

На правах рукописи



Осинцева Наталья Дмитриевна

**ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ВИХРЕВЫХ ВЕКТОРНЫХ
ПУЧКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОМОЩЬЮ
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ В ПЛАЗМОНИКЕ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук
Чопорова Юлия Юрьевна

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

Лукин Владимир Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, главный научный сотрудник

Петров Николай Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «11» марта 2025 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «22» января 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ), или оптические вихри, играют большую роль в современной оптике и важны для различных приложений. Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений является применение таких пучков в телекоммуникационных системах. Поверхность волнового фронта оптических вихрей представляет собой один или несколько геликоидов, вращающихся вокруг оси распространения, число которых называется топологическим зарядом l и может принимать значения от ± 1 (где знак показывает направление вращения геликоида) до нескольких тысяч. Есть примеры работ в ближнем ИК-диапазоне, где были получены вихревые пучки с $l=10010$ [1]. Сам же ОУМ является физической величиной, характеризующейся моментом импульса, который может быть передан частице. Для каждого фотона он равен произведению $l\hbar$, где \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π .

Актуальность настоящей работы обусловлена растущей потребностью к повышению объема передаваемых данных в беспроводных сетях. С одной стороны, это обеспечивается повышением частоты передаваемого излучения, по сравнению с радиодиапазоном, и переходом к терагерцовым (ТГц) частотам. Сопутствующее уменьшение длины волны приводит к уменьшению дифракционной расходимости, что позволит осуществить передачу сигнала направленными коллимированными пучками, сформированными при помощи компактных оптических элементов. С другой стороны, предлагаемое применение пучков с бесселевой поперечной модой, в противовес распространённой гауссовой, обеспечит устойчивость сигнала при передаче в атмосфере благодаря их уникальным свойствам: «бездифракционности» и «самовосстановлению» после встречи с преградами. Еще одним преимуществом пучков с ОУМ является возможность их мультиплексирования, т.е. сложения в один пространственный канал множества пучков с разным l , передаваемых на одной частоте. Это дополнительно повысит информационную плотность передаваемых сигналов. В настоящий момент данные многообещающие методы и подходы являются новыми и малоисследованными для ТГц-

диапазона. В связи с этим их экспериментальная апробация востребована, особенно учитывая активно осуществляемый переход в субтерагерцовый диапазон частот (120–350 ТГц) беспроводных сетей (например, 6G).

Вихревые пучки могут применяться и для проводной передачи данных. В ТГц-области активно развивается волноводный подход для передачи данных в миниатюрных интегральных устройствах. Однако существует альтернативное решение, основанное на возбуждении волн на поверхности проводника. Одной из разновидностей таких волн являются поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), которые представляют собой комплекс электромагнитной волны и волны свободных зарядов на поверхности проводника, распространяющийся вдоль границы раздела сред между металлом и диэлектриком. ППП хорошо исследованы в видимом и среднем инфракрасном диапазонах. В ТГц же диапазоне исследования начались относительно недавно, но число работ в этом направлении непрерывно растет.

Настоящая работа посвящена формированию мощных вихревых бесселевых пучков ТГц-спектра с помощью дифракционных оптических элементов (ДОО), в качестве которых использовались фазовые аксиконы; исследованию их свойств, а также особенностей распространения в свободном пространстве и при взаимодействии с препятствиями; возможности их мультиплексирования и модовой идентификации для потенциального применения в телекоммуникационных системах. В работе уделено внимание демонстрации возможности генерации вихревых поверхностных плазмон-поляритонов на аксиально-симметричном проводнике в качестве альтернативы волноводам в интегральных ТГц-устройствах.

Экспериментальные исследования в данной работе были выполнены с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) – источника мощного квазимонохроматического излучения, перестраиваемого по частоте в диапазоне от 0,74 до 37,47 ТГц (8–403 мкм).

Степень разработанности темы исследования

Исследование вихревых пучков берет начало с 1990х годов и они уже были реализованы во многих диапазонах длин волн, начиная с радио, заканчивая рентгеновским, включая ТГц-диапазон. Однако

в существующих работах не рассматривалось формирование мощных вихревых пучков, обладающих модой Бесселя. Наличие в данной работе мощного ТГц-излучения потребовало решения ряда задач, связанных с изготовлением элементов, таких как выбор материалов с высокой лучевой стойкостью и разработка технологии изготовления рельефа. Большинство методов, примененных в работе, а именно формирование «совершенных» вихревых пучков и пучков с радиальной поляризацией, активно применяются в видимом диапазоне и в данной работе были адаптированы для работы с ТГц-излучением высокой мощности на длине волны 141 мкм. При этом впервые мощные мультиплексные ТГц бесселевы пучки были сформированы в интерферометрической схеме Маха-Цендера, а также предложен метод распознавания l таких пучков, основанный на применении ДОЭ и анализе Фурье-образа, прошедшего через него пучка.

