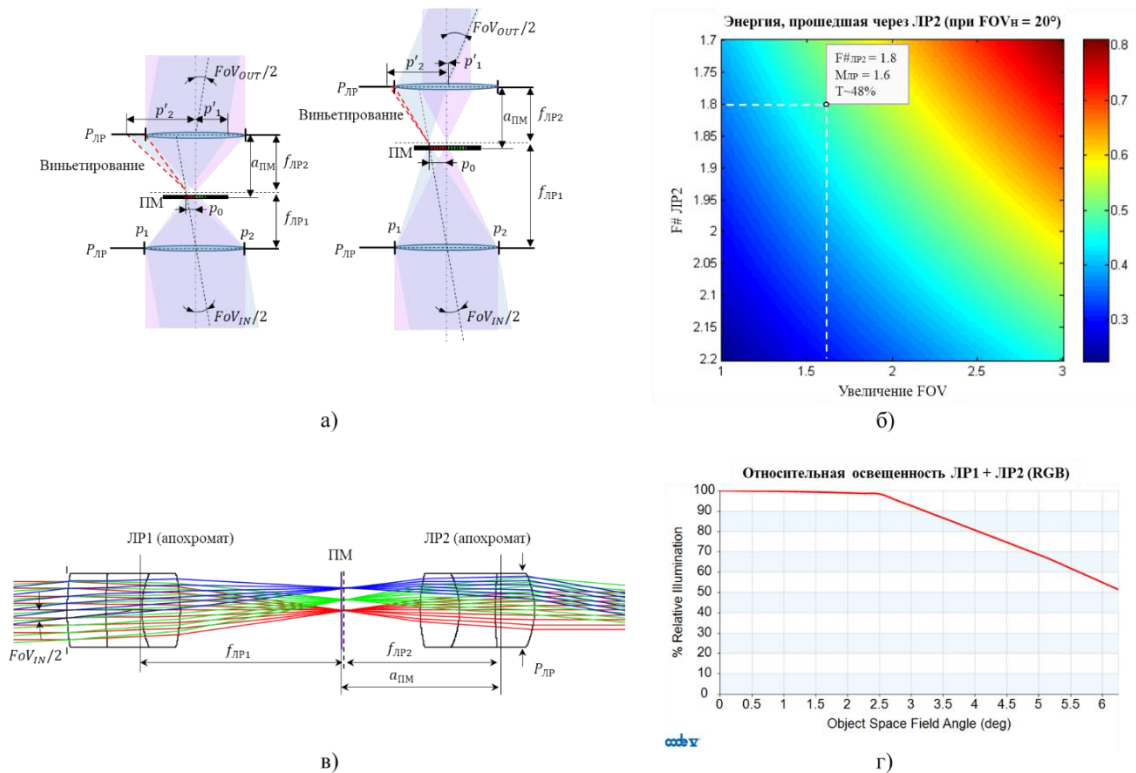


Рис.42. а) принцип изменения поля зрения в системе, путем увеличения $M_{ЛР}$; б) энергетическое пропускание телескопической системы линзовых растров в зависимости от увеличения $M_{ЛР}$ для горизонтального поля FOV=20°; в) телескопическая система единичного канала линзовых растров с увеличением $M_{ЛР}=1,6$; г) относительная освещенность телескопической системы линзовых растров при $M_{ЛР}=1,6$.

Согласно вышеуказанным выражениям, были рассчитаны параметры оптической системы, значения которых приведены в Таблице 8.

Таблица 8. Параметры оптической системы МФЗВ

Параметр	Величина
FOV _{IN}	12.5°
FOV _{OUT}	20°
Размер Пикселя ПМ	45 мкм
$f_{ЛР1}$	11.882 мм
$f_{ЛР2}$	7.426 мм
$R_{ЛР}$	4.125 мм
$M_{ЛР}$	1.6
Спектр	462 нм, 520 нм, 635 нм

Согласно требуемым параметрам (Таблица 8) в программном обеспечении CodeV был выполнен расчет телескопической оптической системы единичного канала линзовых растров (рис.42, в). Согласно результатам моделирования, данная оптическая система обеспечивает относительную освещенность более 48% (рис.42, г), что сходится с расчетом энергетической эффективности системы (рис.42, б).

Таким образом увеличение поля зрения оптической системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка и с формированием автостереоскопических изображений, может быть достигнуто путем изменения углового увеличения оптической системы МФЗВ. Предложенный подход также способствует увеличению энергетической эффективности системы.

4.5 Параметры МФАИ

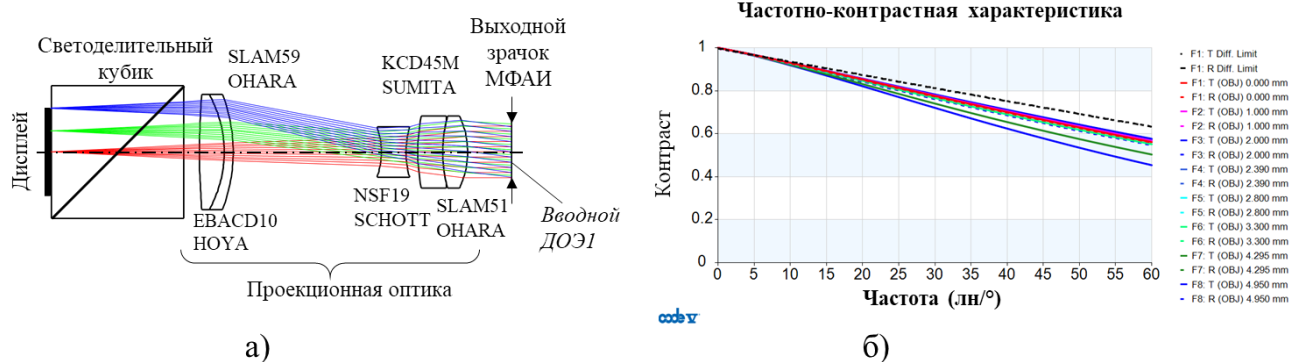


Рис.43. МФАИ: а) проекционная оптическая система дисплея; б) частотно-контрастная характеристика.

В соответствии с расчетами, приведенными в секции 4.4, поле зрения виртуального изображения на выходе волновода должно составлять $FOV_{IN} = 12.5^\circ \times 7^\circ$. Поэтому, оптический модуль МФАИ должен также формировать угловое изображения в пределах поля зрения $FOV_{IN} = 12.5^\circ \times 7^\circ$. В программе CodeV был выполнен расчет оптической системы проекционной системы дисплея с вынесенным выходным зрачком диаметром 6.65 мм. В данной системе используется дисплей отражательного типа LCOS HED-5201 с разрешением 1280x720, размером пикселя 9.6 мкм и эффективностью 63%. Оптическая система также дополнена поляризованным светоделительным кубиком для освещения

LCOS дисплея. Оптическая система имеет контраст $>40\%$ для частот диапазона до $60 \text{ лн}/^\circ$, что соответствует угловому разрешению глаза (1 угловая минута) (рис.43).

Осветительная система данной оптической системы может представлять собой стандартную схему, показанную на рис.44. В качестве примера, такая система может включать в себя лазерные диоды ($\lambda_1=462\text{нм}$, $\lambda_2=520\text{нм}$, $\lambda_3=635\text{нм}$), комбайнер (объединитель) излучения (RGB beam combiner), коллимационную линзу, подавитель спеклов с углом рассеяния 6° , линзу и светоделительный кубик, отображенный также на рис.43, а. Представленная осветительная система обладает эффективностью 10% (Таблица 9).

