

На правах рукописи

ЧЕРЕЗОВА ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
И КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ
МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Бельдюгин Игорь Михайлович

доктор технических наук, профессор

Валуев Виктор Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор

Лукин Владимир Петрович

Ведущая организация: **Институт проблем механики Российской Академии наук**

Защита состоится "___" июня 2008 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д.1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "___" _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 501.001.31

кандидат физико-математических наук

Ильинова Т.М.

Актуальность темы. Широкое использование лазеров в современных промышленных технологиях, биологии, медицине, в локационных, информационных, навигационных системах, то есть в различных областях науки и техники, медицины требует оптимизации параметров лазерного излучения для каждой конкретной задачи. Так, например, при использовании CO₂ лазеров в процессе резки металла необходимо добиться возможно более “острой” фокусировки светового пучка на поверхности металла [1]. В процессе термической обработки (закалки) металлов основное требование, предъявляемое к излучению, состоит в равномерном распределении интенсивности по сечению пучка. В этом случае упрочненные зоны металла имеют однородную структуру. Для решения упомянутых и ряда других задач оптимальным является использование супергауссова распределения интенсивности TEM₀₀ моды [2]. Эта мода обеспечивает более однородное распределение энергии поля в ближней зоне и более “острую” форму распределения интенсивности в дальней зоне по сравнению с гауссовой TEM₀₀ модой.

При решении других задач современной технологии, например, задач коммуникации или задач захвата и вращения микрообъектов, удобным является использование лазерных пучков с винтовыми дислокациями волнового фронта [3], которые представляют собой области циркулярного движения потока энергии в электромагнитной волне. Типичным примером оптического вихря является «бубликообразная» мода Лагерра-Гаусса LG₀¹ лазерного резонатора. Такие пучки обладают свойством самовосстановления, кроме того, весьма удобным является наличие у вихревого пучка еще одного параметра, способного переносить информацию – направления закрутки винтовой дислокации.

В последнее время для решения задач переноса энергии, создания управляемых лазерных пинцетов значительное внимание привлекли новые типы решений волнового уравнения для свободного пространства, которые отличаются от традиционных плоских волн или классических гауссовых пучков. Одним из таких решений является параксиальный пучок с бесселевым распределением амплитуды [4], описывающий недифрагирующее световое поле, имеющее одинаковое распределение интенсивности в любой плоскости перпендикулярной оси распространения. Однако излучение с бесселевым распределением амплитуды, так же как и плоская волна, является физически нереализуемым, поскольку оно переносит бесконечную энергию. Поэтому интересным с практической точки зрения и физически реализуемым является пучок с бессель-гауссовым профилем амплитуды.

При решении некоторых других современных задач лазерной физики и нелинейной оптики возникает необходимость формирования других заданных профилей пучка. Так, например, при транспортировке мощного светового излучения на протяженных атмосферных трассах энергетически более выгодными являются кольцевые пучки [5]. Подобные пучки оказываются также близкими к оптимальным в ряде задач лазерной химии [6].

Задача формирования излучения тесно связана с задачей коррекции aberrаций: при наличии aberrаций в передающей и формирующей оптике невозможно осуществить процесс формирования заданных параметров излучения. Более того, сам процесс формирования параметров излучения фазовыми элементами можно рассматривать как внесение заданных aberrаций в распределение фазы пучков, которые на дифракционной длине переходят в модуляцию интенсивности.

Коррекция aberrаций лазерного излучения актуальна не только в лазерной физике и технологии. Например, в офтальмологии, получение высококачественного разрешения изображения сетчатки невозможно без коррекции оптических aberrаций глаза пациента. Поэтому современные фундус-камеры снабжаются адаптивными оптическими системами, которые компенсируют aberrации глаза. Однако, даже в случае использования идеального корректора, который полностью компенсирует фазовые искажения вдоль одного направления, улучшение разрешающей способности фундус-камеры возможно лишь внутри ограниченной области, так называемой зоны изопланатизма. Это связано с тем, что aberrации, приобретаемые световым пучком, распространяющимся вдоль оси коррекции и вне ее, могут существенно различаться, поэтому фазовая коррекция с использованием одного управляемого элемента улучшает разрешение лишь небольшого участка глазного дна, соответствующего зоне изопланатизма. В тоже время для полноценной диагностики необходимо получать высокое разрешение в возможно большем угле зрения. В этой связи встает задача разработки методик коррекции осевых и внеосевых aberrаций.

Задачу формирования заданных параметров и коррекции aberrаций лазерного излучения можно решать различными способами, например, с применением амплитудных масок, голографических и дифракционных элементов и т.д. Однако все перечисленные методы зависят от конкретных параметров пучка и при наличии в оптической системе шумов, aberrаций, эффективность таких методов значительно падает. Поэтому использование гибких зеркал, параметры которых можно подстраивать под изменившиеся условия эксперимента, является, с этой точки зрения, наиболее универсальным. Использованию таких зеркал для формирования заданных распределений полей и коррекции aberrаций, в основном, и посвящена данная диссертационная работа.

Таким образом, целью диссертационной работы является разработка методологии формирования заданных пространственных распределений одномодового и многомодового по поперечным индексам излучения в любой выбранной плоскости и коррекции как осевых, так и внеосевых aberrаций световых полей методами адаптивной оптики.

Для этого решались следующие задачи:

1. Разработка и исследование на эффективность методики внутрирезонаторного управления гибкими зеркалами такими параметрами лазерного излучения, как фокусировка, распределение

интенсивности в заданной плоскости, интегральная мощность, пиковая интенсивность в дальнем поле и т.д.

2. Разработка и исследование на эффективность методики внрезонаторного формирования заданных распределений интенсивности одномодового и многомодового по поперечным индексам лазерного излучения управляемыми фазовыми элементами.
3. Разработка и исследование на эффективность методики коррекции управляемыми гибкими зеркалами осевых и внеосевых фазовых искажений, приобретаемых лазерным излучением при отражении или прохождении «живой» (оптика глаза) и «неживой» (оптические элементы) абберационной среды.

Научная новизна результатов

1. Впервые разработана методика расчета формирования заданных параметров лазерного излучения в любой выбранной плоскости вне резонатора внутрирезонаторным гибким зеркалом. Методика представляет собой сочетание гибридного алгоритма управления корректором с итерационным алгоритмом Фокса-Ли расчета распределения поля в лазере. Эффективность методики продемонстрирована экспериментально на примере управления фокусировкой многомодового по поперечным индексам непрерывного твердотельного АИГ лазера с диодной накачкой, а также численно на примере управления выходной мощностью, пиковой интенсивностью в дальнем поле, формой распределения интенсивности низшей поперечной моды как в ближнем, так и в дальнем поле гелий-неонового и твердотельного АИГ лазеров.
2. Разработана, численно исследована и экспериментально реализована оригинальная методика внрезонаторного управления параметрами лазерного излучения с помощью гибких биморфных зеркал, сочетающая в себе генетический алгоритм с алгоритмом покоординатного спуска. Эффективность методики продемонстрирована экспериментально на примере улучшения M2-параметра излучения диодного лазера в 3 раза и непрерывного АИГ:Nd лазера, работающего по схеме генератор-усилитель более, чем в два раза; на примере экспериментального формирования в дальней зоне из гауссовой супергауссовой формы распределения интенсивности низшей поперечной моды излучения диодного лазера, а также численно на примере формирования в дальней зоне супергауссовых распределений интенсивности из многомодового по поперечным индексам излучения CO₂-лазера.
3. Впервые улучшать качество формирования параметров и коррекции aberrаций лазерного излучения возможно с помощью использования оригинальной итерационной процедуры расчета оптимальной сетки электродов гибкого биморфного зеркала. Такая процедура позволяет

рассчитать сетку электродов непосредственно из требуемого распределения фазы отраженного от него лазерного пучка. Процедура апробирована экспериментально для расчета сетки электродов и изготовления корректора, воспроизводящего вихревой волновой фронт лазерного пучка.

