

На правах рукописи

Алгубили Абрар Мохаммед Кхудхур

**Формирование неоднородно поляризованных лазерных пучков
интерференционным методом и методами прямого преобразования
поляризационного состояния пучка**

1.3.6. Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре наноинженерии.

Научный руководитель:

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Грейсух Григорий Исаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», кафедра «Физика и химия», заведующий кафедрой;

Петров Николай Иванович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, лаборатория акустооптики, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится 29 марта 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Algubili_Abrar_Mohammed_Kkhudhur_Formirovanie_neodnorodno_polyarizovannyh.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.01
к.ф.-м.н., доцент

Телегин А. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В последнее время, в связи с бурным развитием высоких вычислительных мощностей и нанотехнологий, большое внимание исследователей привлекают векторные световые поля с пространственно-неоднородными сечениями. Повышение размерности структурированного света за счёт увеличения степеней свободы (Andrew Forbes, 2017) осуществляется, в том числе, и через многообразие поляризационных состояний света. Ожидается, что развитие применений структурированного света расширит возможности и повысит производительность информационных оптических систем. Это развитие требует новых методов формирования лазерного пучка, причём на первый план выходит распределение энергии электрического поля по компонентам, и, как следствие, поляризационные характеристики излучения. Большинство современных лазеров производят поляризационно-однородное излучение, другими словами, поляризационные параметры во всех точках поперечного сечения лазерного пучка одинаковы. Однако с помощью дополнительных внутри- или внерезонаторных устройств возможно формирование множества различных типов векторных поляризационно-неоднородных мод с уникальными свойствами. Сейчас большое внимание уделяется созданию и исследованию свойств цилиндрических векторных пучков (ЦВП), обладающих аксиально симметричным распределением состояния поляризации в поперечном сечении. Интерес к ЦВП основан на возможности их использования в области микроскопии сверхвысокого разрешения, повышения точности интерференционных измерений, передачи информации в свободном пространстве и по волоконно-оптическим линиям связи, манипуляции микрочастицами, лазерной резки и сверления металла.

Существует два основных метода генерации ЦВП: внутрирезонаторный и внерезонаторный. Внутрирезонаторный метод был одним из самых ранних предложенных методов генерации неоднородно поляризованного пучка (Pohl, D., 1972). В резонаторе рубинового лазера была размещена телескопическая система, содержащая двулучепреломляющий кристалл кальцита. Недостатком этого метода генерации являются нелинейные эффекты, возникающие в кристалле при высоких мощностях. В работе (Kozawa, Y., 2005) использовалась коническая призма Брюстера. Особенность конической призмы Брюстера такова, что при аксиальной симметрии такого оптического элемента (аксикона) лучи всегда имеют угол падения, равный углу Брюстера. Недостатком такого метода является дисперсионная зависимость показателя преломления плёнок и самого материала конической призмы (аксикона), что делает невозможным изготовление ахроматических конических призм Брюстера для различных длин волн излучения. В то же время, основным преимуществом как описанного метода, так и вообще всех внутрирезонаторных методов, является возможность получения высоких интенсивностей формируемых пучков.

Внерезонаторные системы, в силу их большей универсальности, получили большее распространение на практике. Однако разработка внерезонаторных формирователей неоднородно поляризованных пучков с повышенной лучевой стойкостью является актуальной задачей и может решаться путём использования поляризующих элементов, применяемых внутри резонаторов, например, рефракционных аксиконов, и для внерезонаторного формирования ЦВП. Основным их недостатком, как и конической призмы Брюстера, является высокий хроматизм, а, кроме того, сложности взаимной юстировки аксиконов с коллимирующими оптическими системами.

Для внерезонаторного формирования ЦВП были предложены многосекторные полуволновые пластинки (Quabis, S., 2005). Пластика позволяет формировать аксиаль-

но симметричный азимутально или радиально поляризованный пучок при освещении плоскополяризованным пучком. Недостатком такого метода является скачкообразное изменение поляризации в пучке, а также сложности высококачественной нарезки секторов. Если не требуется высокая лучевая стойкость, то частично эту проблему решает изготовление секторов из поляризационной плёнки (Man, Z., 2013). Исходный пучок для преобразования таким элементом должен иметь круговую поляризацию. Разумеется, при этом энергетическая эффективность падает как минимум до 50%. Кроме того, для всех элементов, у которых в качестве исходного пучка используется пучок с круговой поляризацией, в выходном пучке характерно наличие вихревой фазы, которая в ряде случаев нежелательна.