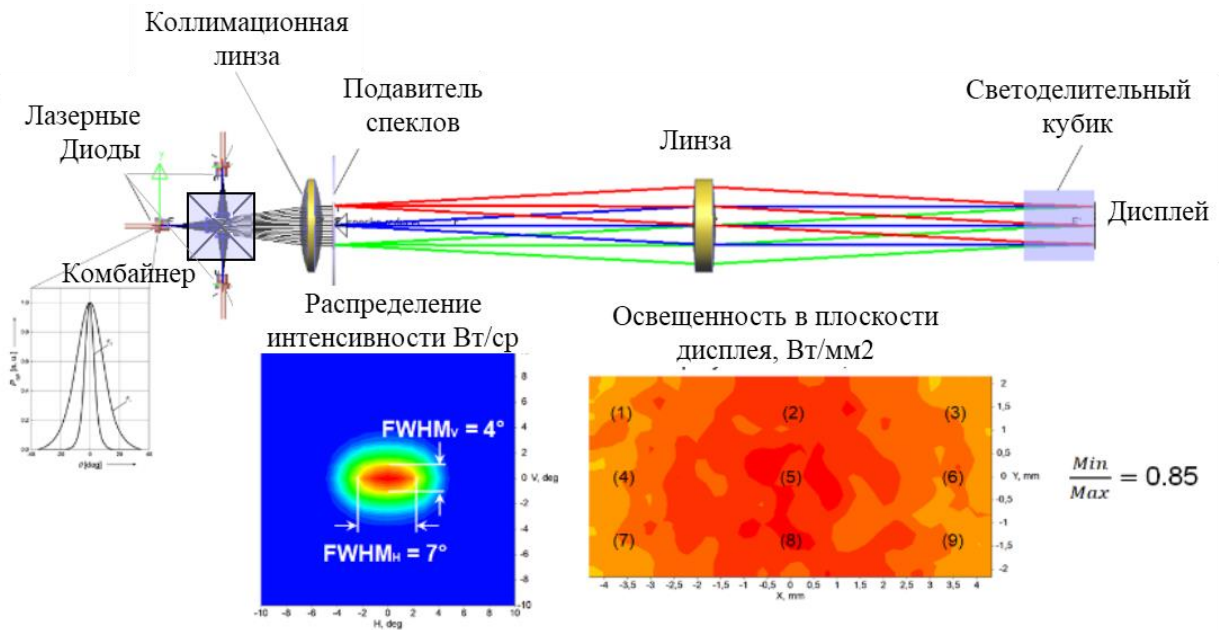


Рис. 44. Осветительная система дисплея в МФАИ.

Таблица 9. Параметры МФАИ

Параметр	Значение
FOV	$12.5^\circ \times 7^\circ$
Разрешение оптической системы МФАИ	$60 \text{ лн}/^\circ$
Длина волны источников освещения	$\lambda_1=462\text{нм}$, $\lambda_2=520\text{нм}$, $\lambda_3=635\text{нм}$
Разрешение LCOS	$1280 \times 720 \text{ px}$
Размер LCOS	$12.29 \times 6.37 \text{ mm}$
Коэффициент отражения LCOS	63%
Эффективность осветительной системы	10%
Однородность осветительной системы	85%
Эффективность МЗВИ	5.35%

4.6 Параметры волновода с размножением выходного зрачка.

Геометрические параметры волновода выбираются исходя из требуемых значений по формируемому полю зрения системы. Поскольку угловое увеличение МФЗВ составляет $M=1.6$, а поле зрения формируемое ПД $FOV_{OUT} = 20^\circ \times 7^\circ$, то на выходе волновода поле зрения должно быть $FOV_{IN} = 12.5^\circ \times 7^\circ$. Выходной зрачок систем ПД обычно имеет значения порядка 130×60 мм. Расстояние от волновода до выходного зрачка зависит от параметров ТС. В данной системе выбрано усредненное значение расстояние $l=800$ мм. Размеры выводного элемента ДОЭЗ выбираются, исходя из параметров поля зрения системы и величины выходного зрачка. Так, для данной системы ширина и высота ДОЭЗ определяются согласно выражениям:

$$w_{ДОЭЗ} = w_{EB} + 2 \cdot l \cdot \tan(HFOV_{IN} / 2) \quad (4.17)$$

$$h_{ДОЭЗ} = h_{EB} + 2 \cdot l \cdot \tan(VFOV_{IN} / 2) \quad (4.18)$$

где $w_{ДОЭЗ}$ и $h_{ДОЭЗ}$ – ширина и высота выводного элемента ДОЭЗ, w_{EB} и h_{EB} – ширина и высота выходного зрачка системы ПД, l – расстояние от выходного зрачка до волновода, $HFOV_{IN}$ и $VFOV_{IN}$ – горизонтальное и вертикальное поле зрения системы ПД. Таким образом, выводной элемент ДОЭЗ должен иметь размеры 412×158 мм.

Размеры элемента ДОЭ2 определяются, исходя из поля зрения, пропускаемого через волновод, соответственно необходимо учитывать показатель преломления подложки волновода:

$$h_{ДОЭ2} = h_{ДОЭЗ} + 2 \cdot w_{ДОЭЗ} \cdot \tan(VFOV_{IN} / 2 \cdot n) \quad (4.19)$$

$$w_{\max ДОЭ2} = w_{\min ДОЭ2} + 2 \cdot h_{ДОЭ2} \cdot \tan(HFOV_{IN} / 2 \cdot n) \quad (4.20)$$

где $w_{\max ДОЭ2}$, $w_{\min ДОЭ2}$ и $h_{ДОЭ2}$ – ширина и высота элемента ДОЭ2. Таким образом, высота ДОЭ2 должна составлять не менее 187.5 мм, а ширина не менее 34 мм. Однако, следует выбрать ширину и высоту с некоторым пространственным запасом, поэтому в данной системе $h_{ДОЭ2}=197.5$ мм, $w_{ДОЭ2}=10.42$ мм. Размеры вводного ДОЭ1 составляют 6.65×6.65 мм, согласно диаметру выходного зрачка проекционной системы дисплея. Таким образом, посредством использования трех

дифракционных оптических элементов, выполняется размножение выходного зрачка по двум осям. В *Таблице 10* и на рис.45, а отражены геометрические параметры волновода с размножением выходного зрачка для данной системы ПД. Для формирования полихромного RGB изображения используется 3 отдельных волновода для каждого спектра (рис.45, б). Материал волноводов выбран BASF64, толщина волновода 3 мм.

