

## Отзыв

официального оппонента, кандидата физико-математических наук Спиридонова Максима Владимировича 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.

Кандидатская диссертация Калининой А.А. посвящена исследованию методов формирования виртуального изображения в системах дополненной реальности. В работе предложены новые методы формирования виртуального изображения с использованием волноводных, дифракционных и голографических оптических элементов, а также представлены оптические системы устройств дополненной реальности с использованием указанных оптических элементов. Предложенные системы обладают улучшенными характеристиками по сравнению с существующими аналогами, а именно обеспечивают формирование виртуального изображения в более широком поле зрения и с увеличенным выходным зрачком системы.

Актуальность и значимость работы обусловлена как решением теоретических вопросов, связанных с разработкой методов формирования виртуальных изображений, так и с прикладным интересом применения дифракционных, голографических и волноводных элементов в устройствах дополненной реальности. Использование устройств дополненной реальности уже давно стало неотъемлемой частью многих сфер, где важно получать моментальный доступ к нужной информации, например, в военной и космических отраслях, в промышленности, в медицине, и др. При этом, системы дополненной реальности должны совмещать в себе высокое качество изображения, обеспечивать зрительный комфорт, а также быть компактными. В работе предложены принципиально новые оптические системы очков дополненной реальности и проекционного автомобильного дисплея, обеспечивающие улучшенные характеристики, такие как поле зрения и выходной зрачок систем.

Научная и практическая значимость диссертации следует из того, что полученные результаты открывают новые перспективы для развития устройств дополненной реальности и других изображающих систем. Исследованные способы формирования виртуальных изображений описаны с помощью моделирования, а также подтверждены созданием и анализом работы экспериментальных установок.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы, содержащий 86 наименований. Объем диссертации составляет 106 страниц. Работа содержит 51 рисунок и 13 таблиц.

**Во введении** описаны суть исследования, обозначена цель работы и сформулированы решаемые задачи.

**В первой главе** приведен обзор методов формирования виртуальных изображений, а также дан анализ существующих устройств дополненной реальности. Рассмотрены оптические системы очков дополненной реальности и автомобильных проекционных дисплеев, описаны принципы работы систем с использованием волноводных, дифракционных и голографических оптических элементов.

**Во второй главе** представлен метод формирования виртуального изображения в очках дополненной реальности с использованием клиновидного изогнутого волновода и голографической линзы. Форма изогнутого клиновидного волновода подобрана таким образом, чтобы при распространении изображающих пучков в условиях полного внутреннего отражения (ПВО) пучки каждого углового направления достигали точки, в которой угол ПВО нарушается и излучение выводится из волновода без использования дополнительных оптических элементов. Затем изображающие пучки перенаправляются в зрачок пользователя с помощью голографической линзы, формируя изображение на сетчатке глаза пользователя и создавая виртуальное изображение. Представленная система обладает высокой степенью компактности при формировании виртуального изображения с широким полем зрения. Приведены расчет параметров оптической системы, а также результаты ее моделирования.

**В третьей главе** представлена оптическая система очков дополненной реальности, в которой виртуальное изображение формируется с помощью комбинации двух голографических оптических элементов – голографического диффузора и осевой голографической линзы. Осевая голографическая линза, сформированная с помощью концентрических осевых пучков, вызывает малые aberrации в оптической системе очков дополненной реальности, что позволяет достичь не только широкого поля зрения в системе, но и большого выходного зрачка. Представлены результаты моделирования системы, а также сборки экспериментальной установки.

**В четвертой главе** представлен метод увеличения поля зрения в автомобильном проекционном дисплее на основе волновода с размножением выходного зрачка, в котором также формируется автостереоскопическое 3D изображение, путем формирования зон видения в плоскости выходного зрачка системы и отображения ракурсных изображений в каждой зоне видения. Увеличение поля зрения выполняется путем изменения модуля формирования зон видения, который включает в себя линзовые растры, фокусные расстояния которых могут быть подобраны таким образом, чтобы увеличить поле зрения системы, а также повысить ее энергетическую эффективность, при сохранении компактности. Представлены результаты моделирования, а также сборки экспериментальной установки.



**В заключении** сформированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, которые заключаются в следующем:

1. С помощью интеграции клиновидного изогнутого волновода в систему очков дополненной реальности достигается формирование виртуального изображения в широком поле зрения, и при этом сохраняется компактность системы;

2. Осевой голографический оптический элемент, сформированный с помощью концентрических сферических волн, обладает плоским промежуточным изображением, что существенно снижает aberrации в изображающей системе очков дополненной реальности и позволяет достичь большого выходного зрачка изображающей системы;

3. Предложен метод увеличения поля зрения для системы ПД на основе волновода с размножением выходного зрачка и с возможностью формирования 3D изображения, а также продемонстрированы результаты по увеличению поля зрения системы в 1.6 раз.

Достоверность представленных результатов не вызывает сомнений ввиду согласованности между теоретическими вычислениями и полученными результатами в ходе сборки экспериментальных устройств.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

– При использовании клиновидного изогнутого волновода из-за дисперсии материала волновода могут появляться хроматические aberrации. Возможно, этот эффект не очень существенен, однако в диссертации он не рассматривается и оценки не приводятся.

