

На правах рукописи

Афанасьев Кирилл Николаевич

**ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДАМИ ОПТИКИ  
СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ**

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Самара – 2009

Работа выполнена в Самарском филиале Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Волостников Владимир Геннадиевич.**

— Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Котляр Виктор Викторович;**

доктор физико-математических наук,  
академик РАН, профессор  
**Самарцев Виталий Владимирович.**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Защита состоится 23 ноября 2009 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.218.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный университет», по адресу: 443011, г. Самара, ул. Ак. Павлова, д. 1, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный университет».

Автореферат разослан «22» октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

В.А. Жукова

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Пространственная структура лазерного излучения наряду с временными характеристиками играет существенную роль в задачах когерентной оптики и лазерных технологий. Совершенствование существующих методов лазерной обработки материалов, оптической диагностики, медицинских и биологических приложений, систем оптической обработки изображений и коммуникации повышает требования к пространственной структуре излучения. Благодаря новым методам синтеза полей со сложной пространственной структурой активно развивается лазерная манипуляция микрообъектами. В ряде задач, например, распространения излучения в нелинейных средах, временные характеристики излучения невозможно и некорректно анализировать без учёта пространственных характеристик.

Среди методов синтеза полей с заданной структурой наибольшее распространение получили фазовые дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Фазовый профиль такого элемента рассчитывается на компьютере, а затем воспроизводится при помощи управляемых фазовых модуляторов света или в виде микрорельефа на подложке из диэлектрика. При дифракции лазерного пучка на таком транспаранте в некоторой плоскости формируется поле с заданными характеристиками. Задача расчета фазового элемента формулируется как обратная: дано распределение интенсивности, нужно найти такой фазовый профиль, при дифракции на котором требуемое распределение будет сформировано.

Наиболее ранним и хорошо исследованным классом ДОЭ являются фокусаторы — фазовые элементы, рассчитанные на основе геометрической оптики. Основополагающие работы по расчету и исследованию фокусаторов были выполнены И.Н. Сисакином, В.А. Сойфером, В.А. Даниловым, М.А. Голубом, А.В. Гончарским в 80-х годах прошлого века. Опубликован ряд монографий по данной тематике. Фокусаторы позволяют сформировать требуемое распределение интенсивности в виде заданной кривой, что актуально, в первую очередь, для задач лазерных технологий. Регулярный зонный микрорельеф является главным достоинством фокусаторов, определяет их технологичность и практическую ценность. К недостаткам фокусаторов следует отнести: 1) сильное отличие геометро-оптических решений от реальных волновых и, как следствие, высокая неоднородность по интенсивности реальных синтезируемых полей; 2) неоднозначность решения, связанная с неоднозначностью выбора геометрического отображения апертуры оптического элемента на кривую; 3) высокую чувствительность к однородности освещающего пучка: локальные неоднородности интенсивности во входной

плоскости приводят к локальным неоднородностям в выходной плоскости. Ввиду сложности решения обратной задачи фокусировки, аналитические решения получены только для случая фокусировки в простые гладкие кривые, такие как отрезок, кольцо, полукольцо. Для получения более сложных кривых используются сегментированные фокусаторы. В этом случае апертура фокусатора разбивается на сегменты, каждый из которых реализует фокусировку в соответствующий элемент контура. Это упрощает методику расчета фокусаторов, однако приводит к ряду недостатков: 1) выбор разбиения на сегменты неоднозначен; 2) дифракционная ширина различных линий фокусировки может существенно различаться; 3) усиливаются дифракционные эффекты и снижается плотность энергии излучения в окрестности контура фокусировки.

На данный момент наиболее эффективным способом решения обратных задач синтеза фазовых элементов являются различные итерационные алгоритмы. Наиболее распространенным является класс алгоритмов, основанных на алгоритме Герчберга-Сэкстона. Выбор начального приближения фазы является определяющим для итерационного процесса и влияет на сходимость и вид полученных решений. Существуют две методики выбора начального приближения. Первая основана на том, что в качестве нулевого приближения задачи берётся геометро-оптическое решение соответствующего фокусатора. Как правило, в ходе итерационного процесса гладкость начального фазового профиля меняется незначительно, однако данный подход сохраняет все недостатки, свойственные фокусаторам. Вторая методика основана на выборе в качестве нулевого приближения некоторого случайного фазового распределения. Главным недостатком подхода является то, что конечное решение имеет квазислучайную структуру, что представляет дополнительные сложности при её синтезе стандартными технологическими методами, а большое число скачков в фазовом рельефе приводит к неконтролируемому рассеянию энергии и, как следствие, низкой энергетической эффективности. Таким образом, известные подходы обладают рядом существенных недостатков, поэтому **актуальным** является поиск новых методов выбора начального приближения фазы при расчете ДОЭ для формирования полей с заданным видом интенсивности. Оптические элементы должны обладать регулярным фазовым профилем, высокой энергетической эффективностью и формировать требуемое поле с достаточной точностью.