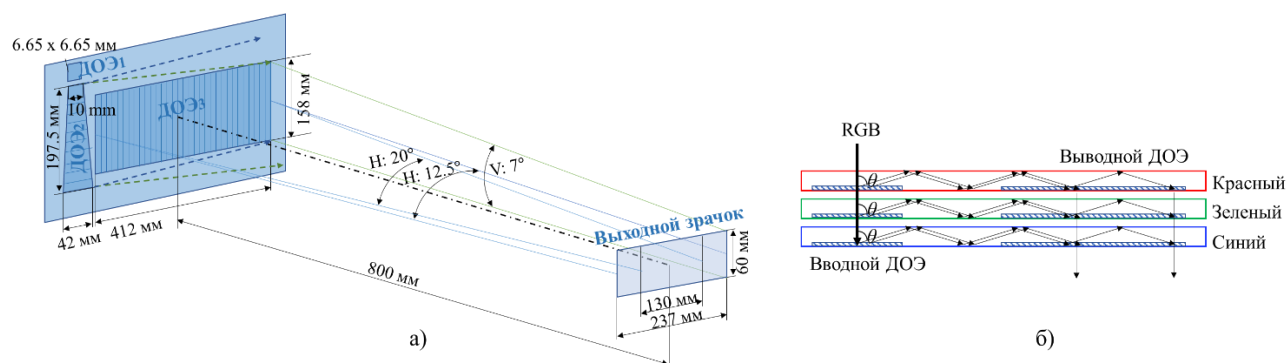


Рис.45. Геометрические параметры волновода с размножением выходного зрачка.

Таблица 10. Геометрические параметры волновода

Параметр	Значение
FOV	20°x7°
l	800 мм
Выходной зрачок ПД	130 мм x 60 мм
ДОЭ1	6.65 мм x 6.65 мм
ДОЭ2	10 мм...42 мм x 194.5 мм
ДОЭ3	412 мм x 158 мм
Толщина	3 мм
Материал	BASF64

4.7 Параметры ДОЭ в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка

Несмотря на то, что геометрические параметры волновода были выбраны для поля зрения $FOV_{OUT} = 20^\circ \times 7^\circ$ (рис.45), параметры дифракционных оптических элементов должны быть определены для формирования виртуального изображения в поле зрения $FOV_{IN} = 12.5^\circ \times 7^\circ$. Периоды дифракционных решеток элементов ДОЭ1, ДОЭ2, ДОЭ3 были выбраны согласно уравнению (4.3) и результатам, приведенным на рис.38. Согласно выбранным параметрам, центральное поле имеет

угол дифракции $\theta=48^\circ$ внутри волновода. В *Таблице 11* представлены параметры ДОЭ, используемые для конфигурации волновода, отображенного на рис.45.

Таблица 11. Параметры ДОЭ

FOV	Длина волны			Кол-во дискретных решеток
	635 нм	520 нм	462 нм	
ДОЭ1	0.5040	0.4101	0.3624	1
ДОЭ2	0.3560	0.2900	0.2562	10
ДОЭ3	0.5040	0.4101	0.3624	32

Согласно принципу размножения зрачка, описанному в секциях 4.1-4.2, каждый элемент ДОЭ разбивается на дискретные дифракционные решетки, обладающие разной дифракционной эффективностью. Для того, чтобы достичь однородной засветки в плоскости выходного зрачка ПД, ДОЭ2 был разбит на 10 решеток, а выводной элемент ДОЭ3 на 32 элементарные решетки (рис.46-47). Для моделирования данной системы использовалось программное обеспечение Light Tools. Дифракционная эффективность (ДЭ) каждого луча, падающего на поверхность дифракционной структуры, зависит от параметров этого луча и порядка дифракции. В программе LightTools ДЭ каждой дискретной дифракционной решетки задается фиксированным значением ДЭ для конкретного порядка дифракции и не зависит от угла падения излучения на ДР. Поэтому, для задания значений ДЭ для четырех порядков дифракции использовались параметрические уравнения, описывающие усредненные значения ДЭ для всех углов падения для поляризованного ТЕ излучения. Данные значения получены путем усреднения значений, полученных в ходе анализа дифракционной эффективности ДОЭ с помощью RCWA метода [86] и приведены в *Таблице 12*. Значения ДЭ X и Y для каждой последующей решетки вычисляется согласно уравнению (4.1). В данной работе методика вычисления дифракционной эффективности с использованием RCWA симуляции не описывается, для более подробной информации по данному методу предлагается обратиться к следующему источнику [86].

Таблица 12. Параметры ДЭ ДОЭ

Тип ДОЭ	Порядок дифракции и тип дифракции							
	«-1»		«0»		«1»		«2»	
	Отражение	Пропускание	Отражение	Пропускание	Отражение	Пропускание	Отражение	Пропускание
ДОЭ1	1	0	0	0	0	0	-	-
ДОЭ2	Y	0	1-Y	0	0	0	-	-
ДОЭ3	0	0	1-2.18*X	0	0.97*X	X	0.21*X	0

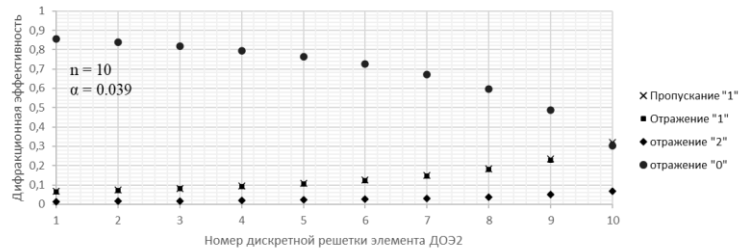


Рис.46. Дифракционная эффективность дискретных дифракционных решеток ДОЭ2.

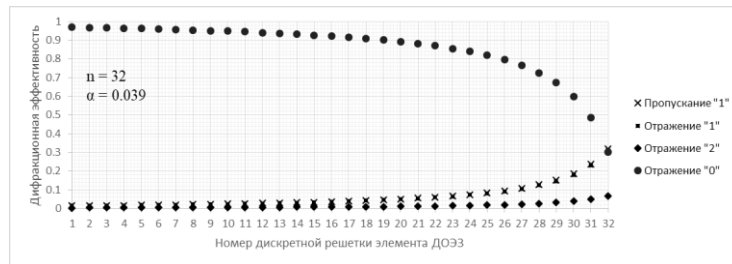


Рис.47. Дифракционная эффективность дискретных дифракционных решеток ДОЭ3.

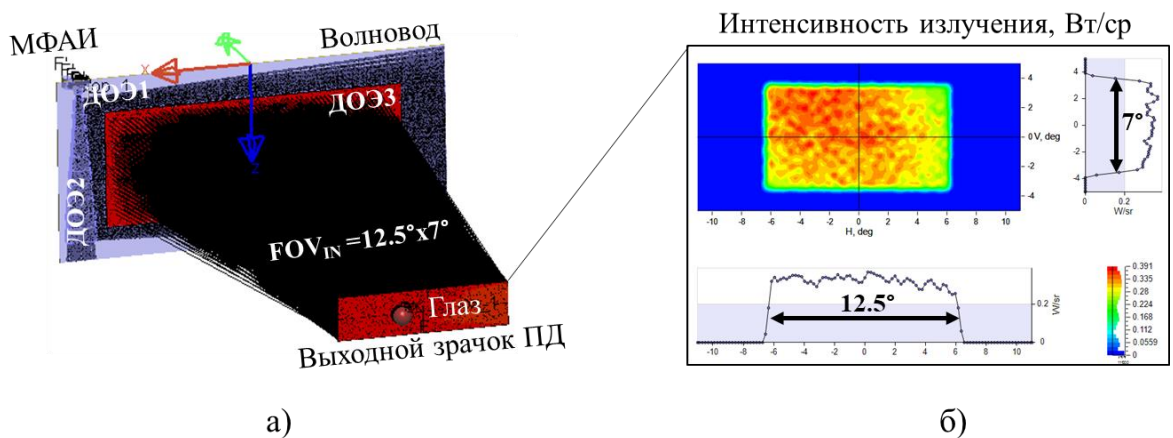


Рис.48. Симуляция волновода с размножением выходного зрачка в программе Light Tools: а) оптическая система, формирующая выходной зрачок, в пределах которого наблюдается виртуальное изображение с угловым размером $12.5^\circ \times 7^\circ$; б) распределение интенсивности излучения в плоскости выходного зрачка ПД при вводе излучения в волновод мощностью 1Вт.

