

## 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:**

Лазерные оптические вихри 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 (ОУМ) и топологический заряд (ТЗ). 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, из-за широкого применения оптических вихрей на практике.

### **Общее содержание работы**

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

В Главе 1 были рассмотрены различные семейства суперпозиций лазерных пучков и рассчитаны результирующие топологические заряды для каждого из них. Рассчитан топологический заряд (ТЗ) четырехпараметрического 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 посчитан 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.

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 (ЛГ)<sup>2</sup>. Показано теоретически и численно, что вихревой пучок ЛГ «в квадрате» 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 ЛГ. Такой пучок будет Фурье-инвариантным, если число колец у двух пучков ЛГ в «произведении» одинаковое. Рассмотрен пучок ЛГ, который отличается от обычных модовых 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. Кроме того, аналитические и численные исследования показали, что пучок является авто-фокусирующимся. Так же была рассмотрена суперпозиция двух пучков Бесселя-Гаусса, исследован суммарный топологический заряд данной суперпозиции.

Глава 3 посвящена зонным пластинкам (ЗП) и спиральным зонным пластинкам (СЗП), которые могут быть использованы 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. 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 три боковых лепестка.

**Научная новизна** работы заключается в аналитическом и численном расчете топологического заряда суперпозиции скалярных гауссовых оптических вихрей, которые представляют собой геометрическую прогрессию, и суперпозиции нескольких одинаковых параллельных однокольцевых пучков Лагерра-Гаусса (ЛГ). Кроме того, работе был рассмотрен новый тип пучков, разработанный на базе мод Лагерра-Гаусса, пучок Лагерра-Гаусса в квадрате (ЛГ)<sup>2</sup>. Было доказано, что пучок является Фурье-инвариантным и сохраняет свою структуру в фокусе сферической линзы.

**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 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. Поэтому найденные в работе новые вихревые Фурье-инвариантные лазерные пучки могут быть также использованы для зондирования турбулентной атмосферы, для беспроводной передачи информации и для 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:**

В диссертации имеются недостатки:

- 1) Для расчета ТЗ используется формула (1) в Автореферате. Она предполагает, что интегрирование проводится по всей плоскости наблюдения. Но так может быть только, если при распространении пучка вихри не приходят и не уходят на бесконечность. Поэтому такой случай надо было исключить из рассмотрения.
- 2) Надо пояснить, каким образом на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.5 (стр. 28), модулировали при помощи СЛМ модулятора (Holoeye LC

2012) фазу от 0 до  $2\pi$ , на длине волны 532 нм? Согласно сайту производителя СЛМ модулятора рабочая длина волны для данной модели является 450 нм, на длине волны 532 нм до  $1,8\pi$ . А также, для чего использовали поляризаторы P1 и P2?

3) На стр. 80, «мы находим ТЗ заслуживающим внимания, так как, в отличие от ОУМ, искажения луча приводят к ступенчатому изменению ТЗ, т.е. ТЗ может быть более стабильной величиной, например, при распространении луча в турбулентной среде.» Стабильной относительно чего? И какой турбулентности?

4) Замечания по оформлению:

-на 79 странице, опечатка в тексте: Бесселея-Гаусса;

-на 12 странице ввели сокращение понятию орбитального-углового момента (ОУМ), хотя первое упоминание в данной главе было на странице 11;

-на странице 13, повторно вводят сокращение топологического заряда (ТЗ), хотя оно было введено еще на странице 10, данной главы;

-на странице 32, повторно вводят сокращение топологического заряда (ТЗ), хотя оно было введено в начале главы на странице 31;

-на странице 13, используется англоязычное сокращение ОАМ и ТС, вместо введенных ОУМ и ТЗ;

-на странице 61, в начале новой главы было введено сокращение пучка Лагерра-Гаусса (ЛГ), и оно же вводится на странице 62 и 63;

-на рисунке 1.4, используется в формуле сокращение ТЗ, хотя использовалось англоязычное сокращение ТС;

-на странице 27, используется источник [40\*], странице 71-[106\*], странице 79-[123\*], [124\*], странице 89-[52\*], странице 100-[156\*], [157\*], странице 120-[246\*], [247\*], странице 123-[40\*], [106\*], [107\*], [108\*], [123\*], [124\*]-которых нет в списке литературы.

#### **Общая оценка работы:**

Сделанные замечания не снижают научно-практическую ценность представленных результатов. Диссертация Савельевой А.А. «Расчет топологического заряда суперпозиции вихревых лазерных пучков» является завершенным научным исследованием, результаты опубликованы в 11 работах в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, внесенных в Перечень журналов и изданий, рекомендованный ВАК России. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. 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. Диссертационная работа прошла

необходимую апробацию её результаты были представлены на 14 международных и 3 всероссийских научно-технических конференциях.

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.

Заведующий кафедрой общей физики  
Физико-технического института  
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,  
(295007, Республика Крым, г. Симферополь,  
просп. Академика Вернадского, д. 4.,  
+7 (3652) 54-50-36, volyar@cfuv.ru),  
доктор физико-математических наук  
(01.04.05 – Оптика), профессор  
07.11.2024



Воляр Александр Владимирович