Вместе с задачами синтеза полей с заданной пространственной структурой важное значение имеют задачи анализа структуры реально сформированных полей. В силу специфики оптического диапазона регистрации поддается не комплексная амплитуда оптического сигнала, а лишь его интенсивность, которая в общем случае не является полной характеристикой свето-

вого поля. Традиционные методы интерферометрии дают принципиальную возможность косвенных фазовых измерений, однако, в ряде задач невозможно или трудно реализовать интерферометрический принцип получения информации о комплексной амплитуде или фазе поля. Данная ситуация имеет место в астрономии, рентгеновской и адаптивной оптике. Это делает **актуальным** поиск способов анализа и восстановления полей по измерениям интенсивности.

**Цель диссертационной работы** состоит в развитии нового подхода к решению задачи итерационного синтеза фазовых элементов для формирования когерентных световых полей с заданной пространственной структурой и разработке способов анализа их пространственной структуры по измерениям интенсивности. В соответствии с указанной целью решались следующие задачи:

1. На основе оптики спиральных пучков разработать новый подход к выбору начального приближения фазы для итерационного алгоритма расчёта фазового элемента, формирующего поле в виде кривой. Определить оптимальные параметры алгоритма, обеспечивающие сходимость и качество получаемых решений.
2. Рассчитать примеры фазовых элементов для формирования полей в виде заранее заданных кривых, определить допустимые критерии дискретизации фазы и пространственного разрешения элементов.
3. Разработать способ управления величиной углового момента формируемых полей и однородностью его распределения.
4. Экспериментально сформировать поля с распределением интенсивности в виде кривых.
5. Разработать способ анализа одномерных полей путем реализации астигматического преобразования.

### **Научная новизна работы**

1. Предложен новый способ расчета фазовых дифракционных элементов, позволяющих формировать когерентные световые поля с распределением интенсивности в виде заданных кривых и обладающих угловым моментом.
2. Экспериментально реализованы вихревые световые поля с фазовыми сингулярностями, заданным распределением интенсивности и обладающие угловым моментом при помощи только фазовых элементов на бихромированной желатине и пространственном модуляторе света.
3. Предложен метод анализа одномерных световых полей по расположению изолированных нулей интенсивности поля, полученного после астигматического преобразования.

## **Практическая ценность работы**

Результаты работы могут служить физической основой для развития существующих лазерных технологий, методов лазерной манипуляции микрообъектами в медицине, биологии, микромеханике, формирования световых ловушек для атомов, а предложенный метод восстановления полей — основой для создания датчика волнового фронта.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Метод, в котором в качестве начального приближения искомой фазы используется фаза соответствующего спирального пучка, позволяет синтезировать фазовые элементы для формирования световых полей со сложным распределением интенсивности и углового момента. Из численных и натуральных экспериментов следует, что величиной углового момента можно управлять посредством изменения числа сингулярностей соответствующего спирального пучка, при этом зависимость величины углового момента от числа сингулярностей является линейной.

2. Для формирования световых полей с фазовыми сингулярностями количество градаций фазы должно быть не менее 4-х. При этом для синтезированных полей среднеквадратичное отклонение интенсивности формируемого поля составляет менее 5%, а величина интеграла перекрытия превышает 90%.

3. Астигматическое преобразование одномерного поля позволяет реализовать аналитическое продолжение его фурье-образа и восстановить исходное поле за одно измерение интенсивности.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в диссертацию, представлялись на следующих конференциях: Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2004, 2006), Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике (Самара, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008), Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies (Санкт-Петербург, 2005), Saratov Fall Meeting (Саратов, 2005), Демидовские чтения (Екатеринбург, 2006), Int. Laser Physics Workshop (Lausanne, Switzerland, 2006; Leon, Mexico, 2007; Barse-lona, Spain, 2009), XI Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и I Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований» (Звенигород, 2006), Научная сессия МИФИ (Москва, 2007, 2009), Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 2007, 2008), Int. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics (Minsk, Belarus, 2007), SPIE Optics and Photonics 2007 (San Diego, USA, 2007), 26-я школа по когерентной оптике и голографии (Иркутск, 2007), X Международ-

ные Чтения по квантовой оптике (Самара, 2007), Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Звенигород, 2007), Медицинская физика и инновации в медицине (Троицк, 2008), 8-th Asia-Pacific Conf. of Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (Tokyo, Japan, 2008), 4-th Int. Conf. «Singular Optics (Optical Vortices): Fundamentals and Applications» (Алушта, Украина, 2008), 4-th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (Алушта, Украина, 2008), многократно докладывались на семинарах СФ ФИАН.

Результаты, представленные в диссертаций, были получены в рамках: гранта CRDF(RUP1-2623-SA-04); грантов РФФИ (04-02-96508, 07-02-01280, 07-02-12221, 07-02-96614); гранта для студентов, аспирантов и молодых ученых Самарской области 2006 года 271E2.4 К; программы ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур»; бюджетных НИР (№ гос. регистрации 01200502889, 200502890, 01200805602); программы «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Результаты, вошедшие в диссертацию, были отмечены: премией имени С.И. Вавилова на конкурсе Учебно-научного комплекса ФИАН 2006 года за цикл работ: «Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами»; дипломом I степени на конкурсе молодежных научных работ по оптике и лазерной физике 2007 года, проведенном Советом программы «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур» за работу «Формирование вихревых лазерных полей для микроманипуляции»; победой на областном конкурсе «Молодой ученый» Министерства образования и науки Самарской области в 2009 году.

