

УТВЕРЖДАЮ

директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук



Н.Н. Колачевский

«27» февраля 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
на диссертационную работу Алгубили Аббар Мохаммед Кхудхур  
«Формирование неоднородно поляризованных лазерных пучков  
интерференционным методом и методами прямого преобразования  
поляризационного состояния пучка»,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

### 1. Актуальность работы

Диссертационная работа Алгубили А. М. К. посвящена разработке способов формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков с помощью интерференционного метода, секторных пластинок и многоконических аксиконов.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена высоким интересом к векторным световым полям. Данные световые пучки обладают пространственно неоднородным распределением поляризации. Такие структурированные световые поля обладают уникальными свойствами и находят применение в микроскопии сверхвысокого разрешения, используются для повышения точности интерференционных измерений, расширения возможностей передачи информации, для манипуляции микрообъектами, лазерной обработки материалов. Следует отметить, что количество публикаций по этой тематике в последние годы держится на стабильно высоком уровне. Основное направление формирования неоднородно поляризованного излучения сосредоточено вокруг аксиально-симметричного распределения поляризации в поперечном сечении пучка.

Наиболее удобны в использовании формирователи поляризации с аксиальной симметрией, осуществляющие непосредственное преобразование поляризационного состояния пучка, такие, как оптические системы, включающие аксиконы и многосекторные пластины. Преимуществом аксиконов является высокая лучевая стойкость. Однако для аксиконов, как дифракционных, так и рефракционных, актуальным является преодоление хроматизма, а также объединение отдельных оптических элементов, составляющих оптическую систему, в единый жесткий блок для облегчения юстировки. При использовании многосекторных поляризационных пластин очевидна потребность в компенсации вихревых составляющих, появляющихся из-за круговой поляризации исходного пучка. Кроме того, актуальными являются системы, обеспечивающие возможность управления распределением поляризации в поперечном сечении неоднородно поляризованного пучка. Такую возможность дают интерференционные методы за счет изменения образов исходных мод и межмодовых фазовых сдвигов при использовании пространственного модулятора света. Задача выбора схемы интерферометра, содержащей минимальное число элементов, согласованной со свойствами модулятора света и дающей максимальную энергетическую эффективность, является актуальной в настоящее время.

Таким образом, разработка, совершенствование и исследование новых методов формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков предоставляет большой как научный, так и практический интерес. Это определяет высокую актуальность диссертационной работы соискателя.

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

В диссертационной работе автором получены следующие новые результаты:

1. Предложена и экспериментально реализована новая оптическая система для генерации поляризационно неоднородного лазерного излучения на основе интерферометра Маха-Цендера с использованием одного пространственного модулятора света и разделением по фронту волны для формирования пучков в интерферометре. Её отличительной особенностью является также схема объединения пучков при помощи светоделительного кубика без дополнительных дифракционных решёток и линз. Предложенная схема интерферометра позволяет легко комбинировать нужные порядки дифракции за счёт настройки. Отметим также, что объединение пучков при помощи светоделительного кубика, в отличие от дифракционной решётки,

даёт два пучка равной мощности с необходимым поляризационным состоянием, причём оба могут быть использованы.

2. Разработаны и реализованы оптические секторные сэндвич-структуры, состоящие из сложенных вместе поляризационной пластины, образованной секторами из дихроичной пленки с различными направлениями поляризационных осей, и фазовой пластины, имеющей фазосдвигающие области с разностью фаз  $\pi$  в виде полуплоскостей или квадрантов. Сэндвич-структуры обеспечивают преобразование пучка с круговой поляризацией в цилиндрические векторные лазерные пучки и позволяют модулировать дополнительную вихревую фазу. Сэндвич-структуры характеризуются простотой изготовления при энергетической эффективности близкой к 50 %.

3. Рассчитаны и исследованы оптические элементы из преломляющего материала, ограниченные коническими поверхностями для формирования азимутально поляризованных пучков с вихревой фазовой зависимостью. Преобразование поляризации в оптических элементах происходит на первой конической поверхности за счёт отражения лучей, падающих под углом Брюстера, а вторая и третья конические поверхности осуществляют коллимацию пучка. Совмещение в одном элементе функций преобразования поляризации и коллимации света позволяет создавать готовые к использованию моноблочные элементы, что даёт возможность разрабатывать более компактные оптические схемы.

### **3. Обоснование и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность результатов проведённого исследования подтверждается согласованием экспериментальных результатов с результатами численного моделирования. Экспериментально показана возможность использования предложенных методов и оптических систем для формирования цилиндрических векторных пучков. Теоретические обоснования построения предлагаемых оптических элементов и способов формирования цилиндрических векторных полей основаны на известных фактах и согласуются с опубликованными теоретическими и экспериментальными данными по теме диссертации и смежным отраслям.