Пучки с неоднородно-поляризованной структурой излучения можно получить интерференционными методами (Tidwell, S. C., 1990). Главным преимуществом внрезонаторных интерференционных методов является универсализм. При интерференционном сложении пучков можно получать неоднородно-поляризованные пучки с различными видами распределения поляризации. Обычно для формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков применяют двухлучевые интерферометры типа Маха–Цендера или Саньяка, в которых осуществляется когерентная суперпозиция пары обычных мод. Возможны разные варианты получения исходных мод – как в резонаторе лазера с дальнейшим преобразованием традиционной оптикой (Passilly, N., 2005), так и при помощи стационарных дифракционных оптических элементов (Churin, E. G., 1993). Однако такие варианты генерации пучков всё же сильно ограничивают разнообразие формируемых поляризаций, поскольку в интерферометрах без дополнительной оптики можно варьировать лишь разность хода и взаимное положение мод. Реализовать универсализм интерференционных методов в наибольшей степени удаётся в методах генерации векторных пучков на основе пространственных модуляторов света (ПМС), для которых снимаются ограничения на типы исходных мод. Один из вариантов интерферометра, включающего ПМС, с разделением пучков по волновому фронту (Kalita, R., 2016) был использован для генерации произвольных векторных пучков. После ПМС модовые пучки проходили через два линзовых Фурье-каскада с установленными в Фурье-плоскости четвертьволновыми пластинками и далее объединялись при помощи дифракционной решётки. Использование линзовых Фурье каскадов, а также дифракционной решётки для объединения пучков существенно снижает энергетическую эффективность оптической системы.

Исходя из вышеизложенного, отметим, что основное внимание при формировании 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 жёсткий блок для облегчения юстировки. При использовании многосекторных поляризационных пластин очевидна потребность в компенсации вихревых составляющих, появляющихся из-за круговой поляризации исходного пучка. Помимо перечисленных оптических систем, дающих стационарное поляризационное состояние пучка, актуальными являются системы, обеспечивающие возможность управления распределением поляризации в поперечном сечении неоднородно поляризованного пучка. Такую возможность дают интерференционные методы за счет изменения как

образов исходных мод, так и межмодовых фазовых сдвигов. Разумеется, это становится доступно лишь при использовании ПМС в качестве формирователя исходных мод. Таким образом, использование ПМС открывает широкие возможности для формирования лазерных пучков различной поляризации поэтому задача выбора схемы интерферометра, содержащей минимальное число элементов и дающей максимальную энергетическую эффективность, является актуальной.

Цель диссертационной работы

Разработка методов формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков с помощью:

- интерферометра, включающего жидкокристаллический модулятор света;
- секторных пластинок;
- многоконических аксиконов.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка и экспериментальная реализация оптической системы для получения азимутально поляризованных лазерных пучков с использованием жидкокристаллического модулятора света и интерферометра Маха–Цендера.

2. Разработка, изготовление, и экспериментальное исследование секторных пластинок в виде сэндвич-структур, предназначенных для преобразования падающего на них света с круговой поляризацией в цилиндрические векторные пучки низших и высших порядков.

3. Разработка и исследование многоконического аксикона для преобразования пучка с круговой поляризацией в коллимированный азимутально поляризованный вихревой пучок.

Научная новизна

1. Предложена и экспериментально реализована оптическая система формирования пучков с азимутальной поляризацией на основе интерферометра Маха–Цендера и жидкокристаллического модулятора света. Генерация модовых пучков осуществляется различными участками апертуры жидкокристаллического модулятора. По сравнению с известными оптическими системами с дифракционной решёткой и линзами предложенная оптическая система позволяет не менее чем в два раза повысить энергетическую эффективность и получать два азимутально поляризованных пучка.

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 π в виде полуплоскостей или квадрантов. Сэндвич-структуры обеспечивают преобразование пучка с круговой поляризацией в цилиндрические векторные лазерные пучки: квазирадially поляризованный пучок первого порядка и азимутально поляризованный пучок второго порядка. В отличие от поляризационных пластин без фазовой пластины, предложенные сэндвич-структуры позволяют получать из пучков с круговой поляризацией неоднородно поляризованные пучки без дополнительной вихревой фазы. 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. Поляризационное преобразование за счет отражения лучей обеспечивает ахроматизацию элемента в отличие от известных рефракционных элемен-

тов с падением лучей под углом Брюстера. Совмещение в одном элементе функций преобразования поляризации и коллимации света позволяет создавать готовые к использованию моноблочные элементы и избегать сложных взаимных юстировок аксикона с другими оптическими элементами.

На защиту выносятся:

1. Возможно использование интерферометра Маха–Цендера и жидкокристаллического модулятора света для эффективного формирования азимутально поляризованных пучков.

2. Преобразование пучка с круговой поляризацией в цилиндрические векторные лазерные пучки низких и высоких порядков без дополнительной вихревой фазы может осуществляться секторными сэндвич-структурами, состоящими из сложных вместе дихроичной секторной поляризационной пластины и фазовой пластины, имеющей фазосдвигающие области с разностью фаз π в виде полуплоскостей или квадрантов.

3. Возможно получение коллимированных азимутально поляризованных вихревых световых пучков с использованием моноблочных преломляющих оптических элементов, ограниченных коническими поверхностями.

Практическая значимость:

Предложенные в диссертации методы и оптические схемы формирования пучков с радиальной и азимутальной поляризацией, а также комбинации элементов фокусирующей оптики с разнополяризованными пучками могут быть применены для оптической связи, лазерной обработки материалов, фотолитографии, ускорения электронов и других практических задач.

Методы исследований:

В диссертационной работе используются методы математического моделирования на основе трассировки лучей, а также методом FDTD в программном пакете Comsol. Для оптического эксперимента используются пространственный модулятор света, дифракционные оптические элементы и прецизионное точение многоконического аксикона.