### **Публикации**

По материалам, вошедшим в диссертацию, опубликовано 4 работы в рецензируемых журналах, определенных перечнем ВАК, 3 работы в прочих рецензируемых журналах и 20 работ в сборниках трудов и тезисов конференций.

### **Личный вклад автора**

Все численные и натурные эксперименты выполнены автором. Исходная постановка задач, разработка подходов к их решению и интерпретация результатов осуществлялись совместно с соавторами.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем работы составляет 108 страниц, включая 49 рисунков. Библиография содержит 105 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** формулируется постановка задачи расчёта фазовых дифракционных элементов для синтеза когерентных световых полей с заданным видом интенсивности и проводится анализ существующих методов её решения.

Основным способом решения данной задачи является использование итерационного алгоритма Герчберга-Сэкстона. Принципиальной особенностью данного алгоритма является необходимость задания начального приближения фазового распределения. Использование фазовых сингулярностей открывает новые возможности для решения поставленной задачи. Особенности подхода можно проиллюстрировать на примере фокусировки в окружность.

Распределение интенсивности в виде окружности можно сформировать при помощи элемента с фазовым профилем вида:

$$\varphi_m(r, \theta) = -\frac{kr^2}{2i_0} \pm \frac{kR_0r}{l_0} + m\theta,$$

где  $(r, \theta)$  — полярные координаты,  $l_0$  — расстояние до плоскости фокусировки,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $R_0$  — радиус кольца,  $m$  — целое число. При  $m = 0$  решение называется «круговой аксикон», при  $m \neq 0$  — «вихревой аксикон». Вид функции  $\varphi_0(r, \theta)$  и  $\varphi_7(r, \theta)$  без квадратичных слагаемых  $kr^2/2l_0$ , а также графики интенсивности  $I(R)$  показаны на рис. 1. Вихревой аксикон осуществляет невырожденное отображение, что означает, что никакой фокусировки в геометрическом смысле не происходит, т.е. такое решение является волновым и не может быть получено в рамках геометро-оптического подхода.

Важным объектом сингулярной оптики являются спиральные пучки света, обнаруженные и исследованные в Самарском филиале ФИАН (Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников, 1993-97). В рамках оптики спиральных пучков света существует принципиальная возможность формирования лазерных пучков в виде произвольной плоской кривой при помощи амплитудно-фазовых дифракционных элементов. Однако с практической точки зрения необходимость использования амплитудного транспаранта приводит к низкой энергетической эффективности данного метода.

Во **второй главе** рассматривается новый подход к выбору начального приближения фазы, основанный на оптике спиральных пучков.



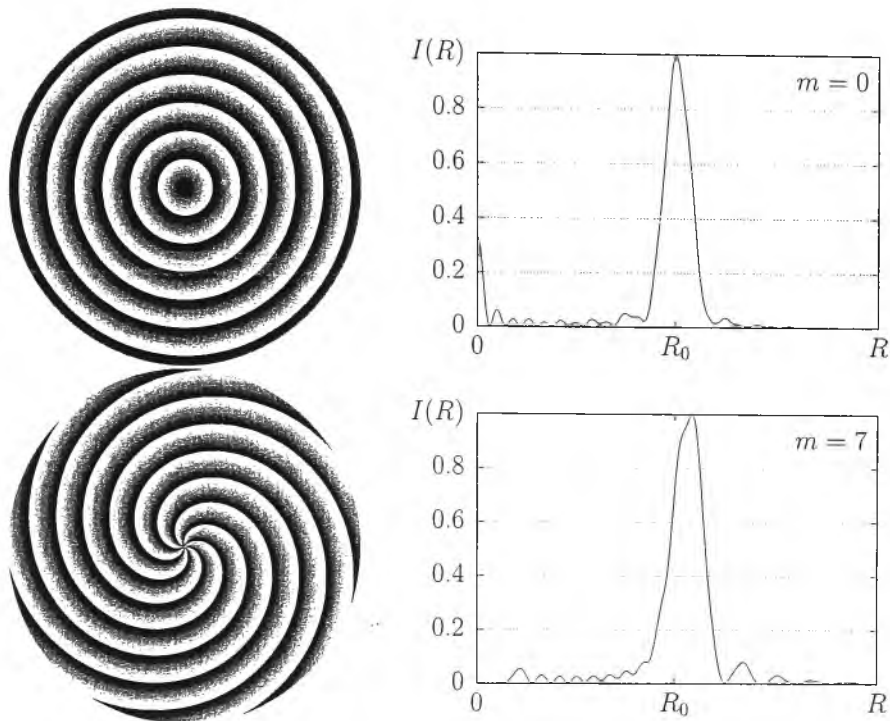


Рис. 1. Круговой ( $m = 0$ ) и вихревой ( $m = 7$ ) аксиконы. На фазовых распределениях черный цвет соответствует  $\varphi = 0$ , белый —  $\varphi = 2\pi$ . В случае кругового аксикона в распределении интенсивности наблюдается локальный максимум в центре.

