

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Савельевой Александры Александровны «Расчет топологического заряда суперпозиции  
вихревых лазерных пучков», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

### **Актуальность**

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. Тема диссертационной работы является актуальной.

Основными характеристиками параксиальных вихревых лазерных пучков является орбитальный угловой момент (ОУМ) и топологический заряд (ТЗ). Топологический заряд вихревого пучка по определению, введенному М. Berry (2004), равен алгебраической сумме целого числа скачков фазы на  $2\pi$  при обходе в сечении пучка по окружности бесконечного радиуса на одной длине волны. Орбитальный угловой момент вихревого пучка сохраняется при распространении пучка в свободном пространстве. Топологический заряд также 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. Это пучки Лагерра-Гаусса (Siegman A.E., 1986), Бесселя-Гаусса (Gori F., 1987), Эрмита-Лагерра-Гаусса (Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г., 2004) и др. Наличие точного аналитического выражения для описания комплексной амплитуды вихревых пучков позволяет найти основные характеристики этих пучков (ОУМ, ТЗ, расходимость пучка, его мощность и т.д.) до моделирования. Поэтому поиск новых аналитических точных решений для параксиальных пучков всегда представлял интерес и сохраняет свою актуальность. Однако некоторые из упомянутых пучков не являются структурно-устойчивыми и даже не являются фурье-инвариантными (например, пучки Бесселя-Гаусса). 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 оптических манипуляций микрочастицами. В связи с этим, поиск новых вихревых лазерных пучков, обладающих фурье-инвариантностью, является актуальной задачей оптики.

Входящий №	206-8647
Дата	19 НОЯ 2024
Самарский университет	

## Общее содержание работы

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

В первой главе рассмотрены различные семейства суперпозиций лазерных пучков и рассчитаны результирующие топологические заряды для каждого из них. Рассчитан топологический заряд четырех-параметрического семейства вихревых пучков, комплексная амплитуда которых описывается геометрической прогрессией гауссовых оптических вихрей (ОВ). 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 ТЗ.

Во второй главе исследовались пучки Лагерра-Гаусса (ЛГ) и Бесселя-Гаусса и их модификации. Был рассмотрен новый тип вихревых пучков, у которых многочлен Лагерра взят в квадрате, – пучки Лагерра-Гаусса в квадрате (ЛГ)<sup>2</sup>. Теоретически и численно показано, что вихревой пучок ЛГ «в квадрате» является фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы и в дальней зоне дифракции. Также рассмотрен более общий пучок, являющийся «произведением» двух пучков ЛГ. Такой пучок будет фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков ЛГ в «произведении» одинаковое. Рассмотрен пучок ЛГ, который отличается от семейства стандартных пучков ЛГ. Этот пучок 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 дифракции. Кроме того, аналитические и численные исследования показали, что пучок является автофокусирующимся. Так же была рассмотрена суперпозиция двух пучков Бесселя-Гаусса, исследован суммарный топологический заряд данной суперпозиции.

Третья глава посвящена зонным пластинкам (ЗП) и спиральным зонным пластинкам (СЗП) для формирования оптических вихрей. Представлено сравнительное моделирование фокусировки оптических вихрей с помощью ЗП и СЗП. Проведен сравнительный анализ сформированных пиков интенсивности как в ближней, так и в

дальней зоне дифракции. Рассмотрена фокусировка цилиндрического векторного лазерного пучка второго порядка амплитудной линзой с фокусным расстоянием 532 нм и диаметром 15 мкм. С помощью численного моделирования показано, что линза создает в фокальном пятне на оптической оси область, где вектор Умова–Пойнтинга направлен в направлении противоположном направлению распространения света (область обратного потока энергии), а на оптической оси поперечная составляющая интенсивности отлична от нуля и содержит три максимума вдоль оси абсцисс.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

В диссертационной работе автором получены следующие новые результаты:

1. Рассчитан топологический заряд соосной суперпозиции скалярных гауссовых оптических вихрей, которая представляет собой геометрическую конечную или бесконечную прогрессию. Получены простые аналитические выражения для топологического заряда суперпозиций оптических вихрей в зависимости от их параметров. 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 (ЛГ) с разными амплитудами и одинаковой начальной фазой равен топологическому заряду каждого отдельного пучка. Показано, что наличие фазовой задержки между пучками ЛГ в суперпозиции позволяет увеличивать или уменьшать топологический заряд всей суперпозиции.

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 ЛГ, число которых равно числу колец у пучка ЛГ «в квадрате». Рассмотрен также более общий пучок – двойной пучок Лагерра–Гаусса, являющийся «произведением» двух пучков ЛГ. Такой пучок будет фурье-инвариантным, если число колец у каждого из пучков ЛГ в «произведении» одинаковое.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы соискателя состоит в расчете топологических зарядов суперпозиций оптических вихрей. Таким образом, если топологический заряд отдельных вихревых оптических пучков Лагерра–Гаусса, Бесселя–Гаусса и других известен и равен целому числу  $n$  в вихревой фазе  $n\varphi$ , где  $\varphi$  – полярный угол в сечении пучка, комплексной амплитуды пучка, то определение топологического заряда суперпозиции оптических вихрей является проблемой, решать которую следует для каждой конкретной суперпозиции. В данной

диссертационной работе решены две задачи. Найден топологический заряд суперпозиции оптических вихрей в виде геометрической прогрессии и найден топологический заряд суперпозиции одинаковых, смещенных с оптической оси, пучков Лагерра-Гаусса. Также найдено несколько новых вихревых лазерных пучков, которые являются точным решением параксиального уравнения Гельмгольца и которые обладают свойством фурье-инвариантности. Число решений уравнения распространения ограничено, и нахождение новых 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 расстояниях, соответствующих дальней зоне дифракции. Поэтому найденные в работе новые вихревые фурье-инвариантные лазерные пучки могут быть также использованы для зондирования атмосферы, беспроводной передачи информации, оптического манипулирования микрочастицами.

#### **Степень обоснованности и достоверности положений, выводов и заключений.**

Достоверность полученных результатов доказывается корректными математическими преобразованиями и совпадением результатов расчета с помощью полученных аналитических выражений с результатами расчета с помощью интегрального преобразования Френеля. Полученные в работе результаты относятся к скалярным параксиальным лазерным пучкам, которые описываются комплексными амплитудами и являются точными решениями параксиального уравнения Гельмгольца.

#### **Замечания:**

- 1) Автор использует термин «угловая гармоника», который не является общепринятым. Во избежание двусмысленности и возможных ассоциаций, например, с пространственными гармониками (пространственным/угловым спектром) следовало бы ввести определение термина «угловая гармоника».
- 2) В тексте многократно повторяется формула Берри для расчёта величины топологического заряда, что является излишним.
- 3) В работе говорится, что топологический заряд оптических вихрей может принимать целочисленные значения и в подтверждение этого приводятся значения, рассчитанные по формуле Берри (1.6), которые отличаются от целочисленных (Рис. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4), причем в ряде случаев существенно. Однако в тексте не обсуждается причина, приводящая к указанным различиям.
- 4) Величины топологических зарядов анализируемых геометрических прогрессий оптических вихрей приводятся для заданных сечений вдоль оси распространения.