Достоверность полученных результатов:

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием результатов расчетов и моделирования экспериментальным данным.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), 2020, Samara, Russia, Международная научно-техническая конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2022», 2022, Уфа, Russia.

Публикации

По теме данной диссертационной работы было опубликовано 6 работ, входящих в базу Scopus и Web of Science, из которых 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Изложенные в диссертации оригинальные результаты получены соискателем, либо при его непосредственном участии. Соискателем самостоятельно проводились вычислительные и натурные эксперименты, разрабатывались методы и математические модели. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объём диссертации

Диссертация 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В **первой главе**, на основе интерференционного метода формирования неоднородно поляризованных лазерных пучков, предложена интерференционная схема [1, 2] для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света (ПМС). Суть интерференционного метода состоит в сложении пучков двух линейно поляризованных мод Гаусса–Эрмита с определённой разностью фаз. Для формирования модовых пучков в интерферометре используется ПМС и полуволновая пластинка, а объединяются пучки при помощи светоделительного кубика в отличие от схемы с дифракционной решёткой, где требуются дополнительные линзы. Фазовый сдвиг между пучками мод регулируется наклоном пластинки Φ . Отметим, что светоделительный кубик, в отличие от дифракционной решётки, даёт два пучка равной мощности с необходимым поляризационным состоянием, причём оба могут быть использованы. Оптическая схема приведена на рисунке 1.

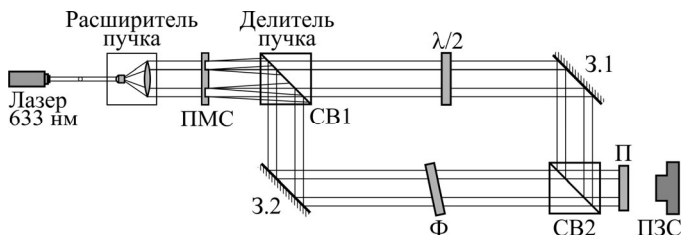


Рисунок 1 – Оптическая система для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света

На рисунке 2 приведено изображение распределения интенсивности на регистрирующей матрице, в начале одного из плеч интерферометра, где не произведено совмещения мод. Причём кадр ограничен таким образом, что в него попадает +1 порядок от одной половины модулятора, нулевой порядок и –1 от другой половины модулятора. Видно, что разные половины модулятора формируют образы разных требуемых мод. Видно, что формируется довольно интенсивный нулевой порядок дифракции из-за присутствия всем ПМС искажений передачи фазы в пределах периода несущей. Но это явление не приводит к искажениям амплитудно-фазового распределения в полезном первом порядке дифракции. Изображения в выходной плоскости интерферометра, полученные при различных положениях анализатора П и без него, приведены на рисунке 3. Хорошо видно, что светлые области кольца перпендикулярны положению оси анализатора, следовательно пучок имеет азимутальную поляризацию.

Энергетическая эффективность оптической системы не менее чем в 2 раза выше по сравнению со схемой с дифракционной решёткой. Поляризационная чистота полученных пучков достигала более 96%.

Во **второй главе** разработаны и реализованы оптические секторные сэндвич-структуры [3, 4] для формирования ЦВП, состоящие из сложенных вместе поляризационной пластины, образованной секторами из дихроичной плёнки с различными направлениями поляризационных осей, и фазовой пластины, имеющей фазосдвигающие области с разностью фаз π в виде полуплоскостей или в виде квадратов. Как извест-

но, при прохождении пучка с круговой поляризацией через секторную поляризационную пластинку из-за спин-орбитального взаимодействия в нём появляется дополнительная вихревая фаза. В работе предложено для компенсации этой вихревой фазы и получения ЦВП как низших, так и высших порядков добавить вплотную к поляризационной пластинке дополнительную фазовую пластинку, имеющую фазосдвигающие области с разностью фаз π в виде полуплоскостей или в виде квадрантов.

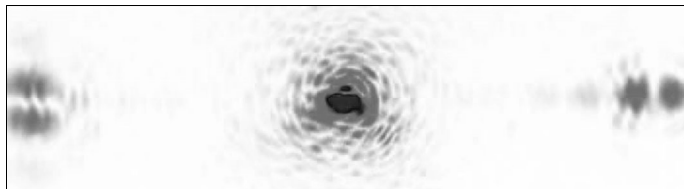


Рисунок 2 – Изображение в выходной плоскости сгенерированного пучка от +1 и -1 порядков (негативное отображение)

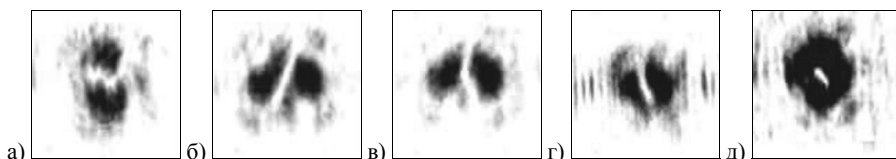


Рисунок 3 – Распределения интенсивности в выходном пучке в зависимости от положения анализатора 0° (а), 45° (б), 90° (в), 135° (г), изображение в отсутствие анализатора (д) (негативное отображение)

