

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Московский педагогический государственный университет»

(МПГУ), академик РАО, доктор географических наук, профессор Дронов Виктор Павлович



« 28 » ноября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет»
- на диссертационную работу **Калининой Анастасии Андреевны** «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах дополненной реальности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Актуальность.

В современных оптических устройствах визуального наблюдения реальное изображение часто дополняется цифровой информацией, которая накладывается на изображение. Такие устройства получили название изображающих систем дополненной реальности. Они применяются в системах навигации, военной и космической отраслях, медицине и строительстве. Параметры устройств дополненной реальности ограничены существующими в настоящее время технологиями формирования виртуальных изображений. В настоящее время наибольшее развитие получили два типа устройств дополненной реальности – очки и проекционные дисплеи. В диссертации рассмотрены оба типа систем, и предложены методы улучшения их выходных характеристик, что, несомненно, является актуальной научной и практической задачей.

Содержание работы.

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемой литературы из 86 наименований и приложения. 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 в устройствах дополненной реальности с использованием волноводных, дифракционных и голографических оптических элементов. Описывается история появления устройств дополненной реальности, рассматриваются основные типы этих устройств их характеристики и параметры. Подробно рассмотрены различные схемы формирования виртуального изображения в очках и проекционных дисплеях дополненной реальности.

В выводах к главе отмечается, что наиболее перспективными для формирования виртуальных изображений в устройствах дополненной реальности являются технологии с использованием волноводов и голографических оптических элементов.

Во второй главе рассматривается оптическая система очков дополненной реальности с использованием клиновидного, изогнутого волновода. Изучено влияние формы волновода на величину поля зрения. Произведён расчёт поля зрения, в случаях волновода, поверхность которого образована цилиндрическими поверхностями. Показано, что поле зрения виртуального изображения в системах с использованием волновода с размножением выходного зрачка может быть увеличено на $\approx 25\%$ путём изгиба волновода. Наибольший эффект достигается в изогнутых волноводах с неконцентрическими поверхностями (клиновидные, изогнутые волноводы).

Показано, что в системах, использующих такие волноводы можно увеличить поле зрения на $\approx 200\%$ с целью создания условий вывода из волновода без использования дополнительных элементов. Разработаны очки на основе изогнутого клиновидного волновода и внеосевого голографического оптического элемента, формирующие виртуальное изображение с угловым размером $80^\circ \times 40^\circ$ и с угловым разрешением более 40 линий на градус.

В третьей главе рассмотрена оптическая система очков дополненной реальности с использованием осевого голографического элемента. Выбор осевого голографического элемента обоснован выполненным в работе анализом показавшим, что он порождает намного меньшие aberrации (более чем в 40 раз), по сравнению с внеосевым голографическим элементом.

Главным недостатком голографических очков, является ограниченный (~ 1 мм) размер выходного зрачка. Предложен метод увеличения выходного зрачка при сохранении широкого поля зрения на основе комбинации осевого голографического элемента с внеосевым голографическим диффузором. Представленный в диссертации расчёт и моделирование показали, что оптическая система очков при этом обладает полем зрения 60° и выходным зрачком 10мм. Разработаны схемы формирования и выполнена запись голографических оптических элементов. Собранная на их основе экспериментальная установка, позволяет формировать в голографических очках поле зрения 60° при выходном зрачке 10мм.

В четвёртой главе рассмотрена оптическая система проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка. Рассмотрен метод формирования виртуального изображения в системе, где размножение выходного зрачка осуществляется при помощи дифракционных оптических элементов. Обсуждается метод выбора параметров оптических элементов. Предложена компактная система проекционного дисплея, формирующая на основе автостереоскопического метода трехмерное изображение. Рассмотрены методы увеличения поля зрения в таких системах. Создана экспериментальная установка, формирующая две зоны видения, и позволяющая наблюдать левым и правым глазом разные виртуальные изображения.

Научная новизна работы.