ППП являлись предметом исследования достаточно давно (начиная с 1970х годов). Основные исследования проводились по распространению ППП на плоской поверхности. Однако генерация поверхностных плазмон-поляритонов на аксиально-симметричной поверхности в ТГц-диапазоне является новой темой и не была ранее исследована мировым научным сообществом. В литературе есть примеры работ распространения по тонкой проволоке микро- [2] и нанометрового [3] размера ППП с частотой, соответствующей видимому диапазону. Однако наблюдаемые тогда эффекты отличны от случая, рассмотренного в данной работе. В случае тонкой проволоки проводник работает как направляющая, с которой связана распространяющаяся волна. В данной работе распространение поверхностных плазмон-поляритонов по проводнику можно рассматривать как движение по плоской поверхности из-за большого по сравнению с длиной волны диаметра образца. Данное исследование является фундаментальным и на данный момент трудно применимым в прикладных областях. Требуется развитие технологий терагерцового диапазона для применения результатов данной работы на практике. Несмотря на то, что работа проделана с использованием ТГц-излучения, продемонстрированные эффекты характерны и для других спектральных диапазонов.

Целью данной работы является исследование вихревых бесселевых пучков в терагерцовом диапазоне для генерации поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся по

аксиально-симметричному волноводу. Для достижения данной цели в рамках работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование свойств вихревых бесселевых пучков терагерцового диапазона, сформированных с помощью фазовых дифракционных элементов (с бинарным и кусочно-непрерывным профилями);
2. Формирование вихревых бесселевых пучков с комбинированным топологическим зарядом и разработка метода идентификации бесселевой моды в регистрируемом пучке (как в одномодовом, так и в многомодовом случаях) с помощью дифракционных оптических элементов, аналогичных используемым для формирования вихревого бесселева пучка;
3. Создание совершенного вихревого пучка, то есть кольцевого пучка, не меняющего диаметр при изменении орбитального углового момента, с радиальной поляризацией для генерации вихревых поверхностных плазмон-поляритонов на аксиально-симметричном проводнике;
4. Исследование свойств вихревых поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся на аксиально-симметричном проводнике.

Научная новизна

Впервые экспериментально изучен ряд особенностей, присущих мощным вихревым бесселевым пучкам ТГц-диапазона в зависимости от параметров формирующих дифракционных аксиконов. В частности, экспериментально и численно показано, что отклонение от расчетной длины волны пучка, освещающего аксиконы (как с бинарным, так и с кусочно-непрерывным рельефом), приводят к регулярным вариациям интенсивности по азимуту в кольцах бесселева пучка и его Фурье-образа.

Комбинации мощных вихревых пучков Бесселя терагерцового диапазона с различными топологическими зарядами сформированы в интерферометрической схеме Маха-Цендера. Предложен и апробирован метод, позволяющий выделять сигнал с заданным топологическим зарядом. Метод основан на анализе Фурье-образа пучка, прошедшего через кремниевый дифракционный оптический

элемент, установленный в зоне его формирования, с фазовой функцией, совпадающей с функцией сформировавшего данный пучок элемента. Параметры элемента рассчитаны на длину волны ТГц-излучения НЛСЭ. Метод был реализован как в случае одномодового, так и многомодового пучка, включающего в себя комбинацию вихревых бесселевых пучков с топологическими зарядами -1 и -2.

В терагерцовом диапазоне впервые получены мощные вихревые пучки, диаметр которых не зависит от топологического заряда пучка, так называемые «совершенные» вихревые пучки.

Впервые сформированы поверхностные плазмон-поляритоны терагерцового диапазона на аксиально-симметричной поверхности. В качестве освещающего пучка использовался совершенный вихревой радиально-поляризованный пучок, диаметр которого соответствовал диаметру входного торца образца.