Моделирование проведено как в приближении тонкого элемента, так и в векторном виде на основе численного решения уравнений Максвелла, реализованного в программном пакете Comsol. В приближении тонкого элемента для распознавания поляризационных распределений моделировалось использование многоканального фазового вихревого пространственного фильтра, согласованного с угловыми гармониками первых трёх порядков. Вихревой фильтр формирует набор вихревых пучков с порядками от +1 до +3 в дифракционных порядках в одной полуплоскости и соответствующих им вихревых пучков порядков от -1 до -3, расположенных симметрично в другой полуплоскости в диаметрально противоположных дифракционных порядках. При наличии вихревой составляющей в Гауссовом пучке в соответствие с принципом согласованной фильтрации будет происходить компенсация фазы для вихрей соответствующих порядков и формирование корреляционных пиков в центрах дифракционных порядков. При отсутствии во входном пучке вихревых составляющих в фокусе линзы будет наблюдаться набор колец разных диаметров в дифракционных порядках, соответствующих вихревым фазам различных порядков с нулевой освещенностью в центрах колец. Моделирование с применением вихревого фильтра соответствует условиям проведенных в работе натуральных экспериментов.

Результаты моделирования в приближении тонкого элемента работы оптической системы, состоящей из лазерного источника света с круговой поляризацией, 8-секторной поляризационной пластинки для формирования поля типа “радиальная поляризация 1-го порядка”, фазовой пластинки, вихревого многоканального фильтра и линзы приведены на рисунке 4. Верхняя строка на рисунке 4 соответствует случаю отсутствия в системе фазовой пластинки. Было показано, что секторная поляризационная пластинка без коррекции фазы позволяет сформировать радиальную поляризацию

только на периферии сфокусированного поля (рисунок 4б), а в центре, где наблюдается максимум интенсивности, сохраняется круговая поляризация. Анализ поля с помощью многоканального вихревого фильтра показывает наличие вихревой сингулярности 2-го порядка (рисунок 4в), которая возникает из-за спин-орбитального взаимодействия, упомянутого выше. Нижняя строка рисунка 4 показывает результаты моделирования при наличии в системе 2-секторной фазовой пластинки, фаза которой показана на рисунке 4г. Дополнение секторной поляризационной пластинки фазовой пластинкой, ориентированной как показано на рисунке 4г, позволяет компенсировать вихревую сингулярность 2-го порядка и получить частично радиально поляризованное поле (рисунок 4д), которое определяется по наличию вихревых сингулярностей ± 1 порядка (рисунок 4е). Следует обратить внимание, что в фокусе линзы в случае отсутствия фазовой пластинки наблюдается максимум, а при ее наличии минимум, что также свидетельствует о формировании ЦВП.

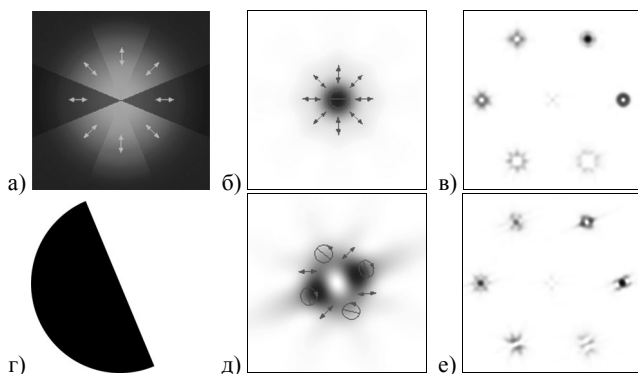


Рисунок 4 – Поляризационное преобразование Гауссова пучка с круговой поляризацией при прохождении 8-секторной поляризационной пленки (верхняя строка), дополненной фазовой половинной пластинкой (нижняя строка): схема расположения секторов поляризационной плёнки (X-компонента – тёмно-серый цвет, Y-компонента – светло-серый цвет) (а) и 2-секторной фазовой пластинки (г), сфокусированное распределение интенсивности (б, д), распределение интенсивности в фокальной плоскости при наличии многоканального вихревого фильтра (в, е)

На рисунке 5 показаны результаты моделирования в приближении тонкого элемента формирования и анализа поля типа “азимутальная поляризация 2 порядка”, полученного при помощи предложенной сэндвич-структуры. Верхняя строка показывает результаты моделирования для 8-секторной поляризационной пластинки без дополнительной фазовой пластинки. Как видно, использование 8-секторной поляризационной пластинки с другим расположением секторов (рисунок 5а) позволяет сформировать поле с азимутальной поляризацией 2-го порядка на периферии и круговой поляризацией в центре (рисунок 5б). Анализ поля с помощью многоканального вихревого фильтра (рисунок 5в) показывает отсутствие вихревых сингулярностей, которые принципиально должны быть у цилиндрически поляризованных пучков 2-го порядка. Дополнение 4-секторной фазовой пластинкой (рисунок 5г), позволяет получить азимутально поляризованное поле хорошего качества (рисунок 5д), что подтверждает анализ с помощью многоканального вихревого фильтра (рисунок 5е), где наилучшим образом выделяются корреляционные пики, соответствующие вихрям ± 2 порядков.