4. Впервые экспериментально получено формирование вихревых лазерных полей с разрывом поверхности волнового фронта от одной до 32 длин волн с помощью электрически управляемых фазовых корректоров, вносящих непрерывную или разрывную фазовую задержку в лазерный пучок.
5. Предложена оригинальная методика юстировки оптических элементов сложной формы по минимуму параметра качества M^2 отраженного или прошедшего через оптический элемент лазерного пучка. Методика апробирована экспериментально на примере юстировки внеосевых параболических зеркал с фокусными расстояниями 150 мм и 50 мм, апертурой 50 мм и 20 мм соответственно.
6. Впервые рассчитан угол изопланатизма человеческого глаза на основе экспериментальных измерений внеосевых aberrаций точечного лазерного источника, сформированного на сетчатке. Впервые показано, что уменьшение зоны изопланатизма реального человеческого глаза по сравнению с моделью идеального глаза Гульстранда-Наварро обусловлено, главным образом, разъюстировкой оптических элементов глаза.
7. Впервые предложены модели глаз, воспроизводящие как статические, так и динамические свойства aberrаций реальных человеческих глаз. Статические модели глаз отличаются от традиционной модели Гульстранда-Наварро значениями смещений, углов поворота оптических элементов, смещением зрачка, кривизной поверхности элементов и объясняют поведение осевых и внеосевых aberrаций человеческого глаза.
8. Методика расширения зоны изопланатизма впервые применена для коррекции осевых и внеосевых aberrаций человеческого глаза и впервые показано, что с применением такой методики можно увеличить зону высококачественного изображения сетчатки в два раза. Впервые предложено для расширения зоны дифракционно-ограниченного разрешения изображения сетчатки использовать методику, основывающуюся на нейтрализации рефракции передней поверхности роговицы с помощью иммерсионной жидкости и не требующую использования дополнительных корректоров и датчиков волнового фронта.

Практическая ценность работы

1. Предложенная методика управления параметрами излучения внутрирезонаторным гибким зеркалом на основе гибридного алгоритма позволяет эффективно управлять фокусировкой, мощностью, пиковой

интенсивностью и формой распределения поля лазерного излучения на обрабатываемой детали.

2. Предложенная методика внрезонаторного гибридного алгоритма управления биморфным корректором может эффективно использоваться для коррекции aberrаций и для формирования заданных распределений интенсивности одномодового и многомодового по поперечным индексам излучения лазера в заданной плоскости.
3. Разработанный M^2 -датчик может служить для оценки основных параметров световых пучков, а также для определения кратковременной и долговременной стабильности параметров излучения с точностью не хуже 3-5%.
4. Юстировка оптических элементов по минимизации M^2 -параметра позволяет съюстировать сложные оптические элементы без использования дополнительных юстировочных узлов.
5. Предложенный алгоритм расчета формы и расположения электродов биморфного зеркала позволяет повысить качество формирования и коррекции лазерного излучения такими зеркалами.
6. Уточненный алгоритм Шака-Гартмана с учетом неравномерности распределения интенсивности по сечению пучка может быть использован для повышения точности измерения aberrаций.
7. Смоделированные персонализированные модели человеческих глаз могут быть использованы для отработки на таких моделях методик коррекции зрения пациентов.
8. Предложенный генератор осевых aberrаций человеческого глаза на основе гибкого биморфного зеркала может быть использован для тестирования и калибровки офтальмологических приборов, а также элементов, корректирующих зрение, таких, как очки, контактные и интраокулярные линзы, а также изучения динамических свойств глаза и анализа роли флуктуаций aberrаций в формировании изображения на сетчатке глаза.
9. Методы расширения зоны высокого пространственного разрешения сетчатки могут быть применены при создании нового поколения фундус-камер, оборудованных адаптивной оптикой. Метод с использованием коррекции внешней поверхности роговицы иммерсионной жидкостью позволяет не только получить расширение зоны высокого пространственного разрешения, но и значительно снизить стоимость таких фундус-камер, так как не требует использования дополнительных опорных источников, корректоров и датчиков Гартмана по сравнению с традиционной компоновкой адаптивной оптической системы.
10. Генерация и компенсация вихревых пучков управляемыми фазовыми элементами позволяет формировать такие пучки для систем лазерной

коммуникации, а также компенсировать их негативное влияние в задачах атмосферной оптики.

Защищаемые положения:

1. Гибридный алгоритм управления гибким фазовым корректором является эффективным средством оптимизации параметров лазерного излучения в адаптивных системах внутри и вне резонаторной коррекции и позволяет управлять фокусировкой, корректировать aberrации и формировать заданные распределения интенсивности лазерного излучения в любой выбранной плоскости.
2. Методика расчета сетки электродов гибкого биморфного зеркала, представляющая собой итерационную процедуру определения положения управляющих электродов по требуемому распределению фазы отраженного от него лазерного пучка, позволяет рассчитать оптимальное расположение электродов и может быть использована для повышения качества формирования и коррекции лазерного излучения такими зеркалами.
3. Формирование вихревых пучков возможно фазовыми элементами, воспроизводящими непрерывное или разрывное распределение управляющей фазы. Модальный гибкий биморфный корректор со специально рассчитанной сеткой электродов позволяет сформировать вихревой пучок в дальнем поле. Управляемый нематический жидкокристаллический транспарант позволяет сформировать вихревые пучки с различным порядком дислокации.
4. Минимальное значение M^2 -параметра лазерного пучка, прошедшего или отраженного от оптического элемента, соответствует сфокусированному положению этого элемента. Юстировку внеосевых параболических зеркал можно осуществлять по минимуму параметра M^2 лазерного пучка, отраженного от поверхности таких зеркал.
5. Разработанные модели оптической системы глаза позволяют воспроизвести характер поведения aberrаций глаза и отработать методику расширения угла эффективной коррекции. Модель глаза на основе динамически управляемого 18-ти электродного полупассивного биморфного зеркала с центрально-симметричной структурой расположения электродов воспроизводит осевые aberrации глаза и их изменения во времени. Статическая модель глаза, отличающаяся от традиционной модели Гульстранда-Наварро значениями смещений, углов поворота оптических элементов, кривизной их поверхности, воспроизводит характер поведения осевых и внеосевых aberrаций человеческого глаза. Применение гибкого корректора и иммерсионной системы для статических моделей позволяет расширить угол эффективной коррекции без ухудшения качества коррекции по оси.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях: «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург 2000, 2003, 2006), «Лазерные технологии ILLA» (Владимир-Суздаль 2001), Int. School of Quantum Electronics on Laser Beam and Optics Characterization V (Sicily, Italy 2000), «Международный симпозиум по оптике атмосферы и океана» (Томск, 2003, 2004), «Photonics West» (Сан-Хосе, США 1999, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008), «Remote Sensing Europe» (Canary Island, 2004), «CAOL, 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers», (Ялта, Украина 2005), CLEO/EUROPE (1998 Глазго, Великобритания; 2000 Ницца, Франция; 2003, 2005, 2007 Мюнхен, Германия), «Laser Beam Shaping (Seattle, USA 2002, San Diego, USA 2003, 2005), «European Conference on Biomedical Optics» (Munich, Germany 2005), «OSA Annual Meeting» (San-Diego, USA, 2005), «Оптика – XXI век» (Москва, 2005), «International Conference on Optics and Optoelectronics» (Dehradun, India, 2005), «International Conference on High Power Laser Beams (HPLB)» (Нижний Новгород 2006), «Photonics North» (Montreal, Canada 2006), «8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling» (Харьков, Украина 2006), «Workshop on Optical Technologies in Biophysics & Medicine VIII» (Саратов, 2006), «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, Беларусь 2006), «International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers and High-Power Lasers» (Florence, Italy 2000; Gmunden, Austria, 2006), «International Workshop on Adaptive Optics on Industry and Medicine» (Дурам, Великобритания 1999; Альбукерке, США 2001; Пекин, Китай 2005; Галвей, Ирландия 2007), «Лазерные биомедицинские технологии» (Санкт-Петербург 2007) и т.д. Результаты работы докладывались на научных семинарах US AFRL (1999, 2001, 2005, Альбукерке, США), университете Нью-Мексико (2001, Альбукерке, США), в национальном университете Галвей (2006, Ирландия), на семинарах кафедры общей физики и волновых процессов в МГУ в 2006, 2007 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы более, чем в 90 научных трудах и двух монографиях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ для публикации научных результатов диссертации. Список основных трудов находится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы, заключения и пяти приложений. Общий объем работы – 327 страниц, включая 198 рисунков, 41 таблицу. Библиография содержит 358 наименований.