Впервые показано, что направление вращения и питч-фактор вихревых плазмон-поляритонов зависят от топологического заряда освещающего пучка.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработка методов генерации вихревых плазмонов имеет большую научную значимость во многих областях. Применение вихревых ППП открывает новые возможности для манипуляции светом на наномасштабе, что может привести к разработке более эффективных оптических устройств, сенсоров и методов передачи информации. В контексте телекоммуникаций, вихревые пучки могут значительно улучшить производительность и эффективность беспроводных систем связи, а также обеспечить стабильность сигнала при работе в сложных погодных условиях.

Методология и методы диссертационного исследования

Экспериментальные исследования в работе были выполнены с использованием терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах – самого мощного в мире источника узкополосного излучения с длиной волны, перестраиваемой в диапазоне от 8 до 403 мкм. Формирование вихревых бесселевых и эрмит-гауссовых пучков было выполнено с помощью фазовых элементов с бинарным и кусочно-непрерывным рельефом. Моделирование распределения интенсивности бесселевых и эрмит-

гауссовых пучков выполнялось методом расчёта интеграла Гюйгенса-Френеля. Свойства бесселевых пучков, связанные с наличием орбитального углового момента, исследовались рядом дифракционных и интерференционных методов, доказывающих наличие у таких пучков геликоидального фазового волнового фронта.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Отклонение длины волны излучения от расчетных значений для аксионов терагерцового диапазона с бинарным и кусочно-непрерывным рельефами приводят к периодическим вариациям азимутального распределения интенсивности бесселева пучка и его Фурье-образа.
2. Разработанный метод, основанный на анализе Фурье-образа бесселева терагерцового пучка, прошедшего через бинарный дифракционный оптический элемент на подложке из материала, прозрачного в терагерцовой области спектра, установленный в зоне его формирования, с фазовой функцией, совпадающей с функцией формирующего заданную бесселеву моду элемента и рассчитанный на длину волны терагерцового пучка, позволяет идентифицировать заданный бесселев пучок в случае одномодового терагерцового пучка, а также в составе многомодового терагерцового пучка.
3. Вихревые поверхностные плазмон-поляритоны возбуждаются на цилиндрическом проводнике при дифракции на его торце «совершенного» вихревого пучка, распространяются вдоль винтовых линий на его поверхности, сохраняя орбитальный угловой момент исходного пучка, и трансформируются на его конце в свободную волну с тем же значением топологического заряда.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные материалы исследований, лежащие в основе диссертации докладывались на ряде крупных международных и российских конференций: Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application (г. Новосибирск, Россия, 2016, 2018, 2020, 2022), III Международная конференция и молодежная

школа «Информационные технологии и нанотехнологии» ИТНТ-2017 (г. Самара, Россия, 2017), 10th International Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and applications» SMP-2017 (г. Нижний-Новгород, 2017), 43th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW THz-2018) (г. Нагоя, Япония, 2018), International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications «TERA» (г. Нижний Новгород, Россия, 2018; г. Москва, Россия 2023), Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (г. Нижний Новгород, Россия, 2019, 2022), XXXII Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике HOLOSCHOOL XXXII (г. Санкт-Петербург, Россия, 2022), Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO Science & Practice (г. Санкт-Петербург, Россия, 2022; г. Сочи, Россия, 2023), Photonics Asia 2023 (г. Пекин, Китай, 2023), Photonics of Vortex Light: problems and perspectives (г. Самарканд, Узбекистан, 2023), Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах (СИ и ЛСЭ – 2024) (г. Новосибирск, Россия, 2024 г.), 21st International Conference Laser Optics ICLO 2024 (г. Санкт-Петербург, Россия, 2024), XXI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям Холоэкспо Наука и Практика 2024 (г. Казань, Россия, 2024), The 31st International Conference Advanced Laser Technologies ALT 2024 (г. Владивосток, Россия, 2024).

По теме диссертации опубликовано 6 работ [4-9] в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 1 коллективная монография, 56 тезисов докладов в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим и заключается в создании соответствующей экспериментально-макетной техники и анализе экспериментальных данных. Автор принимал активное участие в обсуждении полученных результатов и их интерпретации, представлении их на научных конференциях, а также в подготовке научных публикаций. Авторский вклад соискателя заключается:

в статье [4] – в проведении численного моделирования и

экспериментальных исследований, сборке и юстировке экспериментального стенда, постановке эксперимента, обработке и анализе экспериментальных данных;
в статьях [5, 6, 7, 9] – в проведении экспериментальных исследований, сборке и юстировке экспериментального стенда, постановке эксперимента, обработке и анализе экспериментальных данных, подготовке рисунков и написании текста публикации;
в статье [8] – в проведении численного моделирования и экспериментальных исследований, сборке и юстировке экспериментального стенда, постановке эксперимента, обработке и анализе экспериментальных данных, подготовке рисунков и написании текста публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. В заключении приводятся результаты выполненного исследования и перспективы дальнейшей разработки темы. Полный объем диссертации составляет 117 страниц, включая 53 рисунка. Список литературы содержит 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность поставленной научной задачи, которая определяет необходимость разработки новых методов, ставятся цель и задачи диссертации.