4.8 Параметры оптической системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка

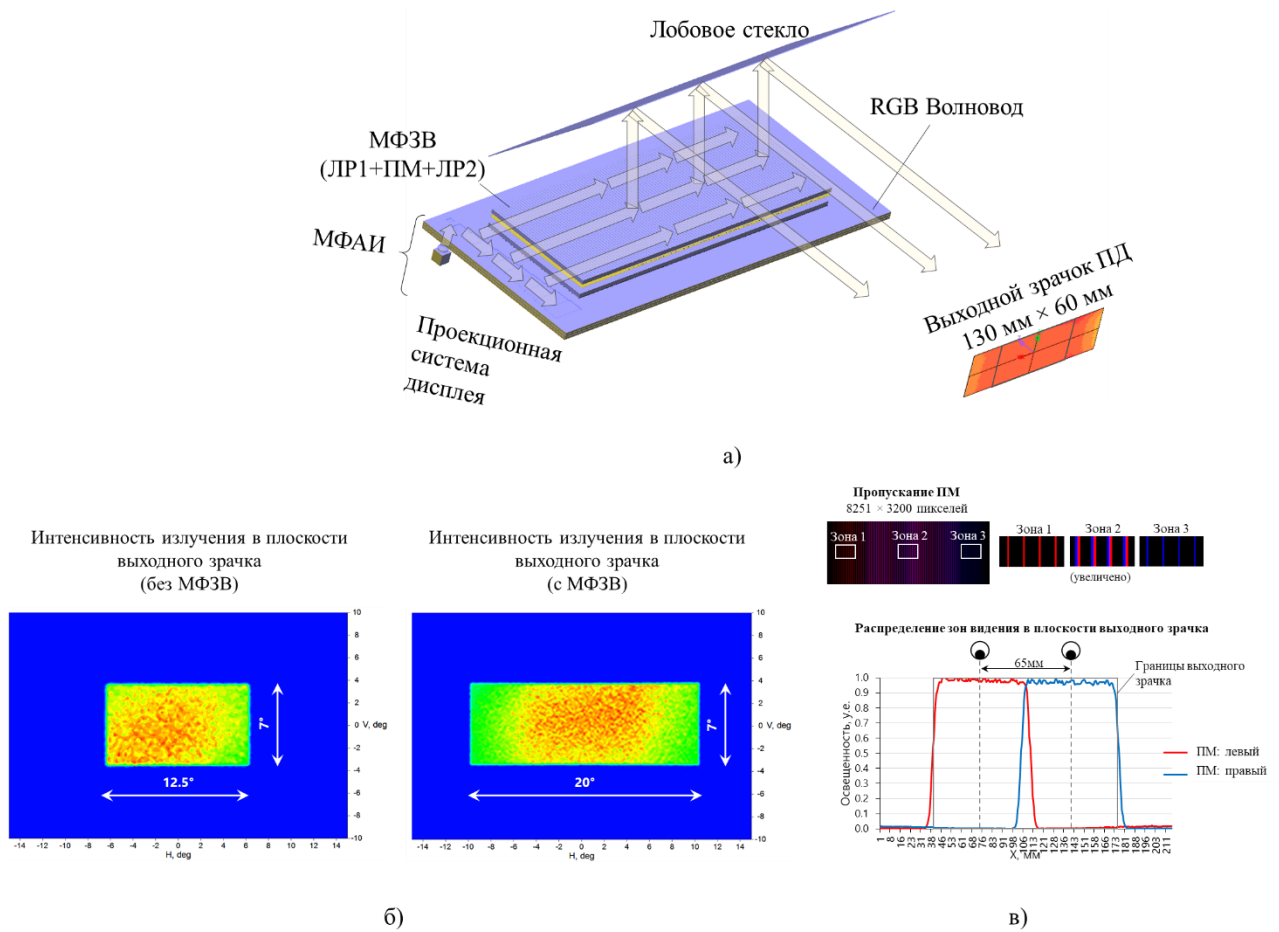


Рис.49 Симуляция системы на основе волновода с размножением выходного зрачка и модулем МФЗВ: а) схема оптической системы; б) распределение интенсивности излучения в плоскости выходного зрачка без модуля МФЗВ ($12.5^\circ \times 7^\circ$) и с модулем МФЗВ ($20^\circ \times 7^\circ$); в) формирование зон видения в плоскости выходного зрачка путем переключения пропускания ПМ в режим «Левый ВКЛ» (красный), «Правый ВКЛ» (синий).

Для симуляции всей системы, состоящей из модулей МФАИ, Волновода, МФЗВ и лобового стекла была разработана модель в программном обеспечении Light Tools (Рис.49, а). При симуляции «белого» изображения с дисплея модуля МФАИ, при «выключенном» модуле МФЗВ, система формирует виртуальное изображение с угловым размером $12.5^\circ \times 7^\circ$, наблюдаемое из плоскости выходного зрачка. При симуляции системы с МФЗВ система формирует виртуальное изображение с угловым полем зрения $20^\circ \times 7^\circ$ (рис.49, б). При переключении ПМ

между режимами «левый» и «правый» в плоскости выходного зрачка формируются зоны видения, расстояние между которыми составляет 65 мм, что соответствует стандартному усредненному расстоянию между зрачками глаз (рис.49, в). Таким образом система ПД с использованием волновода с размножением выходного зрачка и дополненная модулями МФАИ и МФЗВ способна формировать виртуальное изображение в поле зрения $20^\circ \times 7^\circ$. При этом система формирует зоны видения, в которых каждый глаз наблюдает ракурсное изображение, которое создает эффект наблюдения 3D изображения. Параметры оптической системы ПД представлены в *Таблице 13*.

Таблица 13. Параметры оптической системы ПД

Параметр	Значение
FOV	$20^\circ \times 7^\circ$
Выходной зрачок ПД	130 мм x 60 мм
Кол-во зон видения	2
Размер зон видения	65 мм
Разрешение изображения	1200 x 420 пикселей
Увеличение $M_{лр}$	1.6
Длины волн	462 нм, 520 нм, 635 нм
Энергетическая эффективность системы	0.1%
Объем системы	3 л

4.9 Экспериментальная установка – формирование автостереоскопического 3D изображения

Для проверки работоспособности описанного решения, был собран прототип с использованием коммерчески доступных компонентов (Рис. 50). В качестве подсветки использовался лазер Coherent, модель Genesis CX532-2000 с длиной волны $\lambda=532$ нм. В осветительной системе использовались стандартные линзы размеров 1 и 2 дюйма, подавитель спеклов Optotune LSR-5-17, а также линейный поляризатор. В качестве дисплея для формирования виртуальных изображений использовался LCD дисплей L3P08X-66G01. Проекционная система представляет собой линзу с фокусным расстоянием $f=100$ мм. В схеме используется блок когерентной подсветки в качестве волновода с размножением выходного зрачка и диагональю 10 дюймов. Для формирования телескопической системы линзовых

растров использовались пластиковые линзы Edmund Optics с периодом $P_{ЛР}=8.47$ мм и фокусным расстоянием $f=10.41$ мм. В качестве динамической ПМ использовалась LCD матрица фирмы BOE с разрешением 4920 x 2880 пикселей.