Личный вклад

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или в соавторстве при непосредственном его участии, либо под его непосредственным руководством.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, отмечается ее научная новизна и практическая ценность, формулируются защищаемые положения.

В первой главе рассматриваются известные в литературе методы решения задачи коррекции аберраций и формирования заданных распределений световых полей. Приведена классификация таких методов: во-первых, по выбору оптических элементов или оптических систем, осуществляющих коррекцию или формирование, а во-вторых, по реализации алгоритма восстановления фазы, которую выбранная оптическая система задает исходной световой волне.

При рассмотрении классификации по выбору оптических элементов выделяются методы формирования и коррекции, основанные на голографических фильтрах, дифракционных и рефрактивных оптических элементах, и, наконец, системы, основным элементом которых являются разные типы зеркал: ОВФ-зеркала, асферические, с неравномерным коэффициентом отражения и гибкие зеркала. Показано, что использование гибких зеркал имеет по сравнению с другими методами явные преимущества в тех случаях, когда в оптической системе присутствуют изменения или флуктуации условий освещенности, возникают дополнительные аберрации излучения и т.п. Гибкие зеркала классифицируются по типам их функций отклика. Зеркала, деформация поверхности которых происходит в локальной области вблизи данного привода, называются корректорами с локальной функцией отклика. К ним относятся сегментированные, мембранные, а также монолитные пьезозеркала. Их достоинство состоит, в основном, в простоте расчета функций отклика и необходимого управляющего напряжения для аппроксимации требуемой поверхности. Недостатком является резкий скачок поверхности на границе сегментов, что приводит к ухудшению качества отраженного пучка. Поэтому предпочтительным является использование модальных корректоров, т.е. корректоров, вся поверхность которых деформируется при подаче управляющего напряжения на любой электрод, например, гибких биморфных зеркал.

Во второй главе анализируется вопрос управления фокусировкой лазерного излучения при помощи гибких биморфных зеркал. В начале главы вводится понятие M^2 -фактора, как параметра, с помощью которого можно правильно оценивать степень фокусировки пучка по сравнению с гауссовым:

$$M_x^2 = \frac{\pi d_{0x} d_{fx}}{4 \lambda f}, \quad M_y^2 = \frac{\pi d_{0y} d_{fy}}{4 \lambda f}, \text{ где } d_{0x}, d_{0y} - \text{ диаметры перетяжки пучка в}$$

ближней зоне, d_{fx}, d_{fy} - диаметр пучка в фокусе линзы f , λ - длина волны излучения. Далее рассматривается методика определения и измерения параметров пучка, в частности M^2 -фактора, согласно международному стандарту ISO11146. Для этого необходимо провести серию измерений пучка до и после перетяжки, образованной фокусирующей линзой. Диаметр пучка вдоль оси распространения аппроксимируется формулой $d^2 = A + Bz + Cz^2$, а M^2 -фактор находится из коэффициентов аппроксимации: $M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{AC - B^2/4}$. В

главе обсуждаются альтернативные методы измерений параметров пучка, такие, как метод варьруемой диафрагмы, метод движущегося острого лезвия ножа и метод движущейся щели. Для каждого из упомянутых методов обсуждаются границы применимости, достоинства и недостатки. На основании приведённого обзора делается вывод, что наиболее удобным и простым в реализации способом измерения параметров лазерного пучка является методика, основанная на вычислении моментов распределения интенсивности лазерного излучения. Поэтому такая методика реализуется в диссертационной работе при разработке M^2 -датчика для определения степени фокусировки пучка и других основных параметров лазерного излучения. Конструкция датчика изображена на рис.1. В главе подробно обсуждается принцип работы датчика, рассматриваются основные факторы, влияющие на точность измерений, а именно:

- ✓ дискретизация изображения по координатам и уровню яркости;
- ✓ размер и положение площадки интегрирования при определении вторых моментов интенсивности;
- ✓ фоновый шум ПЗС-камеры;
- ✓ ограниченная точность определения положения ПЗС-камеры;
- ✓ флуктуации интенсивности лазера (нестабильность интенсивности излучения лазера).

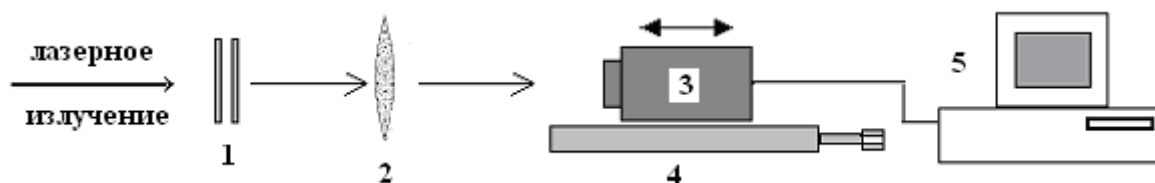


Рис. 1. Конструкция M^2 -датчика: 1 – ослабляющие фильтры, 2 – собирающая линза, 3 – детектирующая система, 4 – транслятор, 5 – компьютер.

Показано, что общая погрешность измерений M^2 -параметра для разработанного датчика колеблется в пределах 3-5%.

Для управления фокусировкой излучения, так и в других задачах оптимизации параметров излучения, в диссертации предлагается использовать

гибридный алгоритм управления гибким корректором. Такой алгоритм представляет собой использование на начальном этапе генетического алгоритма, а после того, как найдена окрестность глобального максимума – использование более быстрого по сходимости алгоритма покоординатного спуска. В главе 2 приводится подробное описание данного алгоритма, на тестовой задаче управления фокусировкой излучения исследуется его эффективность по сравнению с генетическим алгоритмом и алгоритмом покоординатного спуска. Показано, что эффективность гибридного метода не уступает с результатами метода покоординатного спуска, однако в случае неоптимального начального приближения метод покоординатного спуска дает неудовлетворительные результаты, в то же время, как гибридный алгоритм не зависит от выбора начального приближения.

Далее в главе рассматривается управление фокусировкой лазерного излучения непрерывного твердотельного керамического АИГ лазера с диодной накачкой. Было проведена серия экспериментов, в которых лазер был построен по следующим схемам:

1. генератор-усилитель;
2. генератор.

В первом случае (генератор-усилитель) гибкое зеркало играло роль внерезонаторного корректора. Корректировалось излучение мощностью 100 Вт. Применение гибридного алгоритма позволило улучшить параметр качества излучения с $M_x^2=5,1$, $M_y^2=6,5$ до $M_x^2=2,6$, $M_y^2=2,9$. Изначальный параметр качества генератора равнялся $M_x^2=1,6$, $M_y^2=1,7$. Во втором случае (генератор) гибкий корректор играл роль глухого зеркала резонатора. Выходная мощность излучения в данном эксперименте составляла более 500 Вт при $M^2=56$. Применение гибридного алгоритма управления адаптивным зеркалом в данном случае позволило улучшить M^2 на 10% с 56 до 50 без потерь мощности. Улучшить фокусировку в терминах M^2 -параметра можно было в 1.6 раз (до 35) при 30% потере мощности (до 350 Вт).

В **третьей главе** рассмотрен вопрос фокусировки излучения в заданную область пространства или, иными словами, формирование заданных распределений интенсивности световых полей. В начале главы задача решается с помощью использования двумерной модели алгоритма Гершберга-Сакстона. Рассмотрено несколько численных примеров формирования из гауссова пучка супергауссова 3-го и 6-го порядка с помощью гибкого 18-ти электродного биморфного корректора. Для оценки сходимости алгоритма, по аналогии M^2 -параметром пучка, введен параметр $\beta = \pi \frac{\omega \cdot \omega'}{\lambda f}$, где ω - характерный размер пучка, на котором интенсивность начального пучка падает в e раз, ω' - характерный размер пучка, который требуется сформировать в выходной плоскости, f - фокальная длина линзы, расположенная между входной плоскостью и плоскостью регистрации (плоскость регистрации совпадает с фокальной плоскостью). Численное решение задачи формирования заданных распределений интенсивности в терминах параметра β значительно упрощается из-за свойства «эквивалентности» данного параметра: две оптические системы

являются эквивалентными, если они характеризуются одинаковыми значениями параметра β . Например, для формирования супергауссовых пучков 3-го и 6-го порядков высокая точность формирования, соответствующая среднеквадратичному отклонению рассчитанной интенсивности от заданной менее 10%, достигается в области изменений параметра $1.23 \leq \beta \leq 4.45$. При значениях параметра $0.70 \leq \beta \leq 1.23$ наблюдается довольно медленная сходимость алгоритма, точность формирования при этом превышает 10%. При величине $\beta \leq 0.70$ решение задачи формирования не существует ввиду невозможности фокусировки излучения в область, меньшую дифракционно-ограниченной для данного пучка.

