

УТВЕРЖДАЮ:

директор федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт
оптики атмосферы им. В.Е. Зуева»
Сибирского отделения Российской
академии наук



 И.В. Пташник

“ 6 ” ноября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук
на диссертационную работу Савельевой Александры Александровны
«Расчет топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Актуальность работы. Диссертация «Расчет топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков», посвящена расчету топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков, а также поиску новых Фурье-инвариантных вихревых лазерных пучков.

Лазерные оптические вихри, известные в науке с начала 80-х годов прошлого века, до сих пор вызывают интерес ученых из-за их широкого применения в передаче и обработке информации с уплотнением информационных каналов, субволновой микроскопии, квантовой информатики, микроманипулировании. Основными характеристиками параксиальных вихревых лазерных пучков является орбитальный угловой момент и топологический заряд.

Световые поля с фазовой сингулярностью, то есть с точками неопределенности фазы, в которых световое поле имеет изолированный ноль интенсивности, ввели в рассмотрение в 1974 году J. Nye и M. Berry. В известной работе 1992 года L. Allen с соавторами установлено, что пучок Лагерра-Гаусса обладает орбитальным угловым моментом. Топологический заряд вихревого пучка по определению M. Berry равен алгебраической сумме целого числа скачков фазы на 2π при обходе в сечении пучка по окружности бесконечного радиуса. Орбитальный угловой момент вихревого пучка сохраняется при распространении пучка в свободном пространстве. Топологический заряд тоже сохраняется за исключением начальной плоскости, в которой ТЗ может быть задан произвольно.

Вихревые оптические пучки, амплитуды которых являются точными решениями параксиального уравнения Гельмгольца, хорошо известны в оптике.

Входящий № 106-8347
Дата 11 НОЯ 2024
Самарский университет

Это пучки Лагерра-Гаусса, Бесселя-Гаусса, Эрмита-Лагерра-Гаусса, Айнса-Гаусса. Наличие точного аналитического выражения для описания комплексной амплитуды поля вихревых пучков позволяет найти основные характеристики этих пучков до моделирования. Поэтому поиск новых аналитических решений для параксиальных пучков всегда был и остается актуальной задачей.

Для задач зондирования турбулентной атмосферы с помощью вихревых пучков достаточно, чтобы пучок был Фурье-инвариантным, так как рассматривается распространение пучка на большие расстояния. Кроме этого, такие пучки удобны для манипуляции микрочастицами, так как известно распределение интенсивности в фокусе сферической линзы. Поэтому поиск новых вихревых лазерных пучков, обладающих Фурье-инвариантностью, также является актуальной задачей, востребованной рядом практических приложений.

В данной диссертационной работе исследованы новые Фурье-инвариантные вихревые пучки: квадратные пучки Лагерра-Гаусса и пучки Лагерра-Гаусса с автофокусировкой.

Общее содержание работы. Диссертация Савельевой А.А. состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 151 странице, содержит 51 рисунок и список литературы из 247 наименований.

Во введении обоснованы актуальность темы, новизна, теоретическая и практическая значимость и достоверность результатов работы. Проведён обзор научной литературы по теме диссертационного исследования, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

В Главе 1 рассмотрены различные семейства суперпозиций лазерных пучков, и рассчитаны результирующие топологические заряды для каждого из них. Рассчитан топологический заряд четырехпараметрического семейства вихревых пучков, комплексная амплитуда которых описывается геометрической прогрессией гауссовых оптических вихрей. Рассмотрена суперпозиция нескольких одинаковых параллельных однокольцевых пучков Лагерра-Гаусса. Как для начальной плоскости, так и для дальней зоны численно и аналитически был рассчитан ее суммарный топологический заряд. Рассмотрены разные варианты осевой когерентной суперпозиции пучков Лагерра-Гаусса с разными длинами волн. По известной формуле Берри рассчитан топологический заряд осевой суперпозиции двух пучков Лагерра-Гаусса разных «цветов», у каждого из которых своя длина волны и разный топологический заряд.

В Главе 2 исследовались пучки Лагерра-Гаусса и Бесселя-Гаусса и их модификации. Был рассмотрен новый тип вихревых пучков, у которых многочлен Лагерра взят в квадрате, они называются пучками Лагерра-Гаусса в квадрате. Показано теоретически и численно, что данный вихревой пучок является Фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы или в дальней зоне дифракции. Также рассмотрен более общий пучок, являющийся «произведением» двух пучков Лагерра-Гаусса. Такой пучок будет Фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков в «произведении» одинаковое.