Показано, что если для формирования поля воспользоваться только фазовой частью спирального пучка, то интенсивность сформированного поля близка по виду к интенсивности соответствующего спирального пучка. Таким образом, фазовая часть спирального пучка сама по себе является достаточно хорошим начальным приближением для итерационного алгоритма. Через 10-15 итераций среднеквадратичное отклонение интенсивности вдоль образующей кривой сформированного поля становится менее 5%, и около 65-75% мощности поля сосредоточено в малой окрестности кривой. Пример изменения вида фазового распределения на различных итерациях приведен на рис. 2.

Существуют несколько важных особенностей, характерных для фазовых элементов данного типа. Во-первых, начальное приближение фазы существует для любой заранее заданной плоской кривой, что следует из возможности построения спирального пучка с заранее заданным видом интенсивно-

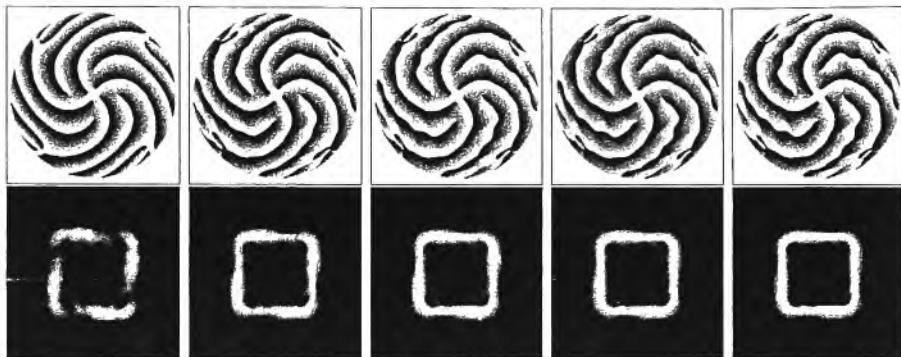


Рис. 2. Результаты пяти итераций алгоритма по созданию фазового элемента, преобразующего гауссов пучок в границу квадрата.

сти. Это обстоятельство позволяет говорить о данном подходе как о методе расчёта фазовых элементов для формирования полей в виде кривых. Во-вторых, в ходе итерационного процесса тип топологии фазового распределения не меняется, т.е. решение, полученное на основе  $N$ -квантованного спирального пучка, тоже содержит  $N$  сингулярностей. Также сохраняется кусочно-гладкая структура фазы, что является несомненным достоинством с точки зрения экспериментального синтеза фазовых элементов. Благодаря наличию сингулярностей в фазовом распределении, полученные поля также обладают орбитальным угловым моментом. В-третьих, полученные решения принципиально являются волновыми, не осуществляют фокусировку в геометрическом смысле и не могут быть получены ни в рамках геометро-оптического приближения, ни на основе случайных фазовых распределений. Примеры рассчитанных распределений представлены на рис. 3.

Известно, что при распространении в зоне Френеля продольная составляющая углового момента поля

$$L = \frac{1}{E} \iint_{\mathbb{R}^2} M(x, y, l) dx dy, \quad E = \iint_{\mathbb{R}^2} I(x, y, l) dx dy$$

является интегральным инвариантом. Здесь

$$M(x, y, l) = \frac{\epsilon}{8\pi ck} \operatorname{Im} \left[ \bar{F}(x, y, l) \left( x \frac{\partial F}{\partial y}(x, y, l) - y \frac{\partial F}{\partial x}(x, y, l) \right) \right]$$

— плотность углового момента,  $F(x, y, l)$  — комплексная амплитуда поля.

Для полей в виде заданной кривой представляет интерес возможность управлять величиной углового момента. Управление величиной углового момента основано на свойствах спиральных пучков света в форме замкнутых

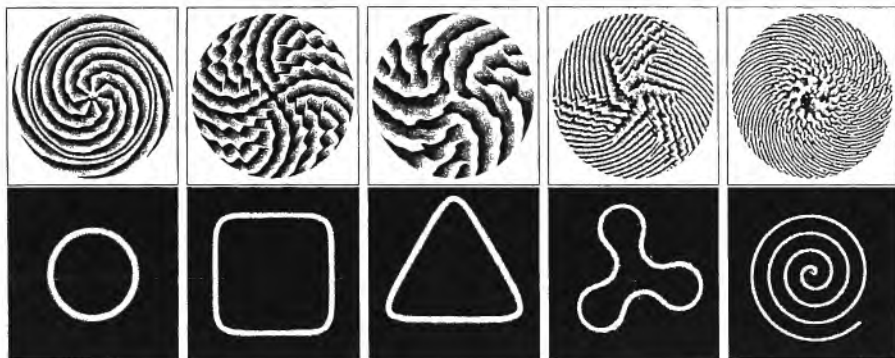


Рис. 3. Фазовые элементы, посчитанные на основе фазовых распределений спиральных пучков и численно полученные распределения интенсивностей полей, формируемых ими.

кривых: с ростом номера квантования форма распределения интенсивности спирального пучка не меняется, однородность интенсивности улучшается, угловой момент возрастает. Численное моделирование показало, что величина удельного углового момента линейно растёт с увеличением числа сингулярностей, что согласуется со свойствами спиральных пучков. Графики зависимостей углового момента полей от числа сингулярностей представлены на рис. 4.