Далее в главе методика двумерного преобразования Гершберга-Сакстона реализуется на примере экспериментального формирования заданных распределений интенсивности с помощью управляемого фазового элемента. Используется нематический жидкокристаллический (ЖК) электрически управляемый модулятор Holoeye-SLM-LC-2002 (рис. 2), который представляет собой фазовый оптический элемент, способный изменять волновой фронт проходящего через него лазерного излучения. На рис.3 изображена схема экспериментальной установки по формированию заданных пространственных распределений полей. Распределения комплексной амплитуды поля в плоскости модулятора (плоскость А) и на матрице ПЗС камеры (плоскость Б) связаны преобразованием Фурье. Результаты формирования показаны на рис.4. В случае рис.4(г) заданное распределение интенсивности менялось динамически с частотой 10 Гц. С помощью ЖК модулятора, воспроизводящего частоты до 60 Гц, можно формировать в реальном времени динамически изменяющиеся заданные распределения интенсивности. Экспериментальное формирование распределений интенсивности с помощью ЖК модулятора продемонстрировало возможность формировать сложные распределения интенсивности, имеющие широкий пространственный спектр.

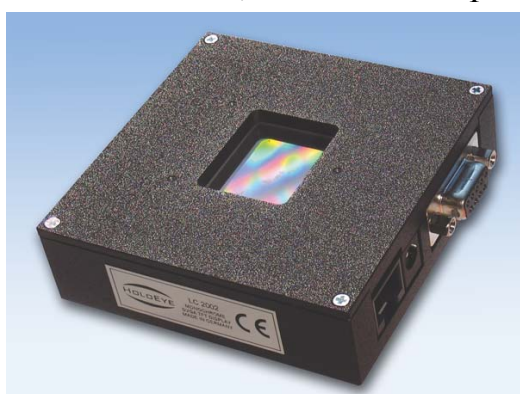


Рис 2. Жидкокристаллический модулятор Holoeye SLM LC 2002.

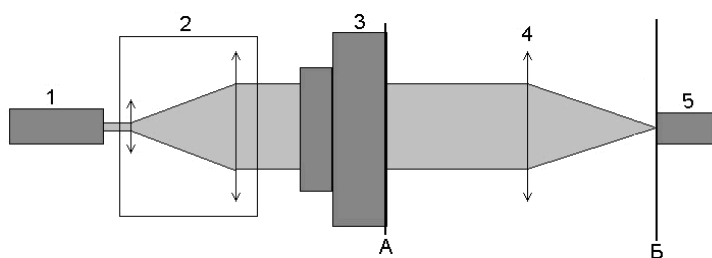


Рис 3. Схема экспериментальной установки для формирования заданных распределений интенсивности. 1 – диодный лазер, 2 – расширяющий телескоп 10х, 3 – ЖК модулятор, 4 – линза с фокусным расстоянием 350 мм, 5 – ПЗС-камера.

Однако, алгоритм Гершберга-Сакстона неприменим для формирования многомодового по поперечным индексам излучения, поскольку восстановленная фаза может оказаться различной для разных мод. Поэтому для

формирования такого излучения предлагается использовать гибридный алгоритм управления внерезонаторным гибким биморфным корректором. В работе численно рассчитывается формирование супергауссова распределения интенсивности в дальней зоне $I = \exp\left\{\left(\frac{r}{0,4}\right)^8\right\}$ излучения, состоящего из комбинации четырех мод, дающих соответствующий вклад в общую суммарную мощность: TEM_{00} : 17%, TEM_{01} (кольцевая): 35%, TEM_{02} (кольцевая): 34%, TEM_{10} : 14%. В этом же параграфе продемонстрирована экспериментальная реализация гибридного алгоритма для внерезонаторного формирования из гауссова пучка супергауссова порядка 4.3 (по оси x) и 4.1 (по оси y) в дальней зоне (рис. 5). Среднеквадратичная ошибка формирования равнялась 5.7%.

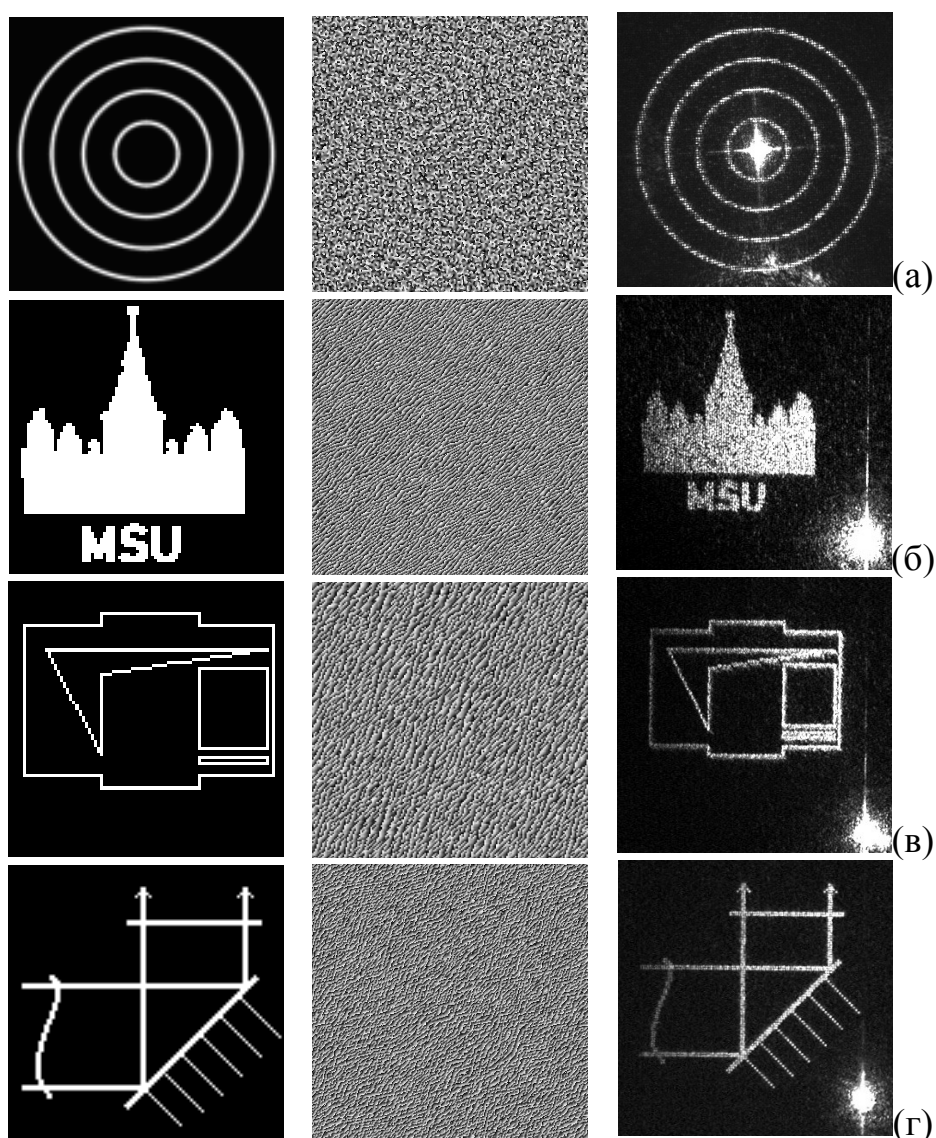


Рис. 4. Заданные распределения интенсивности (левая колонка), рассчитанные двумерные распределения фазы (средняя колонка) и экспериментально полученные распределения интенсивности (правая колонка).