Рассмотрен пучок Лагерра-Гаусса, который отличается от обычных модовых пучков Лагерра-Гаусса тем, что не сохраняет своей поперечной структуры при распространении в свободном пространстве, но обладает интересными свойствами. Этот пучок фурье-инвариантен и имеет увеличенную темную область как в начальной плоскости (плоскость перетяжки), так и в дальней зоне. Кроме того, аналитические и численные исследования показали, что пучок является автофокусирующимся. Также была рассмотрена суперпозиция двух пучков Бесселя-Гаусса, исследован суммарный топологический заряд данной суперпозиции.

Глава 3 посвящена зонным пластинкам и спиральным зонным пластинкам, которые могут быть использованы для формирования оптических вихрей. Представлено сравнительное моделирование фокусировки оптических вихрей с их помощью. Проведен сравнительный анализ сформированных пиков интенсивности как в ближней, так и в дальней зоне. Рассмотрена фокусировка цилиндрического векторного лазерного пучка второго порядка с амплитудной линзой с фокусным расстоянием 532 нм и диаметром 15 мкм, изготовленной методами химического травления, электронной литографии и процесса отрыва в алюминиевой пленке толщиной 50 нм. Численно доказано, что такая линза создает в фокальном пятне на оси область, где вектор Умова–Пойнтинга направлен против направления распространения света (область обратного потока энергии), а на оптической оси поперечная составляющая интенсивности отлична от нуля и имеет вид трех пиков вдоль оси абсцисс.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, и сформулированы выводы:

1. Рассмотрена суперпозиция нескольких одинаковых параллельных однокольцевых пучков Лагерра–Гаусса. Как для начальной плоскости, так и для дальней зоны, аналитически показано, и численно подтверждено, что в случае вещественных весовых коэффициентов суперпозиции (то есть все пучки имеют одинаковую фазу, но могут иметь разную амплитуду), общий топологический заряд суперпозиции равен топологическому заряду каждого отдельного пучка. Также показано, что наличие фазовой задержки между пучками позволяет менять общий топологический заряд суперпозиции. Полученный результат может использоваться при передаче информации несколькими вихревыми пучками с помощью модуляции задержки фазы между ними.

2. Рассмотрены осевые суперпозиции Гауссовых оптических вихрей, которые описываются геометрической прогрессией. Для всех вариантов рассмотренных суперпозиций определен топологический заряд. В начальной плоскости топологический заряд может быть целым или полуцелым, а при распространении светового поля в свободном пространстве топологический заряд всегда остается целым. В общем случае геометрическая прогрессия оптических вихрей имеет три целочисленных параметра и один действительный параметр. От величины этих четырех параметров зависит топологический заряд всей

суперпозиции оптических вихрей. При распространении в пространстве суперпозиция оптических вихрей, описываемая геометрической прогрессией, не сохраняет своей структуры интенсивности, но может иметь число лепестков интенсивности, равное одному из параметров семейства. Если действительный параметр геометрической прогрессии оптических вихрей равен единице, то все угловые гармоники в суперпозиции имеют одинаковый вес. В этом случае топологический заряд суперпозиции равен номеру средней угловой гармоники в прогрессии, то есть, если первая угловая гармоника в прогрессии имеет топологический заряд k , а последняя – n , то топологический заряд всей суперпозиции в начальной плоскости будет равен $(n + k)/2$, а при распространении топологический заряд будет равен n .

3. Показано, что вихревой пучок Лагерра-Гаусса «в квадрате» является Фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы. В зоне дифракции Френеля такой пучок преобразуется в суперпозиции обычных пучков Лагерра-Гаусса, число которых равно числу колец у пучка Лагерра-Гаусса «в квадрате». Если кольцо всего одно, то пучок является структурно-стабильным. Также рассмотрен более общий пучок, являющийся «произведением» двух пучков Лагерра-Гаусса. Такой пучок будет Фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков в «произведении» одинаковое. Рассмотренные пучки дополняют хорошо известный базис пучков Лагерра-Гаусса, которые интенсивно изучаются в связи с их устойчивостью при распространении в турбулентности.