– Очки дополненной реальности формируют виртуальное изображение на бесконечности, однако это подходит только для людей с идеальным зрением. Из диссертации непонятно есть ли какое-то решение для людей с нарушениями зрения, особенно с астигматизмом.

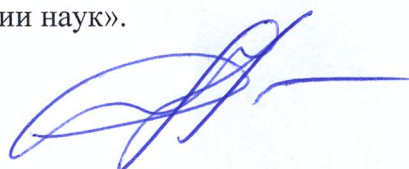
Эти замечания носят частный характер и не снижают научной значимости работы. Диссертация представляет собой целостное, законченное научное исследование. Содержание диссертации соответствует целям работы и названию. Защищаемые положения и выводы хорошо обоснованы. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, были представлены на 5 международных конференциях в виде устных докладов. Основные результаты были опубликованы в трех журналах и двух материалах конференций, входящих в квартили Q2 и Q3. Оформлено 2 патента на изобретения. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационное исследование А. А. Калининой «Применение волноводных и дифракционных оптических элементов в

изображающих системах» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, результаты оригинальных исследований вносят существенный вклад в развитие методов формирования виртуальных изображений в системах дополненной реальности, а ее автор Калинина Анастасия Андреевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Отзыв составил:

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



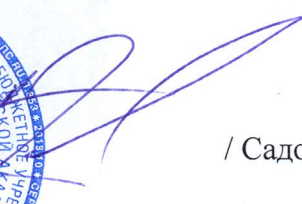
/ Спиридонов Максим Владимирович /

дата 01.12.2023

Адрес: Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32  
maxim.spiridonov@gmail.com  
+7(495) 333-10-67

Подпись Спиридонова Максима Владимировича заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук», кандидат физико-математических наук



/ Садовский Андрей Михайлович /

Адрес: Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32



Список основных публикаций официального оппонента М.В. Спиридонова в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. B.Stepanov, O.Benderov, T.Tebeneva, G.Snopatin, M.Spiridonov, I.Scripachev. "Chalcogenide optical fiber couplers made by FBT method". // Journal of Non-Crystalline Solids, v480, p. 23-27 (2018). (DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.020)
2. D.B.Abramenko, M.V.Spiridonov, P.V.Krainov, V.M.Krivtsun, D.I.Astakhov, V.V.Medvedev, M. van Kampen, D.Smeets, K.N.Koshelev. "Measurements of hydrogen gas stopping efficiency for tin ions from laser-produced plasma". // Applied Physics Letters. 112, 164102, (2018). (DOI:10.1063/1.5025914)
3. O.Benderov, I.Nechepurenko, B.Stepanov, T.Tebeneva, T.Kotereva, G.Snopatin, I.Skipachev, M.Spiridonov, A.Rodin. "Broadband mid-IR chalcogenide fiber couplers". // Applied Optics v58, N 26, p.7222-7226, 2019. (DOI: 10.1364/AO.58.007222)
4. D.B.Abramenko, P.S.Antsiferov, D.I.Astakhov, A.Yu.Vinokhodov, I.Yu.Vichev, R.R.Gayazov, A.S.Grushin, L.A.Dorokhin, V.V.Ivanov, D.A.Kim, K.N.Koshelev, P.V.Krainov, M.S.Krivokorytov, V.M.Krivtsun, B.V.Lakatosh, A.A.Lash, V.V.Medvedev, A.N.Ryabtsev, Yu.V.Sidelnikov, E.P.Snegirev, A.D.Solomyannaya, M.V.Spiridonov, I.P.Tsygvintsev, O.F.Yakushev, A.A.Yakushkin. "Plasma-based sources of extreme ultraviolet radiation for lithography and mask inspection". // Phys. Usp. v62 p.304–314 (2019) (DOI: 10.3367/UFNE.2018.06.038447)
5. S.G.Zenevich, A.Yu.Klimchuk, V.M.Semenov, M.V.Spiridonov, A.V.Rodin. "Measurements of a fully resolved contour of the carbon dioxide absorption line in a band at  $\lambda = 1.605 \mu\text{m}$  in the atmospheric column using high-resolution heterodyne spectroradiometry". // Quantum Electronics 49 (6) 604 – 611 (2019) (DOI: 10.1070/QEL16859)
6. A.V.Rodin, D.V.Churbanov, S.G.Zenevich, A.Y.Klimchuk, V.M.Semenov, M.V.Spiridonov, I.S.Gazizov. "Vertical wind profiling from the troposphere to the lower mesosphere based on high-resolution heterodyne near-infrared spectroradiometry". // Atmos. Meas. Tech., v13, p.2299–2308, (2020) (DOI: 10.5194/amt-13-2299-2020)
7. S.Zenevich, I.Gazizov, D.Churbanov, M.Spiridonov, A.Rodin. "Improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> atmospheric measurements". // OSA Continuum v.3 (7), p.1801-1810 (2020) (DOI: 10.1364/OSAC.395094)
8. V.V.Meshcherinov, M.V.Spiridonov, V.A.Kazakov, A.V.Rodin. "Lidar-based remote infrared gas sensor for monitoring anthropogenic pollution: a proof of concept". // Quantum Electronics, v.50 (11), p.1055–1062, (2020) (DOI: 10.1070/QEL17398)