Далее в главе 3 приводятся результаты исследований формирования вихревых пучков. Как видно из обзора, сделанного в начале §3.1.3, на настоящее время не известны работы, в которых винтовую дислокацию волнового фронта можно было бы сформировать с помощью корректора, имеющего непрерывный профиль поверхности (корректора с модальными функциями отклика). Для решения такой задачи в работе предлагается оригинальная методика расчета функций отклика биморфного корректора, способного воспроизвести пучок с вихревым волновым фронтом с минимально возможной ошибкой. Методика предлагается, в виде итерационной процедуры

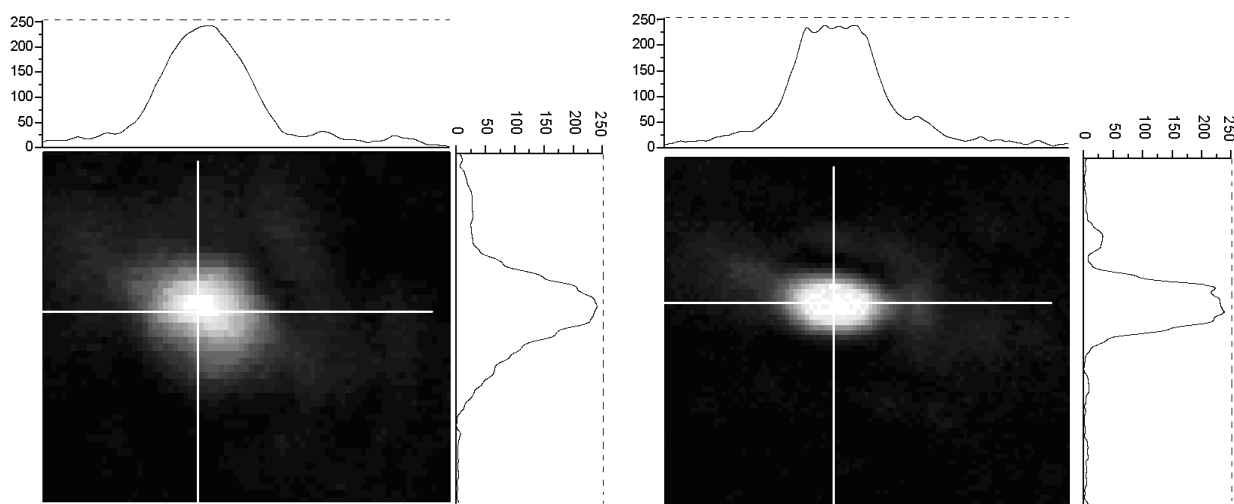


Рис. 5. Начальный пучок гелий-неонового лазера в фокальной плоскости (слева) и экспериментально полученный профиль интенсивности при формировании пучка с прямоугольным распределением интенсивности (права).

определения положения управляющих электродов по требуемой деформации зеркала. Для реализации методики в работе делается упрощение уравнения, связывающего электрическое поле в пьезокерамике $E(r, \varphi)$ с деформацией W зеркала в статическом случае, и доказывается, что электрическое поле можно представить в виде: $E(r, \varphi) = \alpha \nabla^2 W + \beta$, где α и β - коэффициенты, определяемые параметрами пьезокерамики. Это уравнение лежит в основе предлагаемого в диссертации оригинального алгоритма расчета сетки электродов, состоящего из последовательного выполнения следующих шагов:

1. задается требуемый профиль фазы светового пучка;
2. вычисляется требуемый профиль поверхности зеркала (равный половине профиля фазы светового пучка);
3. находится вторая производная от профиля деформации зеркала, которая по сделанным выводам из уравнения деформации соответствует действующему в пьезокерамике электрическому полю;
4. делается первое приближение расположения электродов по аппроксимации ступенчатой зависимостью функции, полученной на шаге 3. Критерием правильности найденного положения электрода служит совпадение требуемой и расчетной деформации, которая рассчитывается на шаге 5;

5. решается прямая задача определения деформации по найденному на шаге 4 положению электродов и напряжению на них. Данная задача решается вариационным методом конечных элементов;
6. алгоритм завершается, в том случае, если достигнута требуемая точность. В противном случае, положение электрода варьируется относительно найденного (например, градиентным методом или методом покоординатного спуска), после чего алгоритм повторяется с шага 4, то есть при каждой вариации положения электрода рассчитывается деформация и сравнивается с заданной. При этом использование шага 3 гарантирует попадание в окрестность расположения глобального экстремума, поэтому использование методики поиска локального экстремума позволяет приблизиться к точному решению с наперед заданной точностью.

В соответствии с предложенной методикой была рассчитана схема электродов биморфного зеркала для формирования вихревого пучка, представленная на рис.6(а). Такой корректор был изготовлен (рис.6(б),(в)). Расчетная ошибка аппроксимации поверхностью зеркала вихревого профиля фазы составляет 8.25% RMS (рис.6(г)).

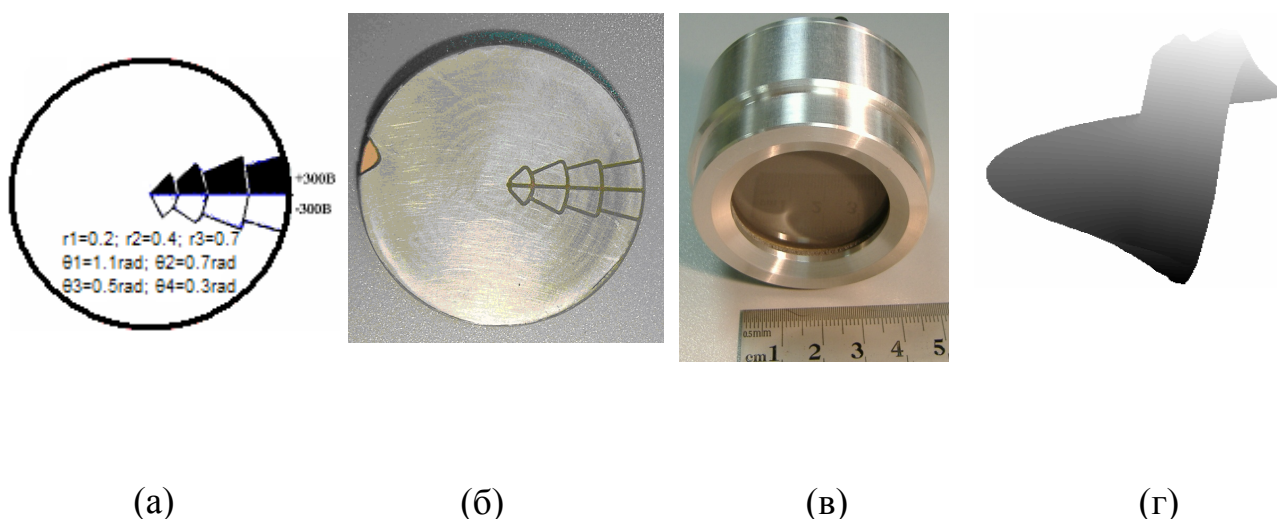


Рис. 6. (а) – расчетная схема расположения электродов гибкого биморфного корректора для формирования вихревого пучка, (б) – электроды изготовленного корректора, (в) – фотография гибкого корректора, (г)– профиль поверхности корректора при формировании вихревого пучка.

В главе проведены результаты экспериментальных исследований формирования и компенсации вихревых пучков. Для этого была собрана экспериментальная установка, представляющая собой интерферометр Майкельсона, в одно из плеч которого вставлялся биморфный корректор. В плоскости визуализации помещалась собирающая линза, в фокальной плоскости которой располагалась ПЗС камера (расположенная в дальнем поле по отношению к гибкому корректору). Для наблюдения фокального пятна с помощью 60-кратного объектива строилось увеличенное его изображение на поверхности окна ПЗС камеры. На рис. 7 показаны интерференционные картины, полученные в отсутствие и наличии управляющих напряжений ± 300 В

на электродах корректора. Видно, что при подаче управляющих напряжений на электроды зеркала возникает двоение черной полосы, что свидетельствует об образовании винтовой дислокации волнового фронта.