В первой главе описана экспериментальная станция НЛСЭ «Терагерцовая и инфракрасная фотоника» где проводились все эксперименты, результаты которых вошли в диссертационную работу. Рассмотрен принцип работы НЛСЭ и перечислены основные параметры его излучения. Приведено описание методов детектирования ТГц-излучения с помощью неохлаждаемого матричного микроболометрического приемника и пироэлектрической камеры Ругосам IV. Рассмотрены принципы работы и основные параметры данных приемников в терагерцовом диапазоне.

Важным аспектом исследований в новом диапазоне электромагнитного спектра, коим является ТГц-диапазон, является наличие оптических элементов для управления этим излучением. В главе описаны пленочные светоделители, линзы и ДОЭ,

использованные в экспериментах для манипулирования ТГц-излучением с целью создания заданных пространственных распределений интенсивности и модового состава мощных пучков НЛСЭ. Подробно рассмотрены ДОО для формирования вихревых пучков с бесселевой модой: фазовые бинарные аксиконы (БА) и голографический аксикон (ГА) с кусочно-непрерывным азимутальным рельефом, бинарным по радиусу. Описаны нюансы, связанные с изготовлением элементов и проведением экспериментов, такие как отклонения длины волны излучения от расчетной, что вызывает периодические азимутальные вариации поперечного распределения интенсивности (ПРИ) бесселевого пучка и его Фурье-образа. Численно продемонстрировано, что бесселев пучок формируется с эффективностью более 20% даже при освещении бинарного аксикона излучением с длиной волны отличной от расчетной, а именно в диапазонах 28 – 42 мкм и 102 – 178 мкм. Показано, что зона формирования бесселева пучка при длине волны излучения в три раза меньше расчетной увеличивается в три раза.

Вторая глава посвящена методам, примененным в работе для формирования «совершенных» вихревых бесселевых пучков, диаметр которых не зависит от l . Показаны результаты формирования и исследования вихревых бесселевых пучков в свободном пространстве с помощью ДОО, описанных в предыдущей главе. Представлены экспериментальные и расчетные данные ПРИ бесселевых пучков, полученных в результате преобразования ТГц гауссова пучка НЛСЭ с помощью бинарных кремниевых фазовых аксиконов и алмазного аксикона с кусочно-непрерывным рельефом, рассчитанных на рабочую длину волны 141 мкм. С помощью имеющихся аксиконов были сформированы бесселевы пучки с $l/l=1, 2, 3, 4, 9$.

ПРИ бесселева пучка, описываемое аналитически, представляет собой набор концентрических колец с постоянной амплитудой по азимуту (рисунок 1а). В численном же моделировании пучков, основанном на расчете интеграла Гюйгенса-Френеля, а также в экспериментальном исследовании, наблюдается периодическая азимутальная вариация интенсивности внутри колец (рисунок 1б, в, г). Это может быть связано с дифракционной природой оптических элементов и ограниченностью апертуры пучков. В зависимости от отстройки длины волны излучения, число

наблюдаемых максимумов вариации может быть $2l$ (рисунок 1б) или l (рисунок 1в, г), что проявляется также в Фурье-образе пучков, а амплитуда вариаций растет с величиной отстройки. Аналогичные эффекты наблюдаются и для ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом.