### **4. Теоретическая и практическая значимость работы**

Предложенные в диссертации новые оптические схемы и устройства формирования пучков с радиальной и азимутальной поляризацией могут быть применены для расширения возможностей информационных

оптических систем, систем лазерной обработки материалов и дают возможность разрабатывать более компактные оптические схемы для решения различных практических задач.

## **5. Общая характеристика работы**

Диссертация Алгубили А. М. К. состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет 109 страниц машинописного текста, включает 26 рисунков, 4 таблиц и 213 библиографических ссылок. Целью диссертационной работы является разработка новых способов формирования цилиндрических векторных световых пучков.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы, проведён обзор научной литературы, сформулированы научная новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

В первой главе в рамках интерференционного метода предложена на основе интерферометра Маха–Цендера схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света (ПМС). В работе рассмотрены особенности построения оптической схемы и представлены результаты экспериментальной реализации данного способа.

Во второй главе разработаны и реализованы оптические секторные сэндвич-структуры для формирования цилиндрических векторных пучков (ЦВП), состоящие из сложенных вместе поляризационной пластины, образованной секторами из дихроичной плёнки с различными направлениями поляризационных осей и фазовой пластины. Как известно, при прохождении пучка с круговой поляризацией через секторную поляризационную пластинку в нём появляется дополнительная вихревая фаза. В работе предложено для компенсации этой вихревой фазы при получении ЦВП использовать дополнительную фазовую пластинку, имеющую фазосдвигающие области с разностью фаз  $\pi$  в виде полуплоскостей или в виде квадрантов. Проведено моделирование работы структур, изготовлены лабораторные образцы и проведено экспериментальное исследование предложенных оптических элементов. Показано, что сэндвич-структуры обеспечивают преобразование пучка с круговой поляризацией в такие ЦВП как квазирадиально поляризованный пучок первого порядка и азимутально поляризованный пучок второго

порядка. Данные оптические элементы характеризуются простотой изготовления при энергетической эффективности близкой к 50 %.

В третьей главе сформулированы теоретические основы, приведены результаты по исследованию предложенных оптических элементов, образованных коническими поверхностями, для формирования азимутально поляризованного пучка с вихревой фазовой зависимостью. Проведен теоретический анализ хода лучей через предлагаемые конические элементы для генерации коллимированного азимутально поляризованного пучка, а также исследованы состояния поляризации лучей на выходе предложенного элемента, получено соответствие экспериментальным данным.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

## **6. Рекомендации по применению результатов**

Полученные в диссертации научные результаты, касающиеся методов формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков и результатов расчёта соответствующих оптических элементов, рекомендуется использовать в организациях, проводящих исследования и разработку оптических систем: МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Национальном исследовательском университете ИТМО, Обществе с ограниченной ответственностью «Системы фотоники», Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева.

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.

## **7. Замечания**

Диссертация не лишена некоторых недостатков:

1) В пункте 2.2.1 следовало бы написать, в рамках какого приближения производился расчёт распределений вектора светового поля.

2) В формуле (2.7) указаны численные значения диэлектрической проницаемости, но нет пояснения, почему были выбраны именно такие значения.

3) В пункте 2.2.2 при расчётах рассматривались элементы и области пространства порядка нескольких сотен нанометров и единиц микрометров. В тексте диссертации нужно было пояснить, почему были выбраны такие размерности элементов, и насколько полученные результаты применимы к реальным экспериментальным образцам.

4) В пункте 3.3.3 следовало бы более детально представить описание математической формулировки и геометрии задачи, результаты решения которой представлены в данном пункте.

5) В 1-ом пункте общего заключения к работе, относящемся к результатам, представленным в первой главе диссертации, говорится о более чем двукратном увеличении эффективности формирования пучков, но не приводятся значения полученной энергетической эффективности.

6) Есть небрежности в оформлении рисунков, например, на рис. 3.10, таблицы 3.1 и 3.3 подписи сделаны на английском языке, слишком маленьким шрифтом.

## **8. Оценка диссертации в целом**

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной диссертационной работы, которая является завершённым исследованием, в котором содержится решение научной задачи, имеющей значение для создания новых методов и оптических систем формирования неоднородно поляризованных световых пучков. Все основные результаты диссертационного исследования отражены в публикациях автора, включая 6 научных работ в рецензируемых журналах, внесённых 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 научной 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 двух международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Таким образом, диссертационная работа Алгубили А.М.К. «Формирование неоднородно поляризованных лазерных пучков

интерференционным методом и методами прямого преобразования поляризационного состояния пучка» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании учёного совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (протокол № 4 от 7 февраля 2024 г.)

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник  
лаборатории когерентной оптики,  
кандидат физико-математических наук

 С.А. Самагин

Директор СФ ФИАН,  
Председатель ученого совета СФ ФИАН,  
Доктор физико-математических наук

 В.Н. Азязов