Далее в главе осуществляется формирование винтовой дислокации разных порядков при помощи ЖК модулятора. Сформированные жидкокристаллическим модулятором интерференционные картины исследовались в коллимированных и расходящихся пучках. В этом случае ЖК модулятор помещался в одно из плеч интерферометра Майкельсона. На рис. 8 показаны сигналы, подаваемые на жидкокристаллический модулятор и соответствующие им интерференционные картины для случаев формирования

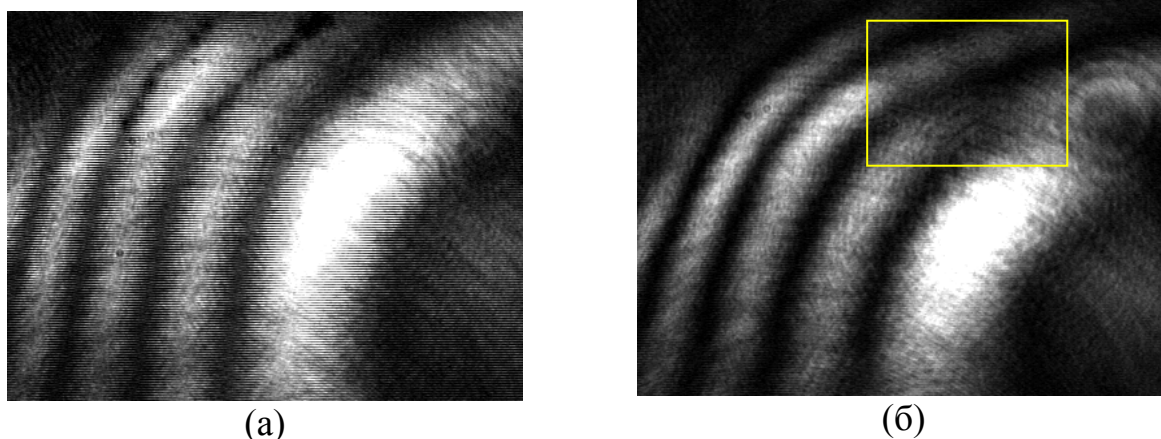


Рис. 7. Интерференционные картины в отсутствии (а) и при подаче (б) напряжений ± 300 В на управляющие электроды зеркала.

лазерных пучков с винтовой дислокацией волнового фронта нулевого (нет винтовой дислокации) (а), первого (б), четвертого (в), двенадцатого(г) и тридцать второго порядка (д) в случае расходящихся пучков. Видно, что в случае наличия винтовой дислокации интерференционная картина образуется в виде раскручивающейся спирали в случае оптического вихря первого порядка, в виде двух раскручивающихся спиралей в случае оптического вихря второго порядка и т. д.

Далее в главе приведены экспериментальные результаты, говорящие об эффективности использования ЖК модулятора для компенсации вихревых пучков, созданных спиральной фазовой пластинкой.

Однако внрезонаторные способы формирования заданных параметров пучка не позволяют воздействовать на мощность излучения, селективность мод, более того, в случае управления фокусировкой излучения применение внрезонаторных корректоров обычно сводится к компенсации aberrаций излучения. При использовании внутррезонаторного управления фокусировкой возможно не только компенсировать aberrации, но и возбуждать моды, имеющие меньшую расходимость излучения. Поэтому далее в главе рассматривается внутррезонаторное формирование заданных распределений световых полей. Вначале рассматривается методика расчета формирования заданных распределений интенсивности на выходном зеркале резонатора внутррезонаторным гибким корректором, играющим роль глухого зеркала

резонатора лазера. Данная методика основывается на методе фазового сопряжения и состоит из следующих этапов:

- 1) на выходном, пассивном зеркале резонатора задается требуемое распределение поля $U(r_1)$;
- 2) рассчитывается распространение заданного поля через все элементы резонатора до гибкого зеркала. Для расчета используются интегралы Френеля-Кирхгофа:

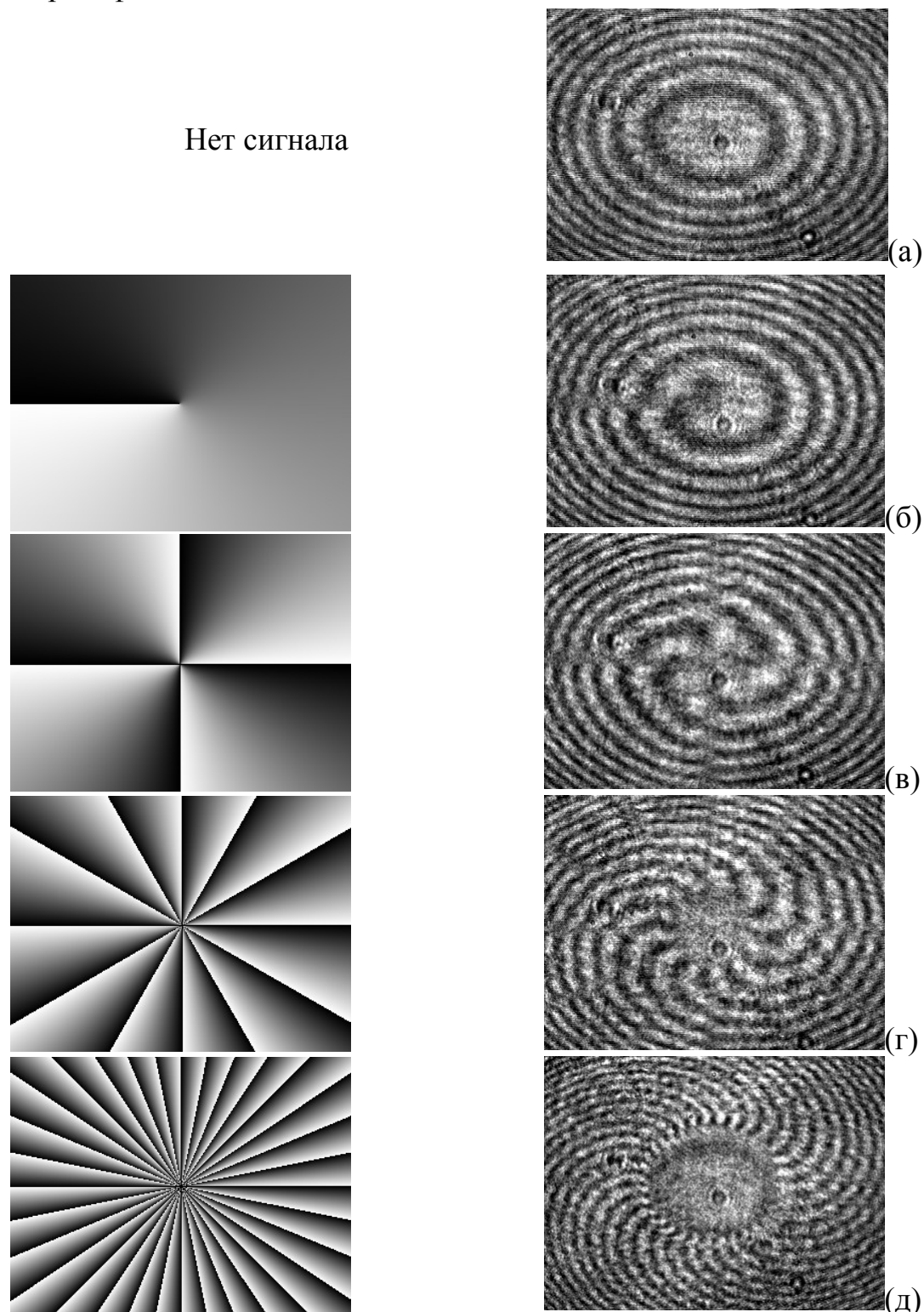


Рис. 8. (а)-(д) видеосигнал, подаваемый на сигналы на ЖК модулятор (слева) и соответствующие интерференционные картины (справа).

$$\begin{cases} \alpha_1 U_1(r_1) = \int_0^{a_2} K(r_1, r_2) U_2(r_2) A[|U_2(r_2)|^2] r_2 dr_2; \\ \alpha_2 U_2(r_2) = \int_0^{a_1} K(r_2, r_1) U_1(r_1) A[|U_1(r_1)|^2] e^{i2\varphi_3(r_1)} r_1 dr_1. \end{cases} \quad (1)$$

где $U_1(r_1)$ и $U_2(r_2)$ - распределение комплексной амплитуды светового поля на глухом и выходном зеркале соответственно, α_1 и α_2 - собственные значения интегральных уравнений, $\varphi_3(r_1)$ - фаза, задаваемая профилем поверхности зеркала, $A[|U(r)|^2] = 1 + \frac{\alpha_0 d}{2(1+|U(r)|^2)}$ - функция, учитывающая насыщение поля, здесь

$\alpha_0 d$ - коэффициент ненасыщенного усиления, $K(r_1, r_2)$ - ядро преобразования для моды l -го порядка, определяемое по формуле:

$$K(r_1, r_2) = \frac{2\pi i}{\lambda B} \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda B} (Ar_1^2 + Dr_2^2)\right] J_l\left(\frac{2\pi r_1 r_2}{\lambda B}\right) \exp\left(-\frac{2i\pi L}{\lambda}\right)$$

A, B, D - элементы лучевой $ABCD$ матрицы резонатора, λ - длина волны излучения, J_l - функция Бесселя l -го порядка, L - оптическая длина резонатора.

