

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Зайцева Владислава Дмитриевича «АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ
РАСЧЕТ ПОТОКА ЭНЕРГИИ И СПИНОВОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА В
ОСТРОМ ФОКУСЕ ВЕКТОРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ», представленную
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа Зайцева В.Д. посвящена аналитическому и численному теоретическому исследованию характеристик светового поля в остром фокусе для векторных лазерных пучков. Ввиду разнообразия оптических эффектов, происходящих при острой фокусировке лазерных пучков излучения, в настоящее время отмечен рост интереса исследователей к этой проблеме. При этом, несмотря на большое количество публикаций, данная тематика остается **актуальной**, особенно в связи с изучением векторных пучков света и с расчетом потока энергии и спинового углового момента. Актуальным также является поиск новых лазерных пучков с другими состояниями поляризации, у которых в начальной плоскости поляризация неоднородная линейная, а в фокусе имеет место спиновый эффект Холла.

Предметом исследования в диссертации служит использование новых подходов для определения оптических закономерностей светового поля вблизи острого фокуса для различных начальных вихревых векторных лазерных пучков, в том числе получение аналитических выражений для основных характеристик светового поля в фокусе на основе теории Ричардса-Вольфа.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (132 наименования). Работа изложена на 137 страницах и содержит 65 рисунков.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, приведён обзор работ по тематике исследования, сформулированы цель и задачи, изложены основные результаты и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 с помощью формул Ричардса-Вольфа производилось сравнение распределения интенсивности и продольной компоненты вектора Умова-Пойнтинга (осевого потока энергии) в плоскости острого фокуса. Для этого были записаны аналитические выражения проекций вектора напряженности электрического поля, интенсивности и проекции на оптическую ось вектора Умова-Пойнтинга в фокусе при острой фокусировке света апланатической системой с линейной, круговой, радиальной и азимутальной поляризацией при прочих равных условиях.

С помощью формул Ричардса-Вольфа моделировалась фокусировка света различной поляризации апланатическим объективом с числовой апертурой $NA = 0,95$. Начальный волновой фронт во всех случаях считался плоским или вихревым. В результате было показано, что при фокусировке света сечение интенсивности в фокусе зависит от состояния его поляризации.

Так же с помощью формализма Ричардса-Вольфа была рассмотрена фокусировка света с круговой поляризацией плоскими дифракционными линзами. Было показано, что при увеличении числовой апертуры линзы размер фокусного пятна сначала уменьшается,

а потом начинает расти. Обнаружено, что минимальное фокусное пятно наблюдается при числовой апертуре $NA = 0,96$.

Глава 2 посвящена расчёту индекса поляризационной сингулярности (ИПС) для любых векторных световых полей, что аналогично расчету топологического заряда скалярных оптических вихрей по формуле Берри. Были рассчитаны ИПС для векторных полей с цилиндрической поляризацией (радиальной и азимутальной) высших порядков, с гибридной радиально-циркулярной (и азимутально-циркулярной) поляризацией произвольных порядков, для полей с несколькими точками и с несколькими линиями поляризационной сингулярности, для пучков Пуанкаре, а также для полей с поляризацией, изменяющейся от центра к периферии. В частности, было показано, что индекс Пуанкаре-Хопфа равен топологическому заряду пучка, а само поле имеет неоднородную линейную поляризацию. Это было получено путем подсчёта областей с определённым направлением поляризации.

В главе 3 с помощью интегралов Дебая и численного моделирования показано, что вблизи острого фокуса (до фокуса и за фокусом) генерируются локальные субволновые области с эллиптической и круговой поляризацией разного знака (разного спина). Поскольку при нарушении симметрии вблизи фокуса светового поля появляются области с левой и правой круговой поляризацией (области с разным «спином»), можно заключить, что вблизи фокуса (до и после него) возникает спиновый эффект Холла, хотя в самой фокальной плоскости этот эффект исчезает.

Говоря о научной новизне, следует отметить, все результаты работы являются новыми, среди наиболее значимых можно отметить следующие:

1. Показано, что вблизи фокальной плоскости начального цилиндрического векторного пучка произвольного целого порядка (до и после фокуса) генерируется четное число локальных субволновых областей, где вектор поляризации в каждой точке вращается. Кроме того, в соседних областях векторы поляризации вращаются в разные стороны, так что продольная составляющая вектора спинового углового момента в этих соседних областях имеет противоположный знак. Кроме того, после прохождения пучком фокуса, направление вращения вектора поляризации в каждой точке поперечного сечения пучка меняется на противоположное. Такое пространственное разделение левого и правого вращения векторов поляризации демонстрирует наличие оптического спинового эффекта Холла.