Для очков дополненной реальности на основе волновода впервые предложена оптическая система, которая формирует виртуальное изображение в поле зрения 80x40 градусов за счёт разработанной специально формы волновода.

Разработаны методики формирования направленного голографического диффузора с заданным углом рассеяния, а также осевого голографического оптического элемента с функцией отражательной линзы, который обладает плоским промежуточным изображением. Использование этих методик в оптической системе очков дополненной реальности приводит к снижению поперечных аберраций более чем в 40 раз.

Впервые предложена оптическая система, обладающая одновременно широким полем зрения >60 градусов и большим выходным зрачком >10 мм для очков дополненной реальности на основе комбинации голографических оптических элементов.

Предложен метод увеличения поля зрения для автомобильного проекционного дисплея на основе волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования автостереоскопического трехмерного изображения.

Практическая значимость.

Полученные результаты представляют интерес для производителей мобильных электронных носимых устройств и проекционных дисплеев и могут быть использованы во всех отраслях производства, где применяются такие устройства.

Личный вклад автора.

Автором предложена оптическая схема очков дополненной реальности с улучшенными характеристиками, выполнен теоретический анализ и расчёт оптической системы проекционного дисплея на основе волновода с возможностью формирования автостереоскопического трехмерного изображения и предложен метод увеличения поля зрения в данной системе. Для предложенных оптических систем автором выполнены необходимые расчёты, проведено моделирование с применением специализированного программного обеспечения, выполнена сборка и проведено тестирование экспериментальных устройств.

Достоверность результатов.

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

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для использования в исследованиях, проводимых в МГУ, МФТИ, МИФИ, МПГУ, а также в ФИАН, ИОФАН, ИСАН и др.

Замечания.

На рисунке 25 (стр. 57) представлена дифракционная эффективность голографического оптического элемента в зависимости от угла θ_0 для длины волны $\lambda=514\text{нм}$. На рисунке видны боковые максимумы на прибл. 505 нм, 523 нм и т.д. В тексте отсутствуют пояснения, к чему может привести и какое влияние оказывают наличие таких боковых максимумов.

В работе значительное внимание уделяется такому параметру как дифракционная эффективность, определяемого в работе как отношение энергии дифрагированного излучения к общей энергии излучения, падающего на голограмму. Недостаточное внимание уделяется экспериментальному измерению данного параметра.

При оценке оптических устройств большое значение имеет качество получаемого с их помощью изображения, которое определяется, в том числе такими характеристиками как яркость, контрастность и разрешение. К сожалению, в работе отсутствуют значения этих характеристик.

Указанные недостатки затрудняют полную оценку предлагаемых технических решений, но не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение.

Выполненные в рецензируемой диссертационной работе исследования позволили выявить ранее не изученные свойства волноводных и голографических оптических элементов и применить их для улучшения характеристик изображающих систем дополненной реальности. Диссертация Калининой А.А. «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах дополненной реальности» по своему содержанию и оформлению отвечает паспорту специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертационная работа Калининой А.А. «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах дополненной реальности» удовлетворяет также требованиям п.п. 9,10,11,13,14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а её автор – Калинина Анастасия Андреевна заслуживает

присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Отзыв подготовлен Коротаяевым Олегом Николаевичем, доктором физико-математических наук (по специальности 01.04.05 – Оптика), почётным профессором МПГУ, профессором кафедры теоретической физики им. Э.В. Шпольского, Института физики, технологии и информационных систем МПГУ и Магаряном Константином Арутюновичем кандидатом физико-математических наук (по специальности 01.04.05 – Оптика), директором учебно-научного центра спектроскопии сложных органических соединений МПГУ.

Диссертация и отзыв обсуждены на заседании кафедры теоретической физики им. Э.В. Шпольского, Института физики, технологии и информационных систем, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» 20 ноября 2023 Протокол №3.

Профессор кафедры теоретической физики им. Э.В. Шпольского, Института физики технологии и информационных систем, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

д-р физ.-мат. наук,
почетный профессор МПГУ

Коротаяев
Олег Николаевич

Директор учебно-научного центра спектроскопии сложных органических соединений федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет».