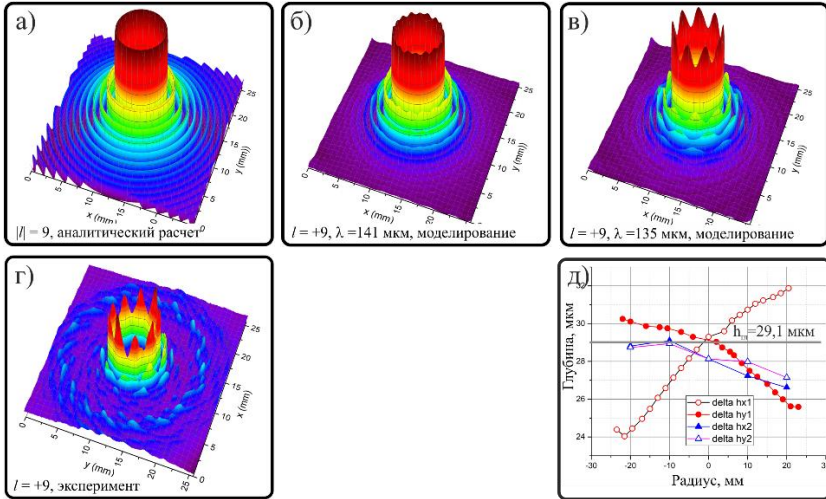


Рисунок 1 – ПРИ бesselевы пучка с $l = +9$, сформированных бинарным аксиконом, освещаемым гауссовым пучком с радиусом 12,1 мм а) аналитический расчет; б), в) численное моделирование на длинах волн 141 и 135 мкм; г) эксперимент; д) зависимость глубины рельефа бинарных аксиконов вдоль двух перпендикулярных диаметров: круги – $l = 9$; треугольники – $l = 3$

Технологическая погрешность изготовления ДОЭ, также может оказывать влияние на ПРИ формируемых ими пучков, поскольку отклонение глубины рельефа напрямую переходит в ошибку фазы волны. Рельеф формирующих бesselевы пучки с $l = 3$ и $l = 9$ БА был измерен вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров (рисунок 1д). Разброс измеренной глубины от расчетного значения $h_{2l} = \lambda / 2(n - 1) = 29,1 \text{ мкм}$ составил ± 1 и $\pm 4 \text{ мкм}$ соответственно, что соответствует 3–10% от среднего значения.

Вихревые бesselевы пучки обладают уникальными свойствами «бездифракционности» и «самовосстановления». «Бездифракционность» пучков проявляется в сохранении ПРИ на определенном расстоянии при распространении, что отличает их от,

например, вихревых лаггер-гауссовых пучков. В случае представленных аксиконов длина зоны бездифракционности составляла $100 \div 280$ мм от аксикона. Свойство «самовосстановления» означает способность пучков восстанавливать свое исходное распределение интенсивности на некотором расстоянии после взаимодействия с препятствием и деформации волнового фронта. Данное свойство было продемонстрировано как с амплитудными (алюминиевые фольги), так и с фазовыми (вспененный и гранулированный полипропилен) препятствиями. В обоих случаях после прохождения препятствия пучок сохранял бесселеву моду. Однако стоит отметить, что в случае амплитудного препятствия необходимым условием восстановления является наличие преграды с размером меньшим диаметра, освещающего бесселева пучка.

Формирование поверхностных плазмон-поляритонов требует наличия у пучка поляризации ортогональной к поверхности распространения. В случае аксиально-симметричного проводника необходимо формирование пучка с радиальной поляризацией. Данное требование можно выполнить формированием векторного пучка, который представляет собой пучок с пространственно-модулированным состоянием в поперечной плоскости. Частным случаем векторного пучка являются радиальная и азимутальная поляризация, получение которых было показано экспериментально. Для формирования радиальной поляризации в работе были использованы два метода:

1. с помощью сложения в схеме интерферометра Маха-Цендера ортогональных линейно поляризованных мод Эрмита-Гаусса (ЭГ) с номерами $(1,0)$ и $(0,1)$.
Соответствующие моды были сформированы с помощью моданов;
2. с помощью сегментной полуволновой пластинки.

Наличие проводника конечного размера, по которому будет распространяться ППП, накладывает ограничение на размер освещающего образец пучка. Однако для бесселевых пучков известно, что с увеличением l увеличивается диаметр пучка в поперечном сечении, что приводит к невозможности формировать на одном и том же образце вихревые ППП с разными l . В целях решения этой проблемы необходимо было создать так называемый «совершенный» вихревой пучок, диаметр которого не зависит от l .

Фурье-образ бesselева пучка, сформированного бинарным аксиконом, получаемый в фокальной плоскости линзы представляет собой кольцо, состоящее из дуг, количество которых эквивалентно $2l$ пучка. Радиус кольца r_f зависит от фокусного расстояния линзы

$$r_f = \frac{\lambda}{p} f, \text{ где } p - \text{ период аксикона. Таким образом, имея аксиконы с}$$

одинаковыми параметрами ДОЭ и варьируя f , мы можем получать распределения интенсивности в поперечном сечении вихревых бesselевых пучков с разными l , но одинаковыми радиусами.