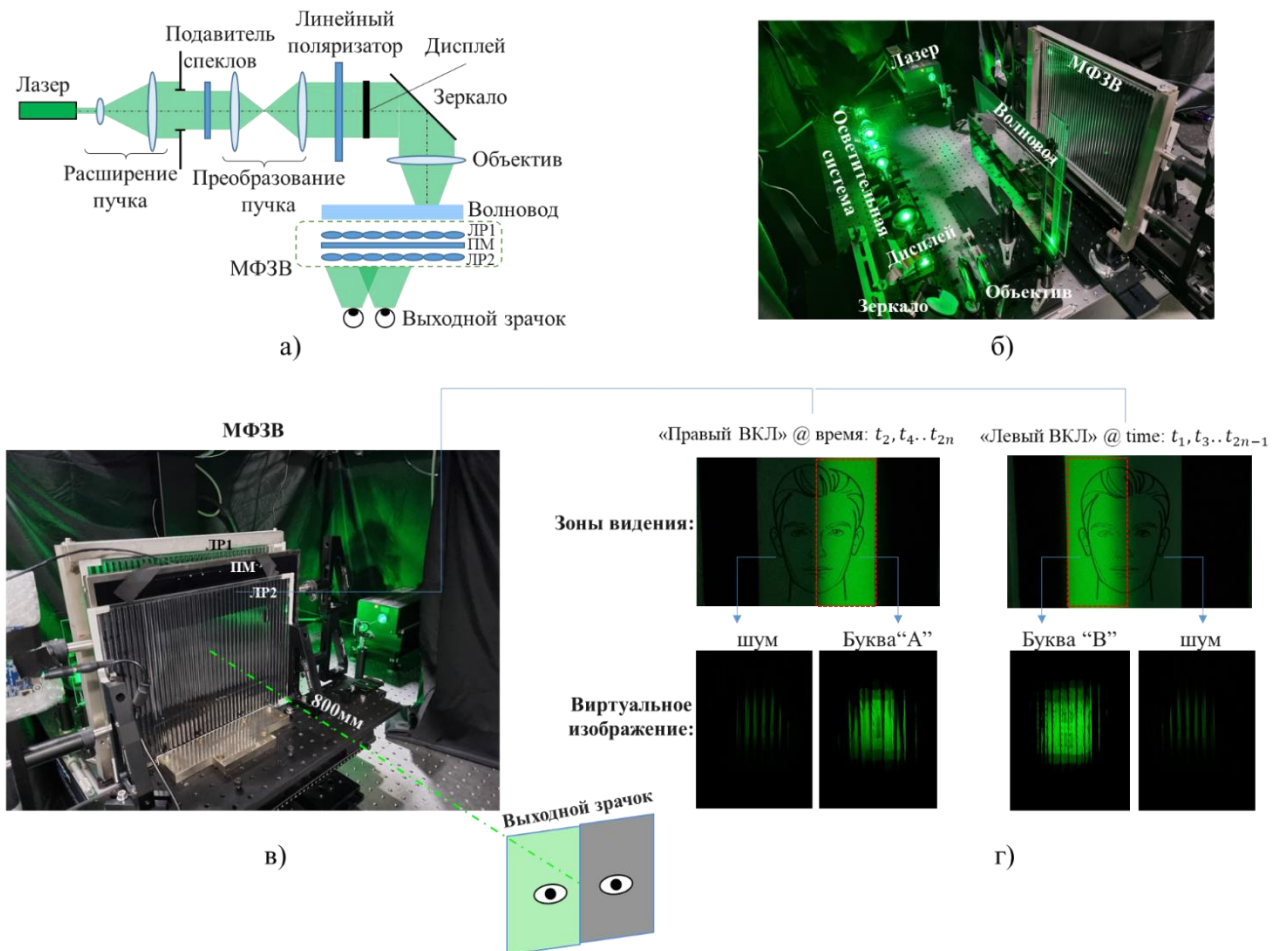


Рис.50 Экспериментальная установка ПД с размножением выходного зрачка и с возможностью вывода автостереоскопических изображений: а) принципиальная схема экспериментальной установки; б) оптическая система ПД; в) оптическая система модуля МФЗВ; г) формирование зон видения в последовательном режиме и вывод виртуальных изображений.

Взаимное расположение элементов было настроено таким образом, чтобы на расстоянии 800 мм от волновода формировалось изображение ПМ. Изображение для вывода на ПМ генерировалось для собранной установки – для каждого сегмента линзового растра подбиралась ширина и положение «белой» полосы на матрице ПМ таким образом, чтобы в плоскости выходного зрачка была засвечена лишь одна зона видения. Данная операция была проведена отдельно для «левой» и «правой» зон видения (рис.50, г). На дисплей выводились изображения букв «А» и

«В» в последовательном режиме, при этом в изображение на маске ПМ переключалось синхронно. Таким образом, в каждый момент времени t , виртуальное изображение наблюдалось только из одной зоны видения, причем из каждой зоны видения видно соответствующее ракурсное изображение (рис.50, г). Данная экспериментальная установка формирует виртуальное изображение на бесконечности с угловым полем зрения $8^\circ \times 4^\circ$, а также формирует 2 зоны видения, в каждой из которых наблюдается свое виртуальное изображение. Таким образом, система позволяет выводить ракурсные изображения и создавать эффект наблюдения 3D изображения.

4.10 Экспериментальная установка – увеличение поля зрения в системе ПД

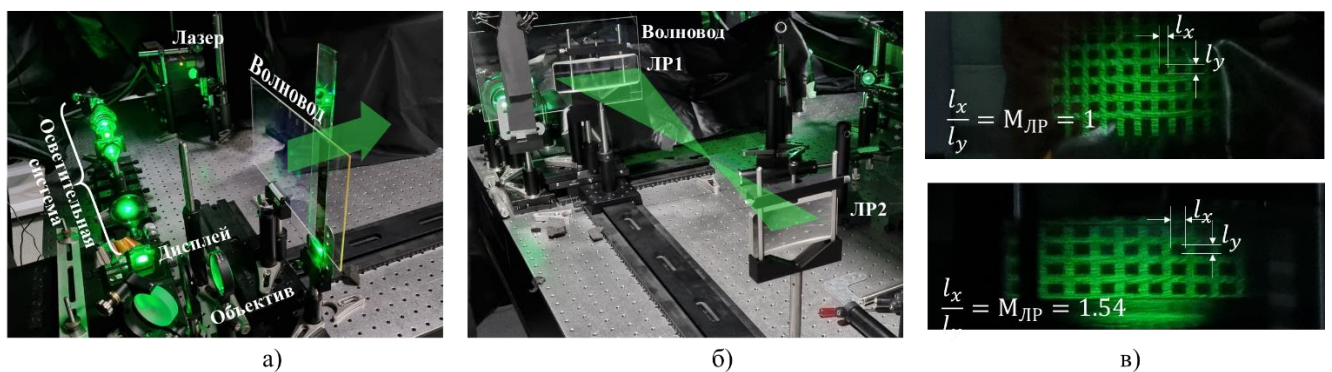


Рис.51. Увеличение поле зрения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка: а) экспериментальная установка формирования виртуального изображения на бесконечности; б) увеличение поля зрения путем дополнения системы цилиндрическими линзами с увеличением $M_{LP}=1.54$; в) виртуальное изображение без увеличения $M_{LP}=1$ и с увеличением $M_{LP}=1.54$.