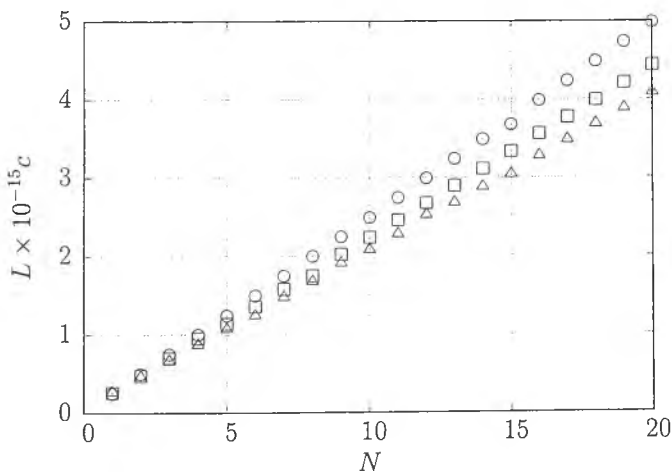


Рис. 4. Зависимости углового момента от числа сингулярностей для полей в форме кольца, треугольника и квадрата (отмечены соответствующими маркерами).

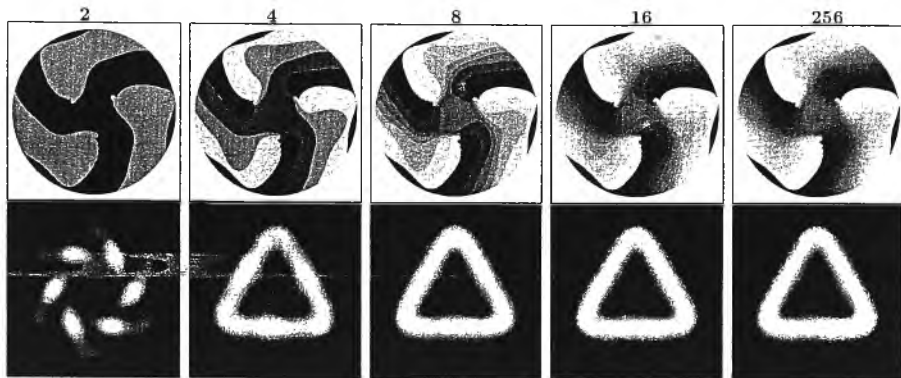


Рис. 5. Влияние дискретизации фазы дифракционного элемента на качество формируемого поля в форме треугольника. Первый ряд – распределение фазы элемента, второй – распределение интенсивности поля, сформированного в дальней зоне.

Число дискретных уровней фазы является определяющим параметром при изготовлении элементов литографическими методами. Увеличение количества уровней дискретизации приближает экспериментальный фазовый профиль к теоретическому, при этом возрастает время и стоимость изготовления дифракционного элемента. Примеры распределений интенсивности полей, сформированных фазовыми элементами с дискретным фазовым распределением приведены на рис. 5 (первый ряд – распределение фазы элемента, второй ряд – распределение интенсивности сформированного поля). Видно, что в случае двух уровней дискретизации фазы качественно меняется структура сформированного поля. Это объясняется тем, что с помощью двух уровней квантования фазы невозможно передать направление закрутки изолированных нулей поля. Значения среднеквадратичного отклонения интенсивности двух полей  $RMS(I_N, I_{256})$ , полученные для квантованного и неквантованного элементов и значения интеграла перекрытия  $\chi(F_N, F_{256})$  соответствующих полей, полученные в ходе численного моделирования, приведены в таблице:

$N$	$RMS(I_N, I_{256})$	$\chi(F_N, F_{256})$
2	0.214608	0.465850
4	0.033975	0.926193
8	0.005346	0.996829
16	0.001850	0.999724

В случае реализации фазового профиля при помощи пространственных модуляторов света, принципиальным параметром, определяющим стоимость и быстродействие устройства, является его пространственное разрешение.

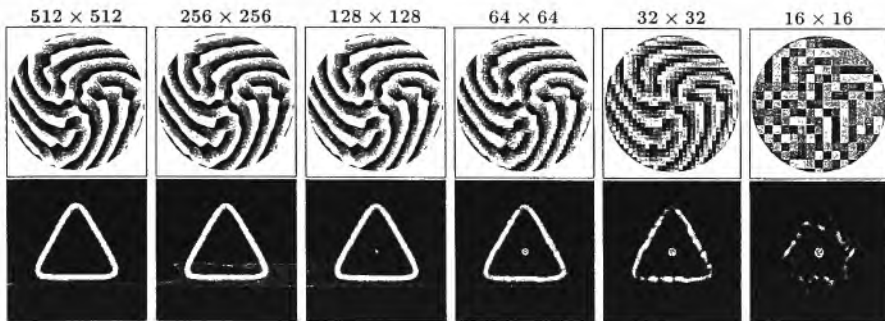


Рис. 6. Влияние пространственного разрешения транспаранта на качество формируемого поля.

Численное исследование полученных нами фазовых распределений показало, что при уменьшении разрешения от 512 до 64, доля энергии, попадающей в окрестность границы треугольника, и однородность распределения интенсивности падают менее чем на 5%. Изменение вида фазового распределения при постепенном уменьшении пространственного разрешения модулятора представлено на рис. 6 (верхний ряд), теоретические распределения интенсивностей соответствующих полей представлены на рис. 6 (нижний ряд). Этот результат можно интерпретировать следующим образом: большая часть информации о структуре поля заложена в расположении точек сингулярности, которое сохраняется при уменьшении разрешения до тех пор, пока все нули остаются разрешенными.