2. С помощью параметров Стокса найден индекс поляризационной сингулярности пучков Пуанкаре. Он оказался равен топологическому заряду оптических вихрей, участвующих в формировании пучка Пуанкаре. С помощью формализма Ричардса-Вольфа аналитически найдены аналитические выражения для проекций вектора напряженности электрического поля вблизи острого фокуса данных пучков. Получено выражение для распределения интенсивности в плоскости фокуса, и найдены параметры, при которых фокусное пятно имеет круглую форму. Число локальных максимумов интенсивности в плоскости фокуса оказывается пропорциональным величине индекса поляризационной сингулярности пучка.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертационной работе разработаны несколько новых подходов к изучению оптических закономерностей в остром фокусе лазерного излучения:

- 1) определение диаметра фокусного пятна по потоку энергии, а не по интенсивности;
- 2) определение индекса поляризационной сингулярности векторных пучков аналогично определению топологического заряда скалярных оптических вихрей;
- 3) определение характеристик спинового эффекта Холла в области фокуса цилиндрических векторных оптических пучков высокого порядка.

Значение полученных аналитических результатов состоит также в том, что они применимы для любой длины волны, любой числовой апертуры оптической системы и для любого радиально-симметричного начального распределения амплитуды пучка.

Практическая ценность, полученных результатов, состоит в том, что

- 1) определение минимального фокусного пятна позволяет достигать предельного разрешения в оптической микроскопии,
- 2) от величины индекса поляризационной сингулярности векторных пучков зависит число боковых лепестков в фокусе, которые определяют структуру оптических ловушек для захвата и манипулирования микрочастицами,
- 3) спиновый эффект Холла в фокусе можно использовать в микромеханике в качестве оптического двигателя, когда в фокусе в двух соседних областях со спином разного знака вращаются две взаимодействующих микрочастицы в виде шестеренок.

Параксиальные цилиндрические векторные пучки, у которых имеет место спиновый эффект Холла, можно использовать для передачи информации в беспроводных системах связи.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием теоретических выводов с результатами численного моделирования. А также совпадением результатов моделирования, полученных разными способами: с помощью полученных аналитических выражений и с помощью прямого расчета интегралов Дебая.

Вместе с тем стоит отметить некоторые замечания по работе, в частности:

1. В диссертации рассказывается про поляризационные сингулярности различных векторных полей, однако неясным остается вопрос, может ли существовать фазовая сингулярность в таких полях. В целом глава 2, стр. 40-64
2. Не на всех рисунках изображающих различные векторные поля, указано направление локального вектора поляризации. Рисунок 2.3, 2.4, 2.8.
3. Для некоторых векторных полей, например, азимутально-циркулярных и радиально-циркулярных использована терминология, вводящая в заблуждение своим названием. Стр. 47 рисунок 2.3
4. В работе присутствуют незначительные опечатки на шкалах некоторых рисунков. Рисунок 3.7 г, рисунок 3.17 б, в.

Сделанные замечания не снижают научно-практической ценности выполненных

исследований.

Основные результаты диссертации представлены в 11 статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования SCOPUS/WOS, в том числе в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Автореферат диссертации с достаточной полнотой отражает ее содержание.

Диссертация Зайцева В.Д. является завершенным научным исследованием и полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9-14 "Положением о присуждении ученых степеней" от 24.09.2013 N 842 в редакции от 26.09.2022), а ее автор заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Заведующий лабораторией квантовых процессов и измерений «Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Доцент, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) - «Оптика»

УДОСТОВЕРЯЮ
ЕНЕДЖЕР ОПС
ГЕОНИДОВА А.А.

Н.В. Петров



Сведения об официальном оппоненте: Петров Николай Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией цифровой и изобразительной голографии Университета ИТМО,

адрес: 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, кронверкский пр. 49, тел: +7 (905) 204-91-58,
E-mail: n.petrov@niuitmo.ru;

докторская диссертация защищена по специальности 1.3.6 – Оптика.

Подпись Петрова Н. В. заверяю