3) По рассчитанному полю $U(r_2)$ в месте расположения гибкого корректора вычисляется форма волнового фронта пучка, которая воспроизводится поверхностью зеркала с некоторой ошибкой. Далее проводится минимизация среднеквадратичной ошибки путем комбинации с различными весовыми коэффициентами экспериментально измеренных функций отклика используемого образца корректора. Таким образом, вычисляются напряжения, которые необходимо приложить к электродам гибкого зеркала для воспроизведения требуемого профиля фазы.

4) Установившееся распределение интенсивности рассчитывается итерационным методом Фокса-Ли, использующим уравнения (1). Это позволяет учитывать не только краевую дифракцию, но и неидеальное воспроизведение формы волнового фронта лазерного пучка гибким зеркалом.

Данная методика была применена для расчета возможности формирования супергауссовых распределений интенсивности низшей поперечной моды телескопического резонатора YAG:Nd^{3+} лазера внутрирезонаторным гибким зеркалом. Рассмотрены случаи формирования супергауссовой низшей поперечной моды 4, 6, 8 порядков из гауссовой моды.

Однако такая методика применима только для формирования в ближнем поле и только к одномодовому по поперечным индексам случаю. В то же время большинство лазерных приложений требуют как формирования профилей интенсивности в дальней зоне, так и возможности управления многомодовым излучением. Поэтому в диссертации предлагается оригинальная методика расчета формирования внутрирезонаторным корректором заданных характеристик лазерного излучения в любой плоскости, в том числе и в дальней зоне. Методика основана на использовании внутрирезонаторного гибридного алгоритма и состоит из следующих этапов:

1) Сначала выбирается оптимизируемая величина. В случае формирования заданных распределений полей это может быть величина, обратная среднеквадратичному отклонению полученного профиля амплитуды поля от

профиля амплитуды заданного светового поля, пиковая интенсивность пучка в дальнем поле, общая интегральная мощность и т.д.

2) Гибридным алгоритмом «разыгрывается» комбинация напряжений, подаваемых на гибкое зеркало. Вычисляется профиль поверхности зеркала: $\Phi_3(r) = \sum_i U_i \varphi_i(r)$, где U_i – напряжения, $\varphi_i(r)$ – функции отклика корректора.

3) Для вычисленного профиля поверхности адаптивного зеркала методом последовательных итераций Фокса - Ли решается система интегральных уравнений Френеля – Кирхгофа (1).

4) По распределению амплитуды поля $|U(r)|$ вычисляется значение оптимизируемой величины. В частности, если оптимизируется распределение поля в какой-то конкретной плоскости (в том числе в дальней зоне), то, рассчитывается распространение пучка до этой плоскости с использованием интеграла Френеля-Кирхгофа и затем уже вычисляется оптимизируемая величина. Если ее значение далеко от оптимального, то алгоритм повторяется со второго шага.

Предложенная методика была численно исследована на эффективность. Показано эффективное формирование бessel-гауссовых, супергауссовых пучков в ближней зоне и кольцевых пучков в дальней (рис.9). Также демонстрируется возможность увеличения пиковой интенсивности в дальней зоне и выходной мощности низшей поперечной моды.

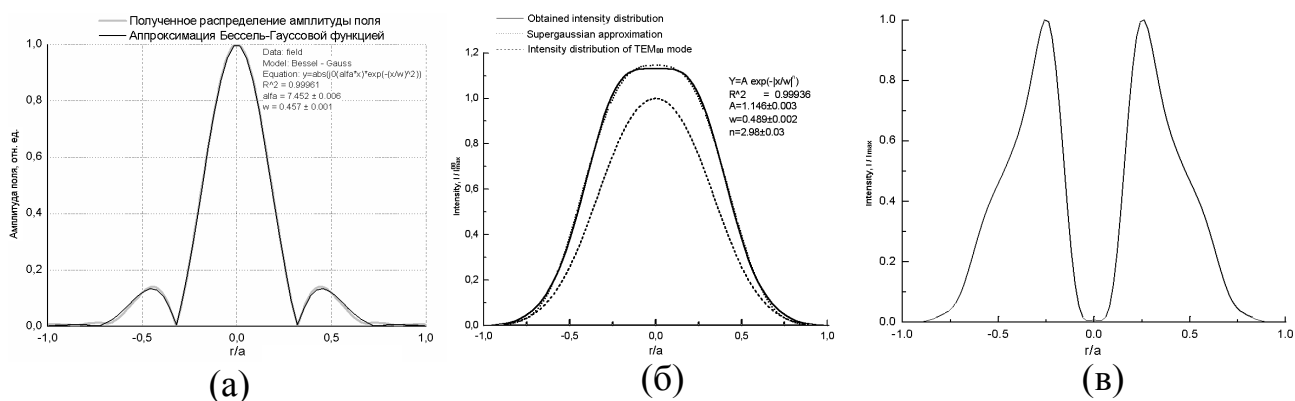


Рис 9. (а) - профиль сформированной на выходном зеркале резонатора амплитуды бessel-гауссова поля ($N_F = 9.9$, $\lambda=633$ нм); (б) - профиль интенсивности низшей поперечной моды на выходном зеркале, пунктирная кривая – традиционная гауссова мода резонатора лазера, сплошная линия – супергауссова мода, сформированная в результате оптимизации мощности ($N_F = 9.65$, $\lambda=1064$ нм); (в) – кольцевой пучок, сформированный в дальнем поле ($N_F = 9.65$, $\lambda=1064$ нм).

Глава 4 посвящена разработке методики коррекции осевых и внеосевых aberrаций световых пучков, прошедших или отраженных от aberrационных сред. В общем случае коррекция aberrаций - это формирование пучков на выходе из оптической системы, имеющих плоский волновой фронт. В главе 4 подробно проанализирована коррекция aberrаций на основе метода Шака-Гартмана гибкими биморфными зеркалами. Источник aberrаций в первом

случае – это внеосевой параболический оптический элемент, во втором – это оптическая система человеческого глаза. В §4.1 приведены результаты по измерению и коррекции aberrаций параболического зеркала. Исследования aberrаций конкретных экземпляров внеосевых параболических зеркал с фокусными расстояниями 150 мм и 50 мм, апертурой 50 мм и 20 мм указывают на внесение параболическими зеркалами таких aberrаций, как астигматизм и кома. Коррекция aberrаций оказалась эффективной как с использованием метода фазового сопряжения, так и метода покоординатного спуска с помощью 17-электродного биморфного зеркала. В результате удалось снизить амплитуду aberrаций оптических элементов в 2÷3 раза (рис.10). При этом эффективность двух используемых алгоритмов оказалась примерно одинаковой.