канд. физ.-мат. наук

Магарян
Константин Арутюнович



Коротаяев О.Н., Магарян К.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Зам. начальника Управления развития
кадрового потенциала

И.Н. Павлушина

Список основных работ сотрудников ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» по тематике диссертации Калининой А.А. "Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в изображающих системах дополненной реальности" в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Ерёмчев, И. Ю. Трёхмерная флуоресцентная наноскопия одиночных квантовых излучателей на основе оптики спиральных пучков света / Ерёмчев И.Ю., Прокопова Д.В., Лосевский Н.Н., Мынжасаров И.Т., Котова С.П., Наумов А.В. // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192, № 6. – С. 663-673.
 2. Смирнова, Е. А. Спектры поглощения пробного сигнала и резонансной флуоресценции для излучателей при их взаимодействии с локальным окружением в прозрачных средах / Е.А. Смирнова, Н.А. Лозинг, М.Г. Гладуш, А.В. Наумов // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130, № 1. – С. 151-159.
 3. Kozhina, E. P. One-Dimensional Magneto-Optical Nanostructures: Template Synthesis, Structure, Properties, and Application in Spectroscopy Based on Plasmon Resonance / Kozhina E., Kulesh E., Bedin S., Doludenko I., Piryazev A., Korolkov I., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Rogachev A., Shumskaya A. // IEEE Magnetics Letters. – 2022. – V. 13. – P. 1-5.
 4. Lozing, N. A. Steady-state photoluminescence and nanoscopy of two near-identical emitters with dipole-dipole coupling / Natalia A. Lozing, Ekaterina A. Smirnova, Vladimir K. Roerich, Maxim G. Gladush, arxiv.org/abs/2112.14207
 5. Gritchenko, A. S. Single quantum emitters detection with amateur CCD: Comparison to a scientific-grade camera / Gritchenko, A. S., Eremchev I. Y., Naumov A. V., Melentiev P. N., Balykin V. I. // Optics & Laser Technology. – 2021. – V. 143. – P. 107301.
 6. Eremchev, I. Y. Microscopic Insight into the Inhomogeneous Broadening of Zero-Phonon Lines of GeV– Color Centers in Chemical Vapor Deposition Diamond Films Synthesized from Gaseous Germane / Eremchev I. Y., Neliubov A. Y., Boldyrev K. N., Ralchenko V. G., Sedov V. S., Kador L., Naumov A. V. // The Journal of Physical Chemistry C. – 2021. – V. 125, № 32. – P. 17774-17785.
 7. Кожина, Е. П. Контроль распределения раствора на развитой метаповерхности методами эпи-люминесцентной микроскопии / Кожина Е. П., Аржанов А. И., Каримуллин К. Р., Бедин С. А., Андреев С. Н., Наумов А. В. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 12. – С. 1746-1753.
 8. Stochastic superflares of photoluminescence from a single microdiamond with germanium-vacancy color centers: A general phenomenon or a unique observation / Lozing N. A., Gladush M. G., Eremchev I. Y., Ekimov E. A., Naumov A. V. // Physical Review B. – 2020. – Т. 102, № 6. – С. 060301.
 9. Fedyanin, V. V. Ultrafast optical dephasing in experiments on femtosecond and incoherent photon echo: numerical modeling / Fedyanin V. V., Karimullin K. R. // Laser Physics. – 2019. – Т. 29, № 12.
- Gladush, M. G. Dispersion of Lifetimes of Excited States of Single Molecules in Organic Matrices at Ultralow Temperatures / Gladush M. G., Anikushina T. A., Gorshlev A. A., Plakhotnik T. V., Naumov A. V. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2019. – Т. 128, № 5. – С. 655-663.

Информация о ведущей организации

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

119991, Россия, Москва, ул. Малая Пироговская, дом 1, строение 1

Тел/факс +7 (499) 245-03-10

E-mail mail@mpgu.su