Экспериментальная реализация световых полей осуществлялась двумя способами: 1) при помощи фазовых транспарантов, изготовленных на слоях бихромированной желатины; 2) при помощи пространственного модулятора света НЕО HOLOEYE 1080P (размер активной области — 15.36 × 8.64 мм, разрешение — 1920 × 1080 пикселей, шаг пикселей — 8 мкм, количество уровней фазы — 256 (8 бит), доля активной поверхности апертуры — 87%).

Распределение интенсивности поля, сформированного в дальней зоне дифракции, регистрировалось на матрицу цифрового фотоаппарата. Примеры зарегистрированных распределений интенсивности представлены на рис. 7. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Достигнутая энергетическая эффективность составила 50-60%.

Наличие у полей углового момента было установлено в экспериментах по манипуляции микрообъектами. Ненулевая плотность углового момента таких полей позволила осуществить перемещения частиц латекса по траекториям в форме треугольника, квадрата и спирали Архимеда посредством сформированных полей без дополнительных механических перемещений уз-

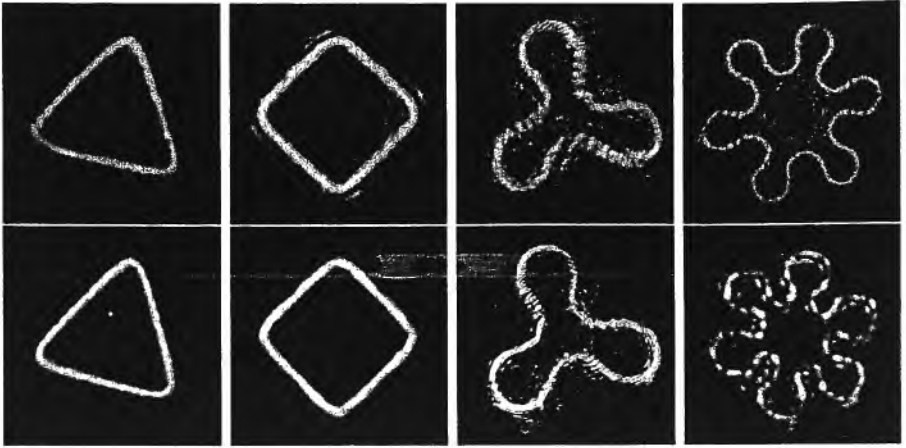


Рис. 7. Результаты экспериментального формирования полей: первый ряд — при помощи фазовых элементов, изготовленных на слоях бихромированной желатины, второй ряд — при помощи пространственного модулятора света.

лов экспериментальной установки.

В **третьей главе** рассматриваются методы формирования и анализа полей на основе астигматического преобразования. Проведено моделирование формирования спиральных пучков при помощи одномерных амплитудно-фазовых элементов, рассмотрен метод анализа спиральных пучков посредством преобразования их к одномерному виду. Предложен и исследован метод анализа одномерных световых полей на основе построения аналитического продолжения фурье образа функции при помощи астигматического преобразования.

Преобразование Фурье любого финитного поля является целой аналитической функцией экспоненциального типа. Также известно, что такую экспоненциальную функцию можно найти по положению нулей его аналитического продолжения с помощью бесконечного произведения:

$$F(z) = Az^n e^{cz} \prod_{j=1}^{\infty} (1 - z/z_j) e^{z/z_j}, \quad (1)$$

где  $z = x + iy$  — комплексная переменная,  $A, n, c$  — параметры,  $z_j$  — координата  $j$ -го изолированного нуля.

При астигматическом преобразовании одномерного светового поля  $U(\xi)$ , заданного на интервале  $[a, b]$ , получается двумерное поле с дислокациями

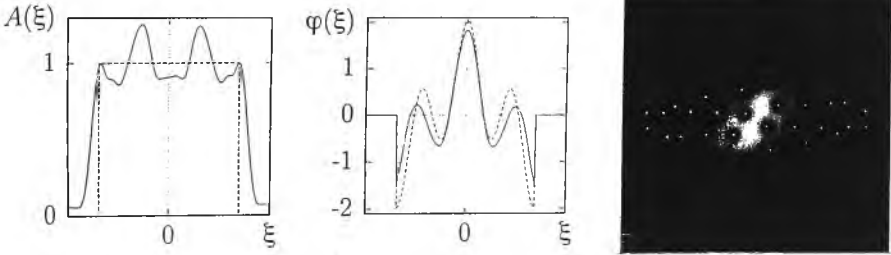


Рис. 8. Амплитуда и фаза объектного поля (пунктирная линия) и восстановленного поля (сплошная линия). Справа показано распределение интенсивности поля, полученного в результате астигматического преобразования. Точками отмечено положение изолированных нулей.