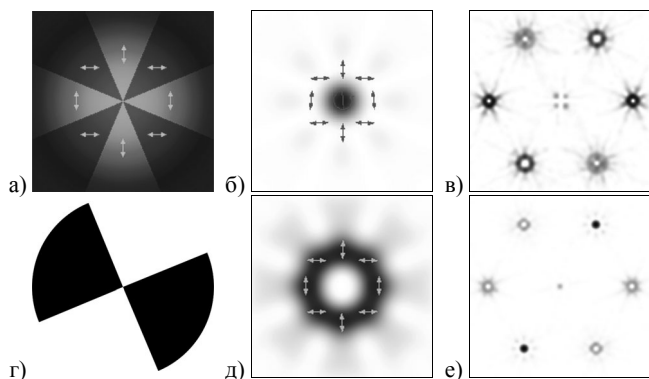


Рисунок 5 – Поляризационное преобразование Гауссова пучка с круговой поляризацией при прохождении 8-секторной поляризационной плёнки (верхняя строка), дополненной фазовой половинной пластинкой (нижняя строка): схема расположения секторов поляризационной плёнки (X-компонента – тёмно-серый цвет, Y-компонента – светло-серый цвет) (а) и 4-секторной фазовой пластинки (г), сфокусированное распределение интенсивности (б, д), распределение интенсивности в фокальной плоскости при наличии многоканального вихревого фильтра (в, е)

В конце главы проведено экспериментальное исследование результатов формирования цилиндрических векторных пучков высокого порядка с использованием секторных многослойных структур. Для проверки правильности положения поляризационных осей секторов в поляризационной пластинке проводилась регистрация интенсивности прошедшего излучения при освещении пластинки излучением с круговой поляризацией в зависимости от положения анализатора расположенного после пластинки с различными углами поляризационной оси по отношению к оси x . В эксперименте изменение угла осуществлялось поворотом анализатора вокруг оптической оси. Полученные распределения интенсивности при различных положениях анализатора показаны на рисунке 6. Как видно, расположение секторов соответствует рисункам 4а и 5а.

Положения оси	0°	-45°	45°	90°
Элемент Pa1				
Элемент Pa2				

Рисунок 6 – Распределения интенсивности, сформированные секторными пластинками, при различных положениях анализатора

Затем исследовались распределения интенсивности света в фокусе линзы для полученных неоднородно поляризованных пучков первого и второго порядка. Для этого

изготовленные секторные сэндвич структуры освещались излучением гелий-неонового лазера с круговой поляризацией, а за ними вначале устанавливалась линза, а потом ещё и добавлялся многоканальный вихревой фильтр для анализа вихревой фазы. Экспериментальные распределения интенсивности света, полученные с использованием восьмисекторных поляризационных пластин “Prl” и “азимутальная поляризация 2 порядка” и двухсекторной или четырёхсекторной фазовой пластинки, показаны на рисунках 7 и 8.

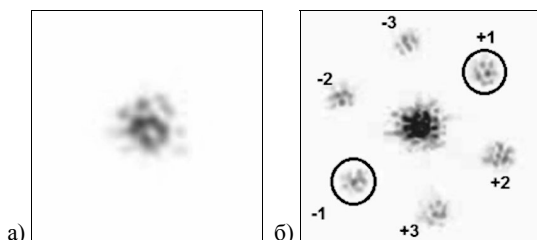


Рисунок 7 – Экспериментальное распределение интенсивности в фокусе без многоканального ДОЭ (а) и с многоканальным ДОЭ (б) для восьмисекторной поляризационной пластины “Prl” в комбинации с двухсекторной фазовой пластиной

Распределение в фокальной плоскости после поляризационной плёнки “радиальная поляризация 1 порядка” и двухсекторной фазовой пластины (см. рисунок 7а) имеет тёмную область в центре, что согласуется с результатами моделирования (см. рисунок 4д). Также при прохождении многоканального вихревого фильтра образуются максимумы в ± 1 порядках дифракции, что также соответствует результатам моделирования (см. рисунок 4е) и указывает на наличие оптических вихрей порядка $m = \pm 1$. Значения экспериментально полученных значений интенсивности в центрах выделенных порядков дифракции не менее чем в 3 раза превосходят значения интенсивности в центрах остальных порядков. Относительно небольшое отношение сигнал/шум в данном случае объясняется несовершенством сэндвич структур, которые помимо полезных, формируют и паразитные поляризационно-фазовые распределения.

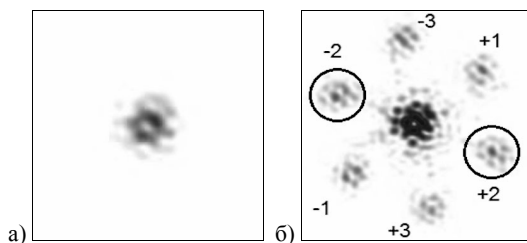


Рисунок 8 – Экспериментальное распределение интенсивности в фокусе линзы без многоканального ДОЭ (а) и с многоканальным ДОЭ (б) для восьмисекторной поляризационной пластины “Pa2” и четырёхсекторной фазовой пластины

На рисунке 8 показаны экспериментальные распределения интенсивности в фокусе для гауссова пучка с круговой поляризацией, прошедшего через поляризационную плёнку “азимутальная поляризация 2 порядка”, сложенную с четырёхсекторной фазовой пластиной. Эти результаты также хорошо согласуются с результатами моделирования (см. рисунок 5).

