

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ФГБУН  
Института автоматики и электрометрии  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.  
С. А. Бабин  
« 20 » февраля 2025 года



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу **Осинцевой Натальи Дмитриевны**  
«Формирование мощных вихревых векторных пучков терагерцового диапазона с помощью дифракционных оптических элементов и их применение в плазмонике»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики

#### **Актуальность темы исследования**

Развитие телекоммуникационных технологий связано с повышением несущих и модуляционных частот, в связи с чем переход в терагерцовый (ТГц) диапазон – всего лишь вопрос времени. В этой связи экспериментальное физическое моделирование явлений и отработка подходов в данной частотной области закладывает фундамент для дальнейшего развития технологий. В диссертационной работе Н. Д. Осинцевой исследован потенциал применения в терагерцовом диапазоне оптических вихрей с бессолоевой модой для решения задач связанных с передачей данных. В частности, целью работы являлось формирование и исследование таких пучков с помощью дифракционных оптических элементов, изучение их поведения в свободном пространстве и взаимодействия с препятствиями, а также возможностей мультиплексирования и модовой идентификации. Дополнительно рассмотрена возможность создания вихревых поверхностных плазмон-поляритонов на аксиально-симметричных проводниках как альтернатива традиционным диэлектрическим волноводам, обеспечивающим транспортировку ТГц-излучения. Особенностью работы является применение уникального источника мощного квазинепрерывного излучения – Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ), который в большой степени обеспечил возможность получения результатов высокого качества. Опираясь на вышеописанное, можно утверждать, что работа Н. Д. Осинцевой является актуальной и лежит в русле приоритетных направлений развития технологий.

## **Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе Н. Д. Осинцевой получен ряд новых результатов.

Впервые исследованы особенности формирования мощных вихревых бесселевых пучков при преобразовании гауссова пучка с помощью спиральных аксиконов с бинарным и кусочно-непрерывным рельефами (далее аксиконы) в терагерцовом диапазоне. Показано, что отстройка длины волны излучения от расчётной для аксикона приводит к возникновению регулярных азимутальных вариаций интенсивности в поперечном распределении интенсивности бесселева пучка в зоне его формирования.

Предложен метод определения моды пучка, основанный на анализе его Фурье-образа после прохождения через фильтрующий аксикон. С помощью данного метода показана также возможность нахождения заданной моды в многомодовом (мультиплексированном) бесселевом пучке.

Поскольку при аналогичных параметрах аксикона диаметр колец сформированного бесселева пучка растёт с увеличением моды (топологического заряда), и Н. Д. Осинцева следовала подходу формирования «совершенных» вихревых ТГц-пучков, диаметр которых не зависит от топологического заряда. С помощью таких пучков впервые показана возможность формирования вихревых поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) с различной модой на образце, обладающем аксиальной симметрией с фиксированным диаметром входного торца, значительно превышающим длину волны излучения.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы достаточно четко и хорошо согласуются с основными результатами работы, изложенными в диссертации. Их достоверность не вызывает сомнения, так как они основываются на известных физических законах и принципах, подтверждаются соответствием между физическими и численными экспериментами, согласуются с литературными данными, могут быть независимо проверены другими исследовательскими группами, и принимаются экспертным сообществом в форме принятия к публикации в высокорейтинговых научных изданиях и при заслушивании в форме устных и приглашенных докладов на крупных всероссийских и международных конференциях.

## **Практическая ценность результатов**

Научная значимость определяет и практическую ценность результатов работы, так как они

могут внести вклад в развитие области телекоммуникации. Полученные результаты по созданию вихревых ППП важны для дальнейших исследований в области фотоники и оптоэлектроники терагерцового диапазона и обладают потенциалом применения в системах, требующих «захват» пучков ТГц-излучения для их дальнейшей обработки. Они также потенциально пригодны для управления светом на микро- и наномасштабах, что может лечь в основу создания более эффективных оптических приборов и сенсоров. Сами же терагерцовые оптические вихри могут повысить производительность и надёжность беспроводных сетей, обеспечивая стабильную связь даже в неблагоприятных условиях. Разработанный метод идентификации моды бесселева пучка может лечь в основу модовых спектрометров, востребованных в будущем для соответствующих систем детектирования.

### **Содержание диссертации и замечания по диссертационной работе**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа изложена на 117 страницах и включает 53 рисунка. Список литературы содержит 109 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, описаны объекты и методы исследования, представлены цель и задачи работы, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения, отмечен личный вклад автора и приведены данные об апробации работы.

**В первой главе** описана экспериментальная станция на базе НЛСЭ и оборудование, использованное в работе, в частности детекторы и ключевые оптические элементы. Приводится описание методов численного моделирования и аналитического расчёта.

**Вторая глава** диссертации посвящена формированию совершенных векторных вихревых пучков с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Рассмотрены результаты использования ДОЭ для создания таких пучков в свободном пространстве. Экспериментально и численно показано, что в поперечном сечении пучков возникают периодические азимутальные вариации интенсивности, что отличает их от аналитического описания. Этот эффект автор диссертации связывает с дифракцией на оптических элементах и ограниченными размерами апертуры. Погрешности в изготовлении ДОЭ приводят к отклонениям в глубине рельефа, влияющим на фазу волны. Приведены исследования демонстрирующие такое свойство бесселевых пучков как «самовосстановление» в случаях как амплитудных, так и фазовых

препятствий. В работе экспериментально реализованы два метода формирования радиальной поляризации, требуемой для формирования ППП на осесимметричном проводнике. В данную задачу, являющуюся целью работы, также входило формирование бесселевых пучков с разными топологическими зарядами определенного размера, соответствующего диаметру цилиндрического проводника. Для чего предложены и экспериментально сформированы «совершенные» вихревые пучки, диаметр которых не зависит от топологического заряда. В схеме Маха-Цендера была реализована возможность получения суперпозиции двух бесселевых пучков с разными комбинациями топологических зарядов в одном (мультиплексирование мод).