волнового фронта:

$$\begin{aligned}
 F(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \iint_{\mathbb{R}^2} \exp\left(-\frac{ik}{f}(x\xi + y\eta) + \frac{i\xi\eta}{4\rho^2}\right) U(\xi) \exp\left(-\frac{\eta^2}{8\rho^2}\right) d\xi d\eta = \\
 &= 2\rho \exp\left(-\frac{k^2\rho^2}{f^2}(x^2 + y^2)\right) \exp\left(-2i\frac{k^2\rho^2}{f^2}xy\right) F_0(x + iy),
 \end{aligned}$$

где

$$F_0(z) = \exp\left(\frac{k^2\rho^2}{f^2}z^2\right) \int_a^b \exp\left(-\frac{ikz\xi}{f} - \frac{\xi^2}{8\rho^2}\right) U(\xi) d\xi$$

— целая аналитическая функция,  $f$  — фокусное расстояние линзы, осуществляющей оптическое преобразование Фурье,  $\rho$  — гауссов параметр.

Результат астигматического преобразования является аналитическим продолжением функции  $\mathcal{F}[U(\xi) \exp(-\eta^2/8\rho^2)](kx/f)$  в комплексную плоскость ( $\mathcal{F}[\bullet]$  обозначает Фурье-образ), умноженным на астигматический фазовый множитель  $\exp(-2ik^2\rho^2xy/f^2)$ , функцию Гаусса  $\exp(-k^2\rho^2(x^2+y^2)/f^2)$  и экспоненциальный множитель  $\exp(k^2\rho^2z^2/f^2)$ , входящий в состав целой функции  $F_0(z)$ . Функция  $\exp(k^2\rho^2z^2/f^2)$  нулей в комплексной плоскости не имеет, поэтому поле  $F(x, y)$  имеет те же нули, что и  $F_0(z)$ . Исходя из этого можно найти нули комплексной функции  $F_0(z)$ , что позволяет восстановить объектное поле  $U(\xi)$ , используя представление (1).

В качестве модельного поля был рассмотрен одномерный фазовый объект (рис. 8). Распределение интенсивности его астигматического преобразования при значении параметра  $\rho = 1.5$  (соответствующее наилучшей визуализации нулей) приведено на рис. 8 справа.

Показано, что с ростом числа учитываемых нулей среднеквадратичная ошибка восстановления амплитуды убывает, а среднеквадратичная ошибка восстановления фазы выходит на минимальный уровень при учете нулей, лежащих внутри области высокой интенсивности. Наличие шума слабо сказывается на точности определения положения нулей. Пример восстановленного объекта приведен на рис. 8. Для восстановления было использовано  $n = 12$  нулей, ошибка восстановления амплитуды составила 6.7%, фазы — 0.087λ.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Развита метод синтеза световых полей, обладающих сложным распределением интенсивности и углового момента, где начальным приближением для итерационного алгоритма является фазовое распределение соответствующего спирального пучка. Параметры алгоритма позволяют косвенно управлять однородностью распределения плотности углового момента. Результаты численных и натуральных экспериментов показали, что величиной углового момента можно управлять, меняя число фазовых сингулярностей в структуре исходного спирального пучка.

2. Для ряда кривых (кольцо, треугольник, квадрат, спираль Архимеда, «снежинка») синтезированы соответствующие фазовые элементы. Численно и экспериментально показано, что полученные фазовые распределения в широких пределах устойчивы к дискретизации фазы и изменению разрешения фазового распределения (число уровней фазы должно быть 4 и более, пространственное разрешение не менее  $64 \times 64$  пиксела).

3. Экспериментально синтезированы поля со сложным распределением интенсивности и углового момента. Интенсивность полученных полей хорошо согласуется с теоретической. Наличие углового момента полей продемонстрировано в экспериментах по лазерной манипуляции микрообъектами.

4. Показано, что трансформация спирального пучка в одномерное поле при помощи астигматического преобразования позволяет определять количество сингулярностей внутри контура пучка и более точно детектировать неоднородности.

5. На основе астигматического преобразования предложен способ восстановления фазы одномерных полей путем оптической реализации аналитического продолжения фурье-образа поля. Численные эксперименты показали, что при увеличении числа детектированных нулей аналитического продолжения с 2-х до 20-ти среднеквадратичная ошибка восстановления амплитуды убывает более чем в 5 раз, а среднеквадратичная ошибка восстановления фазы составляет величину порядка 10%.



## Публикации в научных журналах, определенных ВАК

1. К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский. Световые поля с ненулевым угловым моментом для лазерного микроманипулирования // Известия Самарского научного центра РАН, 2007, т. 9, № 3, с. 615–619.
2. Е.Г. Абрамочкин, К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, С.П. Котова, В.Г. Волостников, Н.Н. Лосевский, А.М. Майорова, Е.В. Разуева. Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2008, т. 72, № 1, с. 76–79.
3. К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, Е.В. Разуева. Когерентные состояния в оптике // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2008, т. 72, № 5, с. 689–692.
4. К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, Е.Н. Воронцов, С.П. Котова, В.В. Патлань, Е.В. Разуева. Особенности формирования световых полей в виде кривых на основе оптики спиральных пучков // Известия Самарского научного центра РАН, 2009, т. 11, № 3, с. 71–75.