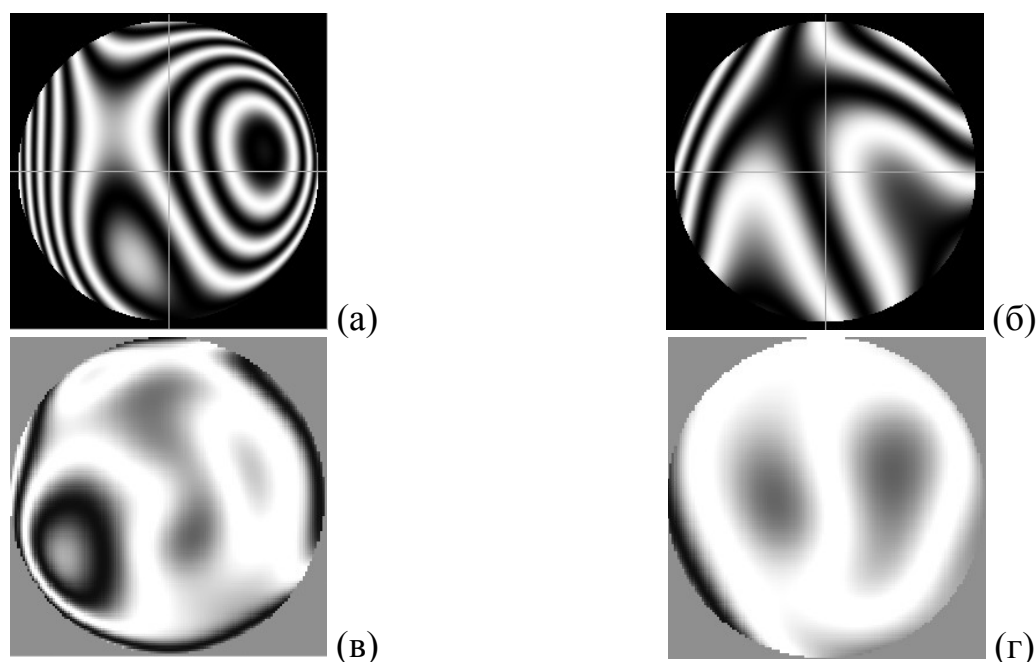


Рис.10. Aberrации внеосевых параболических зеркал (а) с $f=150\text{мм}$ и (б) с $f=50\text{мм}$; результаты коррекции aberrаций 18-ти электродным гибким биморфным зеркалом методом покоординатного спуска для параболы с $f=150\text{мм}$ (в) и $f=50\text{мм}$ (г).

Далее в главе предлагается оригинальный простой способ юстировки внеосевых параболических зеркал. Принцип юстировки основывается на следующем. Недостаточно точно съюстированный оптический элемент будет вносить искажения в волновой фронт отраженного или прошедшего сквозь него пучка. Искажения волнового фронта, в свою очередь, приведут к увеличению размера фокального пятна. При этом значение параметра M^2 будет больше по сравнению с M^2 для правильно выставленного элемента. Рис. 11 показывает экспериментальную зависимость параметра M^2 от угла поворота параболического зеркала вдоль одной из координатных осей. Оптимальный угол положения, отвечающий корректной юстировке параболических зеркал, когда задняя поверхность параболического зеркала была перпендикулярна оптической оси, соответствует минимальному значению M^2 .

Параграф 4.2 посвящен измерению и коррекции монохроматических aberrаций человеческого глаза. Для измерения монохроматических aberrаций

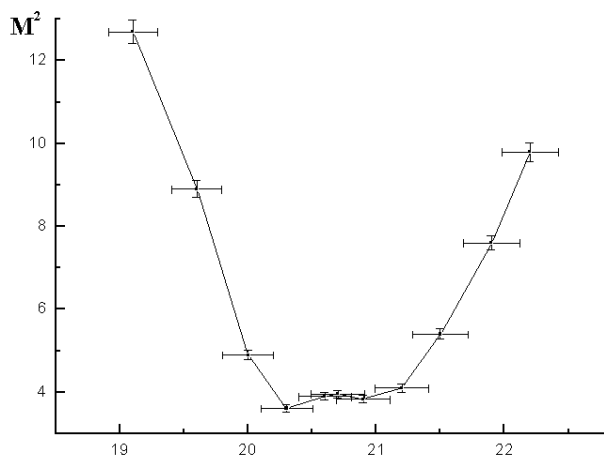


Рис. 11. Зависимость параметра M^2 от угла поворота внеосевого параболического зеркала с фокальной длиной 50 мм и апертурой 20 мм.

человеческого глаза используется также методика Шака-Гартмана измерения фазы рассеянного сетчаткой глаза излучения точечного источника, сформированного на сетчатке. Приводится описание экспериментальной установки для измерения aberrаций глаза и примеры измерения aberrаций глаз. Для того, чтобы оценить точность измерений, строится математическая модель датчика волнового фронта. Данная математическая модель используется для анализа ошибок, возникающих при измерении aberrаций глаза по методу Шака-

Гартмана. К анализируемым типам ошибок относились:

- ✓ ошибка, связанная с точностью позиционирования зрачка (до 3%),
- ✓ ошибка, связанная с конечным пространственным разрешением камеры (до 1%),
- ✓ ошибка, связанная с дискретизацией непрерывного по амплитуде сигнала камерой (до 0.1%),
- ✓ ошибка, связанная с шумовым сигналом камеры (до 0.4%),
- ✓ ошибка, связанные с выбором математической модели восстановления волнового фронта (до 2.5%).

Важно отметить, что последняя ошибка является систематической, поэтому ее влияние нельзя уменьшить за счет увеличения числа измерений aberrаций глаза. Поэтому в работе предложен и реализован уточненный алгоритм восстановления волнового фронта, устраняющий ошибки, связанные с выбором математической модели расчета волнового фронта.

Для отработки методики коррекции aberrаций глаза в диссертационной работе сначала такие aberrации исследуются экспериментально. Для этого на участках глазного дна, расположенных вне оси фиксации глаза, формируются опорные источники, рассеянное назад излучение которых анализируется датчиком Шака-Гартмана. Эксперимент показал, что хотя внеосевое поведение aberrаций варьируется от пациента к пациенту, что, по-видимому, обусловлено особенностями строения оптической системы глаза, вне оси фиксации значительно изменяется амплитуда трех типов aberrаций - дефокусировки, комы и астигматизма, тогда как значение других aberrаций с углом в пределах ошибки измерений не меняется.

Далее в работе экспериментально исследуется вклад внутриглазной оптики и роговицы в суммарные aberrации глаза. Известно, что основными элементами глаза, определяющими его оптические свойства, в том числе величину внеосевых aberrаций, являются роговица и хрусталик. Главной целью эксперимента, представленного в настоящей главе, является определение

относительного вклада этих двух оптических элементов в общую карту aberrаций глаза. В данной работе был выполнен эксперимент по иммерсионной методике. Сначала проводились измерения aberrаций всего глаза. Затем, чтобы компенсировать aberrации роговицы, пациент надевал обыкновенные плавательные очки, которые заполнялись иммерсионной жидкостью (жидкость для ухода за контактными линзами). Aberrации роговицы определялись вычитанием из общей карты волнового фронта aberrаций внутриглазной оптики. Результаты измерений для одного из пациентов представлены на рис. 12. Эти данные указывают на то, что амплитуда aberrаций внутриглазной оптики и роговицы превосходит амплитуду aberrаций глаза в целом.

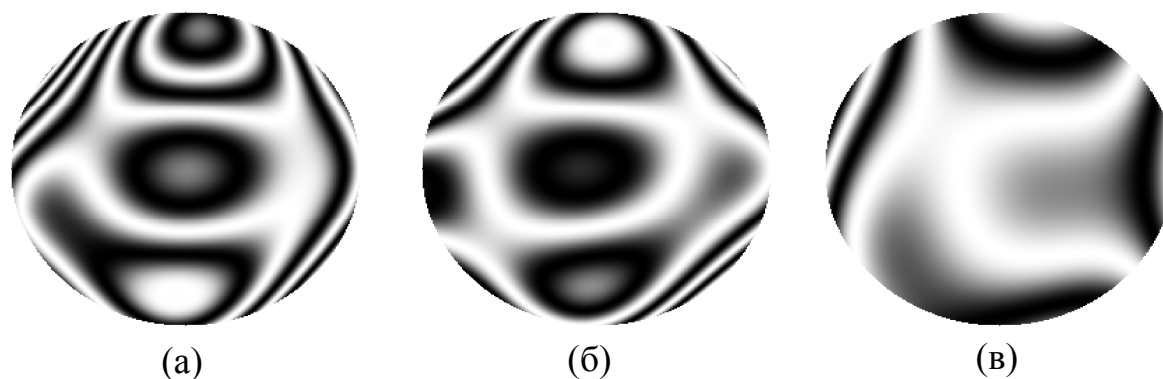


Рис.12. Пример карты волнового фронта для пациента АБ: (а) – aberrации глаза с иммерсионной жидкостью, (б) – aberrации роговицы, (в) – aberrации глаза целиком.

Это говорит о том, что между aberrациями различных элементов глаза (чаще всего к этим элементам относят роговицу и хрусталик) существует