

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.

Отмечено также, что **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,

Входящий № 206-8425
Дата 20 НОЯ 2024
Самарский университет

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 расчёту 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, хотелось бы 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. Считаю, что по правилам русского языка заглавие диссертации следует скорректировать и писать: **АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТЫ...**
2. Остается невыясненным из выводов диссертации насколько проделанная работа позволяет судить о структурных искажениях векторных пучков при их распространении не в свободном пространстве, а в случайно-неоднородной среде, например, атмосферной турбулентности.
3. При рассмотрении эволюции вихревых пучков автор использует в аналитических расчетах разложения по полиномам, которые имеют безграничное представление. Насколько могут измениться основные результаты при использовании усеченных пучков, что всегда имеет место и можно ли на практике использовать эти же разложения?

4. В некоторых местах в тексте диссертации термин спин используется как для обозначения спинового углового момента, так и спинового потока энергии. Возникает некая неоднозначность.

5. В качестве недостатка диссертации можно отметить отсутствие в нем (для проведения сравнения) каких-либо экспериментальных результатов, пускай даже других авторов. Моделируемые в диссертации оптические сценарии довольно просты и, наверное, в литературе есть информация о подобных экспериментах.

6. Обнаруженные особенности формируемых векторных пучков хотелось бы соотнести с имеющимися место оценками величин составляющих аберраций, обычно имеющимися место, в типичных высококачественных оптических системах.

7. Отдельное замечания я хотел бы высказать по тексту автореферата. В обзорной его части при описании ранее выполненных исследований дается указание на авторов и даты публикации, но нигде не сказано, что эти указания соответствуют списку цитируемых работ из диссертации.

Сделанные замечания в целом 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 завершённым 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.

Главный научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук



В. П. Лукин

Сведения об официальном оппоненте: Лукин Владимир Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, адрес: 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1; тел: +7 (960) 977-76-25, E-mail: vlukin@iao.ru;

докторская диссертация защищена по специальности 01.04.05 – Оптика.

Подпись Лукина В. П. заверяю

Ученый секретарь ИОА СО РАН, к.ф.-м.н.

11.11.2024



Т.Е. Кураева