Для проверки метода увеличения поля зрения в системе ПД на основе волновода путем модификации системы МФЗВ была собрана упрощенная экспериментальная установка. Оптическая система формирования виртуального изображения на бесконечности использовалась такая же, как и система, описанная в секции 4.7 (Рис.51, а). Модуль МФЗВ, а именно линзовые растры ЛР1 и ЛР2 в данной установке представлены в виде двух цилиндрических линз с фокусными расстояниями $f_1=455$ мм, $f_2=296$ мм (рис.51, б). Оптическая система цилиндрических линз образует телескопическую оптическую системы с

увеличением $M_{ЛР}=1.54$ мм. На LCD дисплей выводилось изображение сетки. На рис. 51 (в) отображены фотографии виртуальных изображений, формируемых системой без модуля МФЗВ ($M_{ЛР}=1$) и с модулем МФЗВ ($M_{ЛР}=1.54$). Виртуальные изображения в обоих случаях формируются на бесконечности, однако поле зрения в системе с модулем МФЗВ увеличено в $M_{ЛР}=1.54$ раз. Таким образом показана принципиальная возможность увеличения поля зрения в системе ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка путем модификации оптической системы модуля МФЗВ.

Выводы к главе 4

1. Оптические системы ПД, формирующие виртуальное изображение с помощью волновода с размножением выходного зрачка, совмещают в себе малый объем устройства (менее 6 литров) и широкое поле зрения системы (более 15° по горизонтали), однако, такие системы формируют плоское, 2D изображение.
2. Формирование автостереоскопического 3D изображения в системе ПД на основе волновода возможно путем дополнения системы модулями МФАИ и МФЗВ, в которой МФАИ генерирует ракурсные 2D изображения, а МФЗВ формирует зоны видения в плоскости выходного зрачка ПД, в каждой из которых наблюдается соответствующее ракурсное изображение.
3. Модуль МФЗВ представляет собой телескопическую оптическую систему, образованную линзовыми растрами, фокусные расстояния которых могут быть выбраны таким образом, что увеличение системы МФЗВ $M_{ЛР} > 1$, в этом случае, МФЗВ не только формирует зоны видения в системе ПД, но и увеличивает итоговое поле зрения системы, а также увеличивает энергетическую эффективность системы на 20% при увеличении МФЗВ $M_{ЛР}=1.6$.
4. На основе автостереоскопического метода формирования 3D изображений в системе ПД на основе волновода предложена система объемом менее 3 литров, формирующая виртуальное изображение с угловым размером $FOV=20^\circ \times 7^\circ$, наблюдаемое в пределах выходного зрачка размером 130x60мм.

5. Подтверждение работоспособности автостереоскопического метода формирования 3D изображений было подтверждено созданием экспериментальной установки, формирующей две зоны видения, и позволяющей наблюдать разные виртуальные изображения левым и правым глазом.
6. Метод увеличения поля зрения в системе ПД на основе волновода с изменением увеличения МФЗВ было также подтверждено созданием экспериментальной установки, с увеличением $M_{\text{ДР}}=1.54$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено теоретическое изучение свойств волноводных и голографических оптических элементов и их практическое применение в оптических системах устройств дополненной реальности.

Основные результаты диссертационной работы заключаются 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 $80^\circ \times 40^\circ$.

2. Предложена оптическая система устройства формирования виртуального изображения на основе комбинации голографических оптических элементов, которая впервые позволила достичь одновременно большого выходного зрачка устройства ($>10\text{мм}$) 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 потенциалом для внедрения в современные изображающие устройства и могут найти применение в различных областях науки и техники.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДР – дополненная реальность

ПД – проекционный дисплей

ПВО – полное внутреннее отражение

КСГ – компьютерно-синтезированная голограмма

ПФМ – пространственный фазовый модулятор

ГОЭ – голографический оптический элемент

ДОЭ – дифракционный оптический элемент

НГД – направленный голографический диффузор

МФАИ – модуль формирования автостереоскопических изображений

ПМ – пространственная маска

ЛР – линзовый растр

ЗВ – зоны видения

МФЗВ – модуль формирования зон видения

ДЭ – дифракционная эффективность

PMMA – полиметилметакрилат

3D – трехмерное

2D – двумерное

LBS – laser beam scanning

SLM – spatial light modulator

LCoS – liquid crystal on silicon

LCD – liquid crystal display

TFT – thin-film transistor

OLED – organic light-emitting diode

uLED – micro light-emitting diode

MEMS – micro-electromechanical systems

CGH – computer-generated holography

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор приносит глубокую благодарность научному руководителю профессору кафедры электрофизики МФТИ, д.ф.-м.н. Савинову Сергею Юрьевичу за выбор темы научной работы, обеспечение всем необходимым для ее выполнения, за непрерывную помощь, поддержку, и проявленное внимание и терпение при выполнении диссертационной работы.

Автор приносит глубокую благодарность руководителю лаборатории сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации ФИАН, к.ф.-м.н. Путилину Андрею Николаевичу, за консультации по вопросам голографии, за переданные бесценные знания и опыт, за оказанную помощь в проведении теоретических и экспериментальных исследований, за предоставление необходимого оборудования и материалов при выполнении диссертационной работы.

Автор приносит глубокую благодарность инженерам лаборатории сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации ФИАН Копёнкину Сергею Сергеевичу и Бородину Юрию Петровичу за содействие в проведении измерений, за помощь в сборке экспериментальных установок и за консультации по вопросам голографии.

Автор благодарит доцента кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н. Дружина Владислава Владимировича за неоценимую профессиональную и человеческую поддержку, ценные научные беседы и за стимулирование постоянного интереса к исследовательской деятельности.

Автор приносит глубокую благодарность сотрудникам отдела оптики ООО «Исследовательский центр Самсунг» за переданные знания и опыт, поддержку в профессиональной деятельности, проведение совместных исследований, важные консультации и помощь при выполнении диссертационной работы. Автор благодарит Янусика Игоря Витальевича, Морозова Александра Викторовича, Дубынина Сергея Евгеньевича, Дубынина Германа Борисовича.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sutherland, I. A head-mounted three-dimensional display. // Proceedings AFIPS. – 1968. – № 68. – С.757-764.
2. Ford, T. Increased awareness. // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. – 1999. – №71(4). – С.362–364.
3. Atchison, D., Smith, G. Optics of the human eye. - Edinbourg: Reed educational and professional publishing, 2002.
4. Lim, H. W., Song Y., Ji Hong Kim, Yong Un Shin, Sun Jin Hwang, Sukwoo Hong. Normal Range of Eye Movement and Its Relationship to Age. // Invest. Ophthalmol Vis. Sci. – 2017. – №58(8). – С.747.
5. Ohlendorf A, Schaeffel F, Wahl S. Positions of the horizontal and vertical centre of rotation in eyes with different refractive errors. Ophthalmic Physiol Opt. – 2022. - №42(2). – С.376-383.
6. Артюхина Н.К. Теория и расчет оптических систем. - Минск: БНТУ, 2020.
7. Ferri, J.M., Thomas J. Estimating Mechanical Volume of an Augmented Reality Head-Up Display System // Texas Instruments Application Report. – 2018. – С.1-11.
8. Kress B. C. Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets. SPIE press book, 2020.
9. Xia X., Guan FY., Cai Y., Magnenat T.N. Challenges and Advancements for AR Optical See-Through Near-Eye Displays: A Review // Front. Virtual Real. – 2022. – №3. – С. 838237.
10. Cheng D., Wang Y., Hua H., Talha M.M. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism // Appl. Opt. – 2009. – №48. – С. 2655-2668.
11. Wei L, Li Y., Jing J., Feng L., Jinsong Zhou J. Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface // Opt. Express. – 2018. – №26. – С. 8550-8565.