**В главе 3** описывается метод определения (идентификации) бесселевой и эрмит-гауссовой мод ТГц-пучка с помощью ДОЭ. Метод основывается на анализе Фурье-образа пучка прошедшего через ДОЭ, фазовая функция которого совпадает с функцией сформировавшего пучок ДОЭ. Этот процесс представляет собой своего рода корреляцию между известным и исследуемым сигналами. В случае положительного корреляционного отклика формируется узкий пик интенсивности в центре фурье-изображения пучка. Метод успешно применён для идентификации различных мод бесселевых пучков, формируемых бинарными аксиконами, включая обнаружение искомой моды в многомодовом (мультиплексированном пучке).

**Четвертая глава** диссертации посвящена возбуждению и регистрации вихревых ППП на металлическом цилиндрическом проводнике, покрытом слоем диэлектрика ZnS, с применением результатов, приведенных в Главе 2. Для генерации ППП применялся метод дифракции на краю, как один из наиболее простых и эффективных. Приведены экспериментальные результаты регистрации излучения дифрагировавшего с кончика образца, по которому можно сделать вывод о распространении вихревых ППП по поверхности цилиндра. Описаны экспериментальные результаты исследования вращения вихревых ППП при их распространении по образцу: показано как угол вращения зависит от топологического заряда, освещающего образец вихревого пучка. Приведено сравнение экспериментальных и аналитических данных, которые хорошо согласуются.

К работе есть ряд незначительных замечаний.

1. Соискатель регулярно делает акцент на термине «мощные пучки», хотя такое акцентирование не видится достаточно обоснованным. Полученные результаты применимы для пучков любой мощности.

2. Алмазный спиральный аксикон с кусочно-непрерывным рельефом определяется как «голографический», хотя, по сути, любые ДОО, используемые в работе, являются фазовыми и могут быть названы «голографическими».
3. В последней главе, посвященной возбуждению и регистрации, поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), вносит путаницу применение термина «дифрагирующая волна». С одной стороны, ППП регистрируются посредством данной волны, оторвавшейся с кончика цилиндра, что схематично отражено на рис. 4.2. С другой стороны, на стр. 88 приводится описание данной схемы: «...ирисовая диафрагма  $D$ , которая отрезала возможное попадание на детектор свободной волны и дифрагировавшего с цилиндра излучения.», что создаёт впечатление, что эта волна является паразитной.

Данные замечания не касаются основных результатов и выводов диссертации, которые не подвергаются сомнению, и не сказываются на высокой оценке работы. Диссертационная работа Н. Д. Осинцевой «Формирование мощных вихревых векторных пучков терагерцового диапазона с помощью дифракционных оптических элементов и их применение в плазмонике» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по актуальной тематике и демонстрирует высокую научную новизну. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики. Определяющая роль автора в выполнении рецензируемого исследования не вызывает сомнения.

Автореферат диссертации полно отражает содержание диссертационной работы.

Результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, 1 коллективной монографии и 56 тезисах докладов. Основные результаты диссертации прошли тщательную апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Результаты диссертации будут интересны многим научным российским группам, работающим в области сингулярной оптики и терагерцового излучения (МГУ, ИТМО, ЛЭТИ, МФТИ, НИЦ «Курчатовский институт»), а также имеют потенциал применения при разработке систем передачи данных.

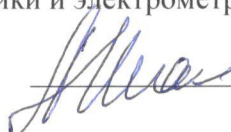
### **Заключение**

Оценивая диссертацию Осинцевой Н. Д. «Формирование мощных вихревых векторных пучков терагерцового диапазона с помощью дифракционных оптических элементов и их

применение в плазмонике» в целом, можно утверждать, что по объему и оригинальности полученных результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов она соответствует требованиям и критериям, предъявляемым ВАК в соответствии с пп. 9-14, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), а ее автор является квалифицированным специалистом в области терагерцовой фотоники, сингулярной и дифракционной оптике, а также плазмонике. Сама же Осинцева Наталья Дмитриевна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики.

Материалы диссертации были доложены на объединенном научном семинаре учебно-научных центров «Квантовая оптика» и «Информационные технологии и системы» Института автоматики и электрометрии СО РАН 6 февраля 2025 г. и единогласно поддержаны участниками семинара.

Руководитель семинара  
Академик РАН, профессор, доктор физико-математических наук  
Научный руководитель Института автоматики и электрометрии СО РАН

 Шалагин Анатолий Михайлович

Отзыв подготовил:  
Кандидат технических наук  
ведущий научный сотрудник  
заведующий лабораторией терагерцовой фотоники  
Института автоматики и электрометрии СО РАН  
Тел.: +7 962 832 0510  
E-mail: nazar@iae.nsk.su

 Николаев Назар Александрович

Подписи Николаева Н. А. и Шалагина А. М. заверяю:

Ученый секретарь Института автоматики и электрометрии СО РАН  
кандидат физико-математических наук

 Иваненко Алексей Владимирович

19 февраля 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук  
Адрес: 630090, г. Новосибирск, Пр-т Ак. Коптюга, 1;  
Тел. +7 (383) 330-79-69 E-mail: [iae@iae.nsk.su](mailto:iae@iae.nsk.su) Сайт организации: <https://www.iae.nsk.su/ru/>