Возможность осуществления мультиплексности информационных каналов мощными бesselевыми пучками продемонстрирована с помощью схемы Маха-Цендера, где в плечах интерферометра формировались вихревые пучки с различным l , которые на выходе объединялись в один, одновременно несущий топологический заряд $|1| \& |2|$ или $|3| \& |9|$.

В третьей главе описан метод идентификации бesselевой моды мощного ТГц-пучка с помощью дифракционных оптических элементов, схема и результаты приведены на рисунке 2.

Метод основан на анализе Фурье-образа пучка с искомой модой, прошедшего через бинарный ДОЭ, с фазовой функцией, совпадающей с функцией сформировавшего данный пучок элемента и рассчитанный на длину волны ТГц-пучка. Процесс такой фильтрации сводится к корреляции между неизвестным и заранее определенным сигналом. В результате чего мы наблюдаем положительный (светлое пятно в центре изображения) или отрицательный (радиально-симметрично расположенные лепестки с темным пятном в центре) отклик. Предварительно подход был апробирован для идентификации ЭГ мод в ТГц-пучке (были выбраны моды ЭГ с номерами $(1,0)$ и $(0,1)$), далее подход был перенесен на случай бesselевых пучков, сформированных с помощью бинарных аксиконов. В данном случае фильтрующий элемент устанавливался в зоне формирования бesselева пучка. Идентификация моды Бесселя в ТГц-пучке была продемонстрирована как для одномодового, так и для многомодового случаев, где в качестве фильтрующих аксиконов использовались элементы с $|l|=1, 2, 3, 4$, а пучок с комбинацией топологических зарядов -1 и -2 освещал фильтрующую систему.

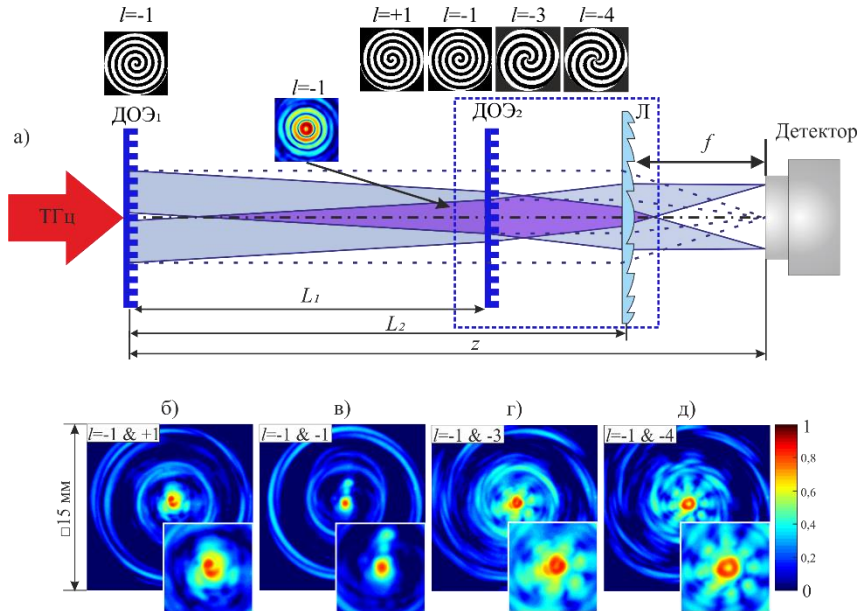


Рисунок 2 – а) экспериментальная схема идентификации бесселевой моды с использованием бинарных аксиконов: ДОЭ₁, ДОЭ₂ – фазовые БА, Л – киноформная полипропиленовая линза с $f=75$ мм, Детектор: Ругосат IV. Пунктирной рамкой выделена фильтрующая система. Расстояния: $L_1=180$ мм, $L_2=285$ мм; Экспериментально наблюдаемое ПРИ поля пучка сформированного БА с $l_{DOE1}=-1$ после фильтрации БА с: (б) $l_{DOE2}=+1$; (в) $l_{DOE2}=-1$; (г) $l_{DOE2}=-3$; (д) $l_{DOE2}=-4$. Размер изображения: 15x15 мм, врезки – 4x4 мм. Каждый кадр нормирован на максимум интенсивности