12. Kuo, G., Waller, L., Ng, R., Maimone, A. High resolution étendue expansion for holographic displays // ACM Transactions on Graphics. – 2020 – №39(4). – С.66.
13. Ride the Wave: Augmented Reality Devices Rely on Waveguides // Radiant vision systems URL: www.radiantvisionsystems.com (дата обращения: 10.01.2023).
14. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., В.Н. Кузичев. Теория оптических систем. – Москва: Машиностроение, 1992.
15. Kress B., Cummings W. Optical architecture of HoloLens mixed reality headset. // SPIE Proc. – 2017. – №10335 – С.0К.
16. Curtis K.R. Unveiling Magic Leap 2's Advanced AR Platform and Revolutionary Optics // Proc. SPIE. – 2022. – №11932 – С.0P
17. Waldern J.D., Abraham S., Popovich M.M. DigiLens holographic photopolymers for wide angle AR waveguides // Proc. SPIE. – 2020. – №11367 – С.00
18. Schultz R. Vuzix: Optics, Waveguides and Display Engine Technologies that Enhance Usability and Functionality of Smart Glasses // Proc. SPIE. – 2020. – №11764 – С.10.
19. Frommer A. Lumus: Maximus: Large FoV Near to Eye Display for Consumer AR Glasses // Proc. SPIE. – 2021. – №11764 – С.03
20. Bernard C. Kress Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations // Proc. SPIE. – 2019. – №11062. – С.0J.
21. DeHoog E., Holmstedt J., Aye T., Field of view of limitations in see-through HMD using geometric waveguides // Appl. Opt. – 2016. – №55. – С.5924-5930.
22. 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. – №13. – С.2400.
23. Fang F. Z., Zhang X. D., Weckenmann A., Zhang G. X., Evans C. Manufacturing and measurement of freeform optics // CIRP Annals. – 2013. – №62(2). – С.823–846.

24. Cheng D., Wang Q., Liu Y., Chen H., Ni D., Wang X., Yao C., Hou Q., Hou W., Luo G., Wang Y. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // *Light: Advanced Manufacturing* 2. – 2021. – №24.
25. Video Headset: patent US5696521A, USA / Robinson, J. D., Schor, C. M., Muller [et al.] – 1994.
26. See-through computer display systems: patent US9494800B2, USA / Border J.N., Bietry J., Haddick J.D. – 2014.
27. Li H., Zhang X., Shi G., Qu H., Wu Y., Zhang J. Review and analysis of avionic helmet mounted displays // *Optical Engineering*. – 2013. – №52(11).
28. Helmet visor display employing reflective, refractive and diffractive optical elements: patent US5526183, USA / Chen C.W. – 1993.
29. We Li, Li Y., Jing J., Feng L., Jinsong Zhou J., Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface // *Opt. Express*. – 2018. – №26. – C.8550-8565.
30. Akşit K., Lopes W., Kim J., Shirley P., Luebke D. Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens // *ACM Transactions on Graphics*. – 2017. – №36. – C.1-13.
31. Xiao J., Liu J., Lv Z., Shi X., Han J. On-axis near-eye display system based on directional scattering holographic waveguide and curved goggle // *Opt. Express*. – 2019. – №27. – C.1683-1692.
32. Wearable optical display system for unobstructed viewing: patent EP3274758B1 / Ashkenazi A. – 2016.
33. Корешев С.Н. Основы голографии и голограммной оптики: Учебное пособие - Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009.
34. Bragg W., The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal // *Proc. Cambridge Philos. Soc.* – 1913 – №17 – C.43.
35. Wulf G., Über die Kristallröntgenogramme. *Physikalische Zeitschrift*. - 1913. – № 14. – C.217-220.

36. Kim N., Piao Y., Wu H. Holographic Optical Elements and Application,” Holographic Materials and Optical System // IntechOpen. Holographic Materials and Optical System. – 2017.
37. 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. – №10944. – C.0G.
38. G. Westheimer. The Maxwellian view // Vision Res. – 1966. – №6(12). – C.669–682.
39. Ando T., Yamasaki K., Okamoto M. , Shimizu E. Head mounted display using holographic optical element // Proc. SPIE . – 1998. – №3293. – C.669–682.
40. Ando T., Yamasaki K., Okamoto M. , Shimizu E. Evaluation of HOE for head mounted display // Proc. SPIE. – 1999. – №3637. – C.110–118.
41. Takaki Y., Fujimoto N., Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display // Opt. Express. – 26. – №2018. – C.22985-22999.
42. Display device with a holographic combiner: U.S. patent 11,215,829B2R. / Topliss J., Gelsinger-Austin P.J., Gregory T.M., Tsai R.J., Shpunt A. – 2022.
43. Wilm T., Kibgies J., Fiess R., Stork W., Multiplexed holographic combiner with extended eye box fabricated by wave front printing // Photonics. – 2022.– №9(6). – C.416.
44. Maimone A., Georgiou A., Kollin J. S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality // ACM Trans. Graph. – 2017.– №36(4). – C.85:1-85:16.
45. Jang C., Bang K., Li G., Lee B. Holographic near-eye display with expanded eye-box // ACM Trans. Graph. – 2018 – 37(6) – C.195:1-195:14.
46. Jo Y., Yoo C., Bang K., Lee B., Lee B., Eye-box extended retinal projection type near-eye display with multiple independent viewpoints // Appl. Opt. – 2021. – №60. – C.A268-A276.
47. Shin B., Kim S., Druzhin V., Malinina P., Dubynin S., Afanasyev S., Dubinin G., Kopenkin S., Borodin Y., Putilin A., Seo W., Lee C.-K., Sung G., Kim y.-Y., Seo J., Chung J.-S., Lee H.-S., Hong S.-H. Eye-box expansion using waveguide and

holographic optical element for augmented reality head-mounted display // Proc. SPIE. – 2020. – №11310. – C.0F.

48. Duan X., Liu J., Shi X., Zhang Z., Xiao J. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box // Opt. Express. – 2020. – №28. – C.31316-31329.

49. Skirnewskaja, J., Wilkinson, T. D. Automotive Holographic Head-Up Displays. // Adv. Mater. – 2022. – №34. – C.2110463.