В третьей главе сформулированы теоретические основы и приведены результаты численных и натуральных экспериментов по исследованию предложенных оптических элементов [5, 6] для формирования азимутально поляризованного пучка с вихревой фазовой зависимостью, образованных двумя и тремя коническими поверхностями. 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 как с помощью программы трассировки лучей, так и методом FDTD. На рисунке 9а показан плоскопараллельный пучок с круговой поляризацией, падающий на коническую поверхность снизу вверх. Угол падения по всей поверхности конуса равен углу Брюстера. Очевидно, что при падении на границу раздела двух сред под углом Брюстера происходит разделение луча на отражённый и преломленный, причем отражённые лучи будут полностью поляризованы таким образом, что отражённый пучок будет иметь азимутальную поляризацию. На рисунке 9а пучок падает на поверхность снизу вверх, причём тёмные лучи, отражённые и прошедшие через противоположную сторону конической поверхности, образуют азимутально поляризованный конический пучок, а преломлённые светлые лучи приобретают эллиптическую поляризацию с преобладанием радиальной составляющей и имеют другой угол расходимости. Если добавить в преломляющем оптическом элементе вторую коническую поверхность таким образом, чтобы пучок тёмных лучей претерпевал на ней полное внутреннее отражение, то вдоль оптической оси вверх будет распространяться плоскопараллельный азимутально поляризованный пучок с вихревой фазой. Центральный разрез такого элемента и ход крайних лучей показан на рисунке 9б, $\alpha = \pi/2 - \beta$, β – угол Брюстера для среды с показателем преломления n , σ – угол, обеспечивающий полное внутреннее отражение лучей параллельно оптической оси.

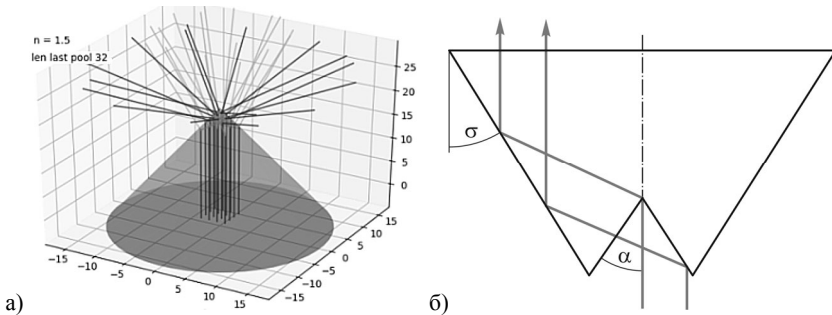


Рисунок 9 – Взаимодействие плоского пучка с конической поверхностью раздела двух сред (а), предлагаемая схема элемента с параметрами (б) (центральный разрез)

Экспериментально был изготовлен двухконический элемент на станке с ЧПУ и получен азимутально поляризованный пучок кольцевой формы. Экспериментальные распределения интенсивности для различных положений анализатора представлены на рисунке 10. Из рисунка видно, что внутреннее кольцо азимутально поляризовано.

Двухконический элемент производит азимутально поляризованное кольцо. Идея трёхконического элемента (триконуса) основана на преобразовании этого кольца в круг при уменьшении угла раскрытия внешнего конуса и добавлении третьей конической поверхности (рисунок 11) с углом конусности ψ , рассчитанным по формуле (1). Такой угол

обеспечивает параллельность всех выходящих лучей после преломления на третьей конической поверхности. Угол σ рассчитывается с учётом преломления на третьей конической поверхности.

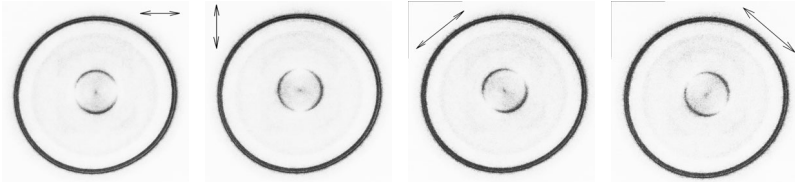


Рисунок 10 – Результаты эксперимента. Распределения интенсивности выходного пучка, полученные для различной ориентации анализатора-поляризатора