Четвертая глава посвящена применению вышеизложенных результатов для генерации и исследования распространения вихревых ППП по осесимметричному проводнику, представляющему собой металлический цилиндр, покрытый слоем диэлектрика ZnS толщиной 1 мкм. В работе использовались образцы с диаметрами (7 и 10 мм) много большими длины волны излучения. В первом разделе описан метод генерации ППП, примененный в работе – дифракции на краю, один из наиболее эффективных и простых в реализации методов. Далее внимание уделено описанию использованных в исследовании образцов. В заключении главы

приведены результаты, полученные с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рисунке 3. С помощью камеры микроболометрических приемников и оптической системы $2f$ - $2f$ было зарегистрировано излучение, дифрагирующее с кончика цилиндрического образца ($\varnothing 2$ мм). В результате анализа было показано, что данное излучение является ППП (т.к. при изменении поляризации освещающего излучения с радиальной на азимутальную, интенсивность сигнала стремилась к нулю), которые обладают ОУМ, а также распространяются по поверхности образца по винтовым линиям и трансформируются на его конце в свободную волну с тем же значением l , что и у освещающего пучка.

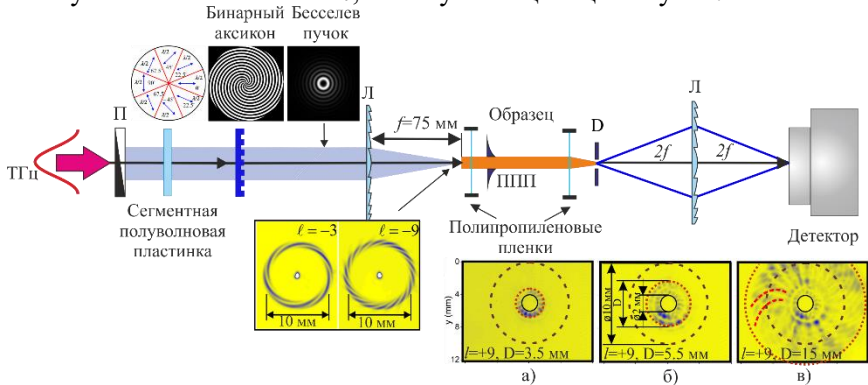


Рисунок 3 – схема экспериментальной установки для формирования вихревых ППП на цилиндрическом образце: П – поляризатор, Л – киноформная линза с $f=75$ мм, D – ирисовая диафрагма. Распределения интенсивности, полученные с кончика образца при диаметре диафрагмы D: (а) 3,5 мм, (б) 5,5 мм и (в) 15 мм

Экспериментально было исследовано вращение вихревых ППП при распространении по поверхности образца. В схеме, изображенной на рисунке 3, перед образцом была установлена щель шириной 1 мм, ограничивающая освещающий пучок. Показано, что в зависимости от знака и величины топологического заряда (в эксперименте использовались пучки с $l = \pm 3$ и $l = \pm 9$) изменяются угол и направление поворота, регистрируемого детектором изображения пучка (рисунок 4). Как можно заметить, при увеличении l в 3 раза, угол поворота также увеличивается втрое.

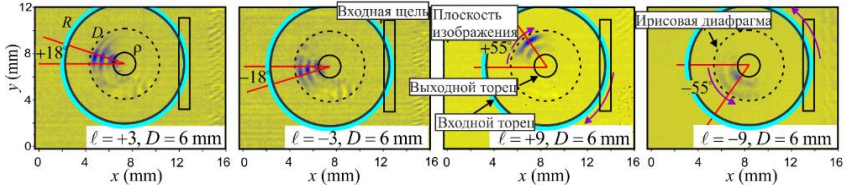


Рисунок 4 – экспериментальные ПРИ, демонстрирующие поворот ППП, возбужденного совершенным вихревым пучком на входном цилиндре через щель шириной 1 мм. Размер изображений: 16,32×12,24 мм

В заключении изложены **основные результаты**, полученные в диссертационной работе:

1. Впервые сформированы и исследованы мощные терагерцовые бesselевы пучки с орбитальным угловым моментом, полученные с использованием фазового аксикона с кусочно-непрерывным профилем. Продемонстрированы свойства самовосстановления пучка, прошедшего через фазовое препятствие.
2. Показано, что бesselев пучок формируется с эффективностью более 20% даже при освещении бинарного аксикона излучением с длиной волны отличной от расчетной, а именно в диапазонах 28 – 42 и 102 – 178 мкм. Зона формирования бesselева пучка при длине волны излучения в три раза меньше расчетной увеличивается в три раза.
3. В терагерцовом диапазоне получены мощные вихревые пучки, диаметр которых не зависит от топологического заряда пучка, так называемые «совершенные» вихревые пучки.
4. Впервые разработан и экспериментально апробирован метод идентификации бesselевой моды в мощном терагерцовом пучке, основанный на анализе Фурье-образа бesselева терагерцового пучка, прошедшего через бинарный дифракционный оптический элемент, установленный в зоне его формирования, с фазовой функцией, совпадающей с функцией формирующего заданную бesselеву моду элемента. Метод был реализован как в случае одномодового, так и