50. Z. Qin Z., Lin F. -C., Huang Y. -P., Shieh H.-P. D. Maximal Acceptable Ghost Images for Designing a Legible Windshield-Type Vehicle Head-Up Display // IEEE Photonics Journal. – 2020. – №9(6). – C.1-12.

51. Lee J.-H., Yanusik I., Choi Y., Kang B.M., Hwang C., Park J., Nam D., Hong S. Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking // Optics Express. – 2020. – №28. – C.29788-29804.

52. System for projecting a virtual image onto a screen with the effect of eliminating the effect of solar radiation: patent RU2736919C1, Russia / Yanusik I., Kalinina A., Morozov A., Kalinina A., Lee J.-H. – 2020.

53. Waldern J.D., Grant A. J., Popovich M.M., Automotive auDigiLens switchable Bragg grating waveguide optics for augmented reality applicationsgmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking // Proc. SPIE. – 2018. – №10676. – C.0G.

54. Jamieson C., Collings, N. Realizing Automotive Holographic Head Up Displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. – 2016. – №47. – C. 1017-1020.

55. Compact holographic head-up display device: Patent WO2023007230A1 / Ponomarev V., Belkin A., Bushmanov O., Shcherbina A, Svarycheuski M. – 2021.

56. Seo J.-H., Yoon C.-Y., Oh J.-H., Kang S. B., Yang C., Lee M. R., HanY. H. A study on multi-depth head-up display // Dig. Tech. Pap Soc. Inf. Disp. Int. Symp. – 2017. – №48(1). – C.883–885.

57. Qin Z., Lin S.-M., Luo K.-T., Chen C.-H., Huang Y.-P., Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror // Appl. Opt. – 2019. – №58(20). – C.5366–5374.

58. Head-up display apparatus: patent 2020/0055399A1 USA / Yamada N., Hashimura J., Tannai O., Kojima T., Sugawara K. – 2020.
59. T. Matsumoto, K. Kusafuka, G. Hamagishi, and H. Takahashi, Glassless 3D head up display using parallax barrier with eye tracking image processing // Dig. Tech. Pap. - Soc. Inf. Disp. Int. Symp. – 2018. – №49(1). – C.1511–1514.
60. Lee J.-H., Yanusik I., Choi Y., Kang B., Hwang C., Park J., Nam D., Hong S., Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking. // Opt. Express. – 2018. – №28(20). – C.29788–29804.
61. Chen C., Lin W., Lee S., Luo K. Holographic augmented reality head up display for vehicle application // Dig.Tech. Pap. - Soc. Inf. Disp. Int. Symp. – 2019. – №50(1). – C.680–682.
62. Large real-time holographic 3D displays: enabling components and results // Appl. Opt. – 2017. – №56(13). – C.F45–F52.
63. An J., Won K., Kim Y., Hong J.-Y., Kim H., Kim Y., Song H., Choi C., Kim Y., Seo J., Morozov A., Park H., Hong S., Hwang S., Kim K., Lee H.-S., Slim-panel holographic video display // Nat. Commun. – 2020. – №11(1). – C.5568.
64. Richter P., Von Spiegel W., Waldern J. Volume optimized and mirror-less holographic waveguide augmented reality head-up display // Dig. Tech. Pap. - Soc. Inf. Disp. Int. Symp. – 2018. – №49(1). – C.725–728.
65. Dereniak, E. L., Dereniak, T. D. Geometrical and Trigonometric Optics. Edinburg: Cambridge University Press, 2008.
66. Kalinina A., Putilin A. Wide-field-of-view augmented reality eyeglasses using curved wedge waveguide. // Proc. SPIE, Digital Optics for Immersive Displays II. – 2020. – №11350. – C.005
67. Lakshminarayanan V., Fleck A. Zernike polynomials: A guide. // Journal of Modern Optics. – 2011. – №58. – C.1678-1678.
68. Travis A., Chen L., Georgiou, A., Chu, J., Kollin J., (2018). Wedge guides and pupil steering for mixed reality // Journal of the Society for Information Display. – 2018. – №26(9) – C.526-533.

69. Калинина А., Путилин А., Копенкин С. Применение осевых голографических оптических элементов в системе дополненной реальности // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – №45(8). – р.3-13.
70. Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В. Прикладная голография. Методические материалы к экспериментальному практикуму, – СПб: СПбГУИТМО, 2008.
71. С.Н. Корешев, Голограммные оптические элементы и устройства – СПб: НИУ ИТМО, 2013.
72. Kogelnik, H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // Bell System Technical Journal. – 1969. – №48. – С.2909-2947.
73. Устройство отображения информации с помощью объемных голограмм: патент RU2794409С1 РФ / Калинина А.А., Путилин А.Н. – 2022.
74. Hakan U., Sven H., Utku B. MEMS laser scanners: a review // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2014. – №23. – С.259.
75. Kilcher L., Abelé, N. MEMS-based microprojection system with a 1.5cc optical engine // Proc. SPIE. – 2012. – №8252. – С.04.
76. Kalinina A., Putilin A., Kopenkin S. Eyebow enlargement in holographic AR glasses // Appl. Opt. – 2023. – №62. – С.D163-D170.
77. Pekka Ä., Pasi S., Tapani L. Exit pupil expander with a large field of view based on diffractive optics. // Journal of The Society for Information Display. – 2009. – №17. – С.659-664.
78. Saarikko P. Diffractive exit-pupil expander with a large field of view. // Proc. SPIE. – 2008. – №7001. – С.05.
79. Grey D.J. The ideal imaging AR waveguide // Proc. SPIE. – 2017. – №10335. - С.0С.
80. Miller J.M., Beaucoudrey N., Chavel P., Turunen J., Cambriel E. Design and fabrication of binary slanted surface-relief gratings for a planar optical interconnection. // Applied optics. – 1997. – №36(23). – С.5717-5727.

81. Kress B., Meyrueis P. Applied Digital Optics: From Micro-optics to Nanophotonics. 1st Edition. West Sussex: John Wiley and Sons Publisher. – 2007. – С.82-95.
82. Ландсберг Г. С., Оптика. – Москва: Физматлит, 2003.
83. 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. – №29. – С.36287-36301.
84. 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 RU2760473С1 РФ / Морозов А.В., Янусик И.В., Калинина А.А., Ли ДжинХо – 2020.
85. 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. – №12024 – С.0D
86. Moharam M. G., Gaylord T. K., Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // J. Opt. Soc. Am. – 1981. – №71. – С. 811-818.

ПРИЛОЖЕНИЕ

SAMSUNG

Limited liability company
Samsung R&D Institute Rus
12, Dvintsev street, building 1, office #1500,
Moscow, 127018, Russian Federation
Tel. +7 495 797-2500; Fax: +7 495 797-2501

23.06.2023

По месту требования

Тема письма:

«О практическом использовании теоретических и практических результатов диссертационной работы Калининой Анастасии Андреевны «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Настоящим сообщаем, что теоретические и практические результаты диссертационной работы «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах», были использованы в работах, проводимых в ООО «Исследовательский центр Самсунг», а именно:

- 1) метод формирования 3Д изображения в системах проекционных дисплеев дополненной реальности на основе волновода с размножением выходного зрачка;
- 2) метод увеличения поля зрения в системе проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка.

Результаты научно-исследовательской работы получили высокую оценку в ООО «Исследовательский центр Самсунг».

Директор Исследовательского центра Самсунг



Ким Чул Чжу