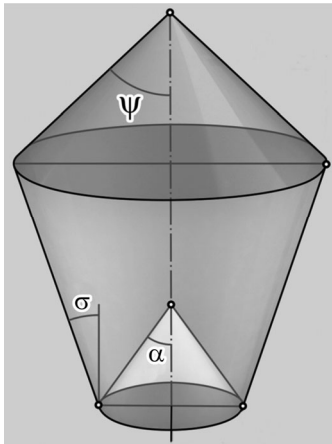


Рисунок 11 –Общий вид преобразователя поляризации лазерного излучения

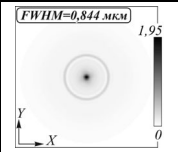
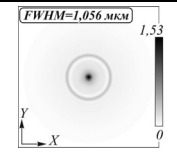
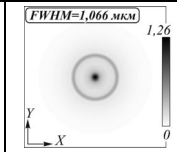
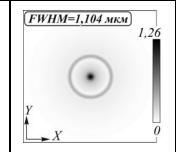
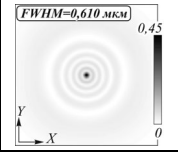
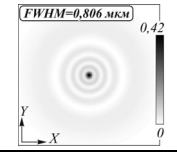
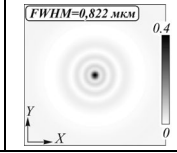
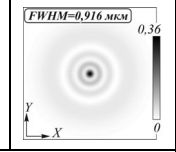
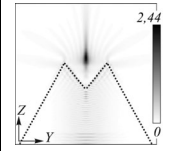
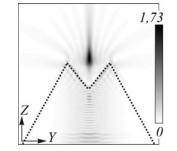
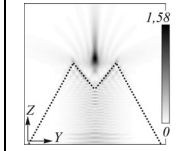
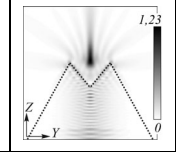
$$\psi = 2\sigma + \alpha - \arctan \left(\frac{\cos \left(2\sigma + \alpha + \arcsin \left(\frac{\cos 3\alpha}{n} \right) \right)}{n - \sin \left(2\sigma + \alpha \arcsin \left(\frac{\cos 3\alpha}{n} \right) \right)} \right) + \arcsin \left(\frac{\cos 3\alpha}{n} \right). \quad (1)$$

При использовании таких элементов возникает задача исследования преобразования излучения многоконическими аксиконами в электромагнитном приближении с целью уточнения результатов геометрикооптического расчёта, а также исследования устойчивости поляризационного преобразования в зависимости от длины волны. В работе было проведено исследование влияния длины волны на свойства сформированного двухконическим аксиконом оптического пучка при изменении длины волны в диапазоне от 1,0 мкм до 1,5 мкм. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

В таблице 1 представлены результаты расчёта дифракции в виде поперечного и продольного распределения интенсивности электрического поля E . Видно, что независимо от длины волны $1 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ мкм}$ падающего излучения для фиксированного показателя преломления элемента формируется распределение интенсивности практически с одинаковым радиусом внешнего кольца сразу после элемента (на рас-

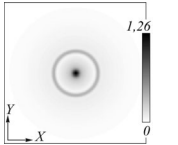
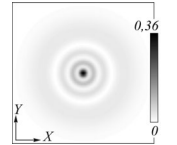
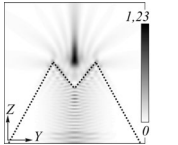
стоянии $z = 11$ мкм). На некотором расстоянии от элемента ($z = 15$ мкм) видно формирование Бесселеподобного распределения с масштабными вариациями, что вполне согласуется с изменением величины длины волны. Таким образом, на основе численного моделирования методом FDTD показано сохранение работоспособности предложенного элемента при изменении длины волны падающего в достаточно широком диапазоне ($1 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 1,5 \text{ мкм}$).

Таблица 1 – Сравнение действия биконического аксикона ($n = 1,5$) для источников света с различной длиной волны λ и круговой поляризацией

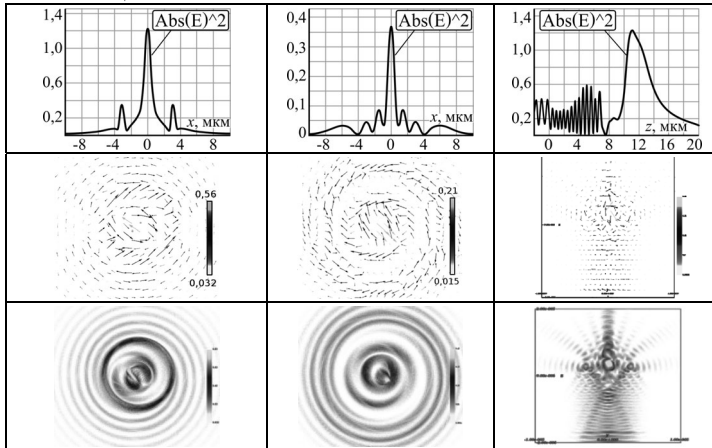
λ	1,0 мкм	1,2 мкм	1,3 мкм	1,5 мкм
Показатель преломления элемента $n = 1,5$				
$z = 11$ мкм				
проекция OXY $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
$z = 15$ мкм				
проекция OXY $x = -10 \dots 10$ мкм $y = -10 \dots 10$ мкм				
Продольное сечение				
проекция OYZ $y = -10 \dots 10$ мкм $z = 0 \dots 20$ мкм				