- многомодового пучка, включающего в себя комбинацию бесселевых пучков с топологическими зарядами -1 и -2.
5. Реализованы на практике два метода создания радиальной поляризации в мощном пучке терагерцового диапазона.
 6. Впервые в мире сформированы вихревые поверхностные плазмон-поляритоны терагерцового диапазона на аксиально-симметричной поверхности. В качестве освещающего пучка использовался совершенный вихревой пучок, диаметр которого соответствовал диаметру входного торца образца.
 7. Показано, что плазмон-поляритоны распространяются по поверхности аксиально-симметричного образца вдоль спирали, направление вращения и питч-фактор зависят от топологического заряда освещающего пучка.

Список литературы:

1. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 / R. Fickler, G. Campbell, B. Buchler [и др.]. – Текст: электронный // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Т. 113, № 48. – С. 13642-13647. – URL: <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1616889113>. Дата обращения: 10.11.2023.
2. Wang, K. Dispersion of Surface Plasmon Polaritons on Metal Wires in the Terahertz Frequency Range / K. Wang, D. M. Mittleman. – Текст: электронный // Physical Review Letters. – 2006. – Т. 96, № 15. – С. 157401. – URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.157401>. Дата обращения: 03.11.2022.
3. Plasmon polaritons of metallic nanowires for controlling submicron propagation of light / J.-C. Weeber, A. Dereux, C. Girard [и др.]. – Текст: электронный // Physical Review B. – 1999. – Т. 60, № 12. – С. 9061-9068. – URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.60.9061>. Дата обращения: 19.03.2024.

Список работ по теме диссертации, опубликованных автором в рецензируемых научных изданиях:

4. Control of transverse mode content and polarization structure of

terahertz coherent beams / V. S. Pavelyev, Yu. Yu. Choporova, N. D. Osintseva [и др.]. – Текст: непосредственный // *Computer Optics*. – 2019. – Т. 43, №. 6. – С. 1103–1108. – URL: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108>. Дата публикации: 05.12.2019.

5. Experimental investigation of the self-healing of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum / V. S. Pavelyev, K. N. Tukmakov, A. S. Reshetnikov [и др.]. – Текст: непосредственный // *Computer Optics*. – 2021. – Т. 45, №. 5. – С. 673–677. – URL: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-845>. Дата публикации: 27.05.2021.

6. Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: Generation, propagation, and diffraction / V. V. Gerasimov, O. E. Kameshkov, B. A. Knyazev [и др.]. – Текст: непосредственный // *Journal of Optics*. – 2021. – Т. 23, №. 10. – С. 10LT01. – URL: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac1fc4>. Дата публикации: 01.10.2021.

7. Terahertz Bessel and “perfect” vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief / N. D. Osintseva, V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev [и др.]. – Текст: непосредственный // *Computer Optics*. – 2022. – Т. 46, №. 3. – С. 375–380. URL: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1066>. Дата публикации: 16.01.2022.

8. Terahertz Bessel Beams Formed by Binary and Holographic Axicons / B. A. Knyazev, N. D. Osintseva, M. S. Komlenok [и др.]. – Текст: электронный // *Photonics*. – 2023. – Т. 10, №. 6. – С. 700. – URL: <https://doi.org/10.3390/photonics10060700>. Дата публикации: 20.06.2023.

9. Identification of Hermite–Gaussian and Bessel modes of terahertz beam with diffractive optical elements / N. D. Osintseva, V. V. Gerasimov, Yu. Yu. Choporova [и др.]. // – Текст: непосредственный // *Journal of Optical Technology* – 2024. – Т. 91, №. 4. – С. 215–221. URL: <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000215>. Дата публикации: 07.10.2024 г.

Осинцева Наталья Дмитриевна

**ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ВИХРЕВЫХ ВЕКТОРНЫХ
ПУЧКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОМОЩЬЮ
ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ В ПЛАЗМОНИКЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 16.12.2024 г.

Подписано в печать 18.12.2024 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 усл. печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11