4. Рассмотрен новый пучок Лагерра-Гаусса, который отличается от обычных модовых пучков, сохраняющих с точностью до масштаба структуру распределения интенсивности. Этот пучок не сохраняет свою структуру при распространении в свободном пространстве, но обладает некоторыми интересными свойствами. Этот пучок Фурье-инвариантный, имеет в начальной плоскости (в плоскости перетяжки) и в дальней зоне дифракции увеличенную темную область. То есть при сохранении топологического заряда пучка, меняя радиальный индекс многочлена Лагерра-Гаусса, можно увеличивать эффективный диаметр центрального темного пятна интенсивности, или уменьшать. Кроме того, данный пучок обладает свойством автофокусировки, то есть на расстоянии Рэлея от перетяжки распределение интенсивности имеет вид светового кольца (при любом значении радиального индекса) с минимальным диаметром и максимальной интенсивностью на кольце. Данный пучок можно применять для манипулирования микрочастицами без использования дополнительной сферической линзы для его фокусировки.

Апробация результатов. Представленные результаты прошли апробацию на 17-ти российских и международных конференциях и симпозиумах, достаточно полно отражены в рецензируемых работах. Всего по теме диссертации автором опубликовано 11 статей в журналах, входящих в список ВАК и международные базы данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Материалы диссертации отражают личный вклад автора в решение проблем сингулярной оптики, который заключается в

непосредственном участии в постановке задач, разработке методов исследования, создании алгоритмов численного моделирования, проведении исследований на основе численных экспериментов и интерпретации полученных результатов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Теоретическая значимость работы соискателя состоит в расчете топологических зарядов суперпозиций оптических вихрей. Топологический заряд отдельных вихревых оптических пучков Лагерра-Гаусса, Бесселя-Гаусса и других известен, и равен целому числу n в вихревой фазе $n\varphi$, где φ – полярный угол в сечении пучка, комплексной амплитуды пучка. Определение топологического заряда суперпозиции оптических вихрей является проблемой, решать которую следует для каждой конкретной суперпозиции.

Кроме этого в данной диссертационной работе найден топологический заряд суперпозиции оптических вихрей в виде геометрической прогрессии, и топологический заряд суперпозиции одинаковых, смещенных с оптической оси, пучков Лагерра-Гаусса. Найдено несколько новых вихревых лазерных пучков, которые являются точным решением параксиального уравнения Гельмгольца и, которые обладают свойством Фурье-инвариантности. Число точных решений уравнения распространения в оптике ограничено, и нахождение новых таких решений является определенным шагом в развитии оптики лазерных пучков.

Практическая значимость работы состоит в том, что для зондирования турбулентной атмосферы не требуется, чтобы пучок был структурно-инвариантным, а достаточно, чтобы он был Фурье-инвариантным, так как зондирование происходит на больших расстояниях и пучок при этом находится в дальней зоне дифракции. Полученные в работе новые вихревые Фурье-инвариантные лазерные пучки могут быть также использованы для зондирования турбулентной атмосферы, для беспроводной передачи информации и для манипулирования микрочастицами.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

1. Впервые рассчитан топологический заряд соосной суперпозиции скалярных гауссовых оптических вихрей, которая представляет собой геометрическую конечную или бесконечную прогрессию. Показано, что если в начальной плоскости у такой суперпозиции топологический заряд полуцелый, то при распространении в свободном пространстве он становится целым.

2. Показано, что топологический заряд суперпозиции нескольких одинаковых параллельных однокольцевых пучков Лагерра-Гаусса с разными амплитудами и одинаковой начальной фазой равен топологическому заряду каждого отдельного пучка.

3. Впервые показано, что вихревой пучок Лагерра-Гаусса «в квадрате» является Фурье-инвариантным, и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы. В зоне дифракции Френеля такой пучок преобразуется в суперпозиции обычных пучков ЛГ, число которых равно числу колец у пучка ЛГ «в квадрате».

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных

результатов доказываются корректными математическими преобразованиями и совпадением результатов расчета, полученных с помощью аналитических выражений, с результатами расчета, полученных с помощью интегрального преобразования Френеля.

Обоснование научных положений обеспечивается их соответствием актуальным представлениям о лазерных оптических вихрях и создании нескольких новых вихревых лазерных пучков, которые являются точным решением параксиального уравнения Гельмгольца и обладают свойством Фурье-инвариантности, с целью их широкого применения в передаче и обработке информации с уплотнением информационных каналов, субволновой микроскопии, квантовой информатике, а также микроманипулировании.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Полученные в диссертации научные результаты, касающиеся расчета топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков, а также поиску новых Фурье-инвариантных вихревых лазерных пучков, рекомендуется использовать в организациях, проводящих исследования и разработку оптических систем: МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Национальном исследовательском университете ИТМО, Обществе с ограниченной ответственностью «Системы фотоники», Физическом институте им. Н.П. Лебедева РАН, Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева, Национальном исследовательском центре Курчатовский Институт.