Результаты моделирования взаимодействия биконического аксикона с показателем преломления $n = 1,5$ и импульсного Гауссова пучка с круговой поляризацией (продолжительность импульса 5 фемтосекунд) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Действие биконического аксикона ($n = 1,5$) при использовании импульсного источника света с круговой поляризацией ($x = -10 \dots 10$ мкм; $y = -10 \dots 10$ мкм; $z = 0 \dots 20$ мкм)

Продольное сечение OXY		Продольное сечение OYZ
$z = 11$ мкм	$z = 15$ мкм	
		

Продолжение таблицы 2



Таким образом, удаётся охватить достаточно большой разброс по длинам волн в диапазоне от 0,6 мкм до 2,5 мкм. В третьей строке таблицы видно, что в поперечном сечении пучка как на расстоянии 11 мкм, так и 15 мкм наблюдается азимутальная поляризация пучка. Следовательно, поляризационное преобразование, осуществляемое многоконическим элементом, обладает устойчивостью к изменению длины волны. Распределение интенсивности ведет себя подобно показанному в таблице 1 для длины волны 1,5 мкм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана и экспериментально реализована оптическая система для формирования пучков с неоднородной поляризацией и заданной амплитудно-фазовой структурой на основе генерации модовых пучков различными участками одного жидкокристаллического модулятора и последующего сложения пучков с использованием интерферометра Маха–Цендера. Полученная энергетическая эффективность формирования пучков в реализованной оптической системе не менее чем в 2 раза больше по сравнению с ранее использовавшейся схемой на основе применения дифракционной решетки. Экспериментально получены два пучка равной мощности с необходимым поляризационным состоянием и заданной амплитудно-фазовой структурой. Достигнута поляризационная чистота пучков более 96 %.

2. Разработаны и изготовлены оптические секторные сэндвич-структуры, состоящие из сложенных вместе дихроичной секторной поляризационной плёнки и бинарно-фазовой пластины для преобразования пучка с круговой поляризацией в цилиндрические векторные лазерные пучки с квазирадиальной поляризацией 1-ого и азимутальной поляризацией 2-ого порядков. В проведенных оптических экспериментах дополнение секторной поляризационной плёнки двухсекторной фазовой пластинкой позволило компенсировать вихревую сингулярность 2-го порядка которая возникает из-за спин-орбитального взаимодействия и получить корреляционные максимумы соответствующие вихревым фазам ± 1 порядка, и минимум в центре фокальной плоскости, что совпадает с результатами моделирования. При экспериментальном исследовании поля типа «азимутальная поляризация 2-го порядка» также были получены корреляцион-

ные максимумы в соответствующих порядках и нулевая интенсивность в центре фокальной плоскости.

3. Рассчитаны и исследованы многоконические моноблочные оптические элементы для получения азимутально поляризованных пучков с вихревой фазовой зависимостью. На основе численного моделирования в лучевом приближении, а также методом FDTD показано, что двухконический аксикон с показателем преломления $n=1,4958$ при освещении Гауссовым пучком с круговой поляризацией и длиной волны $\lambda=1,5$ мкм формирует азимутально поляризованный коллимированный пучок кольцевой формы с энергетической эффективностью около 7%. Соотношение энергий внешнего кольца по отношению к излучению, сосредоточенному в кольце с азимутальной поляризацией составляет 1:16. На основе геометрикооптического расчёта разработан элемент с третьей конической поверхностью, который даёт пучок круглой формы с такой же эффективностью. Разброс длин волн падающего излучения в достаточно широких пределах ($0,6 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 2,5 \text{ мкм}$) при проведении моделирования не привёл к существенному изменению поляризационного состояния сформированного пучка.

Основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Карпеев, С.В. Интерференционная схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, **А.М. Алгубили** // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 214-218. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.
2. Karpeev, S. Interference shaper of polarization-inhomogeneous laser beams based on a spatial light modulator / S. Karpeev, V. Podlipnov, N. Ivliev, **A. Algubili** // IEEE Xplore, International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – 2020. – Samara, Russia. – DOI:10.1109/ITNT49337.2020.9253170.
3. Карпеев, С.В. Формирование цилиндрических векторных пучков высоких порядков при помощи секторных сэндвич-структур / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, С.А. Дегтярев, **А.М. Алгубили** // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 5. – С. 682-691. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.
4. Podlipnov, V. Film sector optical element for creating inhomogeneous polarizations with phase correction of higher orders / V. Podlipnov, S. Karpeev, V. Pararin, **A.M.k. Algubili** // IEEE Xplore, International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – 2020. – Samara, Russia. – DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253274.
5. Algubili, A.M. Refractive multi-conical elements for cylindrical vector beam generation / A.M. Algubili, S.A. Degtyarev, S.V. Karpeev, N.A. Ivliev //Proc. SPIE . – Optical Technologies for Telecommunications 2022.–2023.–Vol.12743.–1274308. – <https://doi.org/10.1117/12.2673106>.
6. Хорин, П.А. Исследование методом FDTD поляризационных преобразований, осуществляемых преломляющим биконическим аксиконом / П.А. Хорин, **А.М. Алгубили**, С.А. Дегтярев, С.К. Сергунин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 5. – С. 742-750. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1326.