## Публикации в других изданиях

1. К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников. Анализ влияния дискретизации фазы на качество спиральных пучков света // Сборник статей Восьмой международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань: 2004, с. 51–56.
2. К.Н. Афанасьев. Анализ влияния дискретизации фазы на качество спиральных пучков света // Второй Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. 20–21 октября 2004 года. Сборник конкурсных докладов, Самара: 2005, с. 31–36.
3. К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников. Исследование влияния квантования фазы на качество спиральных пучков света // Вестник Самарского государственного университета, 2005, № 5(39), с. 101–108.
4. К.Н. Афанасьев, А.М. Майорова. Влияние пространственного разрешения фазового элемента на качество формируемого поля // Третий Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. 24–25 ноября 2005 года. Сборник конкурсных докладов, Москва: ФИАН, 2005, с. 7–13.

5. К.Н. Афанасьев. Влияние пространственного разрешения фазового элемента на качество формируемого поля // Демидовские чтения на Урале. Тезисы докладов. 2–3 марта 2006 года, Екатеринбург, Екатеринбург: 2006, с. 65–66.
6. K.N. Afanasiev, S.P. Kotova, A.M. Mayorova, V.G. Volostnikov. Modeling of spiral-type beam generation by the one-dimensional light modulators, SPIE Proc., 2006, v. 6054, Ed. by G. Huber, V.Y. Panchenko, I.A. Scherbakov, p. 60540U.
7. К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов. Формирование световых полей с ненулевым угловым моментом для задач манипуляции микрообъектами // Четвёртый Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. Сборник конкурсных докладов, Москва: ФИАН, 2007, с. 91–99.
8. К.Н. Афанасьев, Е.Н. Воронцов. Формирование массивов вихревых оптических ловушек для манипулирования микрообъектами // Четвёртый Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. Сборник конкурсных докладов, Москва: ФИАН, 2007, с. 174–179.
9. К.Н. Афанасьев, П.Г. Харский. Восстановление фазы спиральных пучков на основе астигматического преобразования // Четвёртый Самарский региональный конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. Сборник конкурсных докладов, Москва: ФИАН, 2007, с. 180–185.
10. Е.Г. Абрамочкин, К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, В.Г. Волостников, Е.В. Разуева. Формирование лазерных полей с ненулевым орбитальным моментом и их применение в задачах манипуляции микрообъектами // Сборник научных трудов, Научная сессия МИФИ-2007, т. 15, Москва: 2007, с. 99–101.
11. К.Н. Афанасьев, Е.Н. Воронцов. Многопучковые вихревые лазерные ловушки // Ученые записки Казанского государственного университета. Физико-математические науки, 2007, т. 149, № 1, с. 8–12.
12. К.Н. Афанасьев, П.Г. Харский. Анализ спиральных пучков на основе астигматического преобразования // Ученые записки Казанского государственного университета. Физико-математические науки, 2007, т. 149, № 1, с. 110–114.
13. K.N. Afanasiev, P.G. Kharsky, S.P. Kotova, N.N. Losevsk, A.M. Mayorova, V.G. Volostnikov. One-dimensional and singular light fields: interconnection and analysis by means of astigmatic transform // ICONO 2007: Coherent

and Nonlinear Optical Phenomena / Ed. by V.N. Belyi, K.N. Drabovich, C. Flytzanis, v. 6729, SPIE, 2007, p. 67291C.

14. K.N. Afanasiev, E.G. Abramochkin, A.V. Korobtsov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, E.V. Razueva, V.G. Volostnikov. Vortical laser tweezers with predetermined intensity structure // Optical Trapping and Optical Micromanipulation IV Ed. by K. Dholakia, G.C. Spalding, v. 6644, SPIE, 2007, p. 664410.
15. К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, Н.Н. Лосевский. Манипуляция микрообъектами при помощи вихревых световых полей // V Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. 21–24 ноября 2007 года. Сборник конкурсных докладов, Самара: Универс групп, 2007, с. 29–36.
16. К.Н. Афанасьев, Е.Н. Воронцов. Массивы лазерных ловушек для деформации вытянутых микрообъектов // V Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. 21–24 ноября 2007 года. Сборник конкурсных докладов, Самара: Универс групп, 2007, с. 94–100.
17. К.Н. Афанасьев, П.Г. Харский. Одномерные и вихревые световые поля: взаимосвязь и восстановление фазы на основе астигматического преобразования // V Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. 21–24 ноября 2007 года. Сборник конкурсных докладов, Самара: Универс групп, 2007, с. 186–193.
18. А.О. Аллин, К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников, С.П. Котова, Е.В. Разуева, А.К. Чернышов. Формирование излучения полупроводниковых лазеров заданной пространственной структуры для задач манипуляции микрообъектами // Сборник трудов Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Звенигород, 27–29 ноября 2007 года), Москва: 2008, с. 126–134.
19. К.Н. Афанасьев, Е.Н. Воронцов, А.М. Майорова, А.В. Коробцов, С.П. Котова, В.Г. Волостников. Манипуляция биологическими микрообъектами оптическими пинцетами различных типов // Альманах клинической медицины. Том XVII. Часть II. III Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» (3–6 июня 2008 года) под общ. ред. В.И. Шумского, Москва: МОНКИИ, 2008, с. 37–40.
20. K.N. Afanas'ev, V.G. Volostnikov. Spiral beams, coherent states and wavelets // Proc. of CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, 2008, p. 8–10.
21. Е.Г. Абрамочкин, К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, В.Г. Волостников, А.М. Майорова, Е.В. Разуева. Формирова-