Рекомендуется использование результатов диссертации в учебном процессе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», а также их внедрение в учебный процесс других вузов, осуществляющих подготовку специалистов в области оптики.

Диссертационная работа не свободна от **недостатков**. К ним следует отнести следующие:

1. В работе значимое место уделено исследованию двух интересных вопросов, таких как суперпозиция пучков Лагерра-Гаусса разных «цветов» (почти половина первой главы) и формирование зонных и спиральных зонных пластинок (вся третья глава). Однако результаты по данным направлениям автор не включила ни в раздел научной новизны, ни в разделы теоретической и практической значимости, а также заключение, характеризующее основные результаты диссертации. В связи с этим создается впечатление некоторой несбалансированности в представлении результатов.

2. В работе отмечается, что «для изменения топологического заряда требуются более сильные искажения светового поля и, следовательно, топологический заряд – более устойчивая величина, которую можно использовать для идентификации сигналов в оптической передаче информации». Однако в работе не обсуждаются способы регистрации топологического заряда, что

безусловно является более сложной задачей, чем регистрация углового орбитального момента поля, с которым производится сравнение устойчивости.

3. При анализе результатов численного моделирования не обсуждаются вопросы границ применимости и источников погрешности используемых численных схем. Так, например, в работе говорится, что «Численный расчет ТЗ по формуле М.В. Берри (1.36) дает следующие значения: 7,48 ($z = 0$), -1,37 ($z = z_0/200$), 12,84 ($z = z_0/50$), 14,64 ($z = z_0/20$), 14,64 ($z = z_0/10$), 14,98 ($z = z_0/2$), 14,94 ($z = z_0$), 14,77 ($z = 2z_0$). Таким образом, полуцелое значение ТЗ $m\pi/2$ ($TЗ = 7,5$) в начальной плоскости приобретает целочисленное значение $m\pi$ ($TЗ = 15$) при распространении в пространстве». Не очевидно, что последовательность чисел 14,64, 14,64, 14,98, 14,94, 14,77 сходится к целому числу. В данном случае необходимо объяснить в связи с чем сделан такой довольно однозначный вывод.

4. Кроме этого в работе встречаются некоторые небрежности в оформлении. Так, например, в конце предложения «... пучок Фурье-инвариантный, имеет в начальной плоскости (в плоскости перетяжки) и в дальней зоне дифракции увеличенную область темного» видимо пропущено слово. На странице 41 в разделе 1.3 появляется текст «Вихревые пучки или оптические вихри известны в оптике с 80х годов, но многие фундаментальные теоретические вопросы, связанные с этими пучками, до сих пор не разрешены. И некоторые из этих нерешенных вопросов связаны с такой важной характеристикой оптических вихрей, как топологический заряд (ТЗ)», что в некотором смысле уже было сказано во введении работы.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной диссертационной работы, которая является завершенным исследованием, содержащим решение научной задачи расчета топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков, а также поиска новых Фурье-инвариантных вихревых лазерных пучков. Все основные результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям, соответствие темы диссертации и специальности 1.3.6. - Оптика не вызывает сомнений. Автореферат диссертации правильно отражает её содержание, и полностью ему соответствует.

Таким образом, диссертационная работа Савельевой А.А. «Расчет топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присвоения ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Доклад автора по диссертации заслушан на заседании семинара отделения распространения оптических волн Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) 30.10.2024 г.

Проект отзыва ведущей организации на диссертационную работу обсужден, и одобрен на семинаре отделения распространения оптических волн ИОА СО РАН.

Присутствовало: 32 человека (14 докторов наук, 18 кандидатов наук).
Результаты голосования «за» - 32, «против» - 0, «воздержалось» - 0, протокол № 6
от 30.10.2024.

Отзыв составил:

Заместитель директора по научной работе,

д.ф.-м.н. (1.3.6 – Оптика)



Дудоров Вадим
Витальевич

Подпись Дудорова В.В. заверяю
Ученый секретарь ИОА СО РАН,
к.ф.-м.н.

Кураева Т.Е.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики
атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук
(ИОА СО РАН)

634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1.

Тел: (3822) 492738; Факс: (3822) 492086

Email: contact@iao.ru; <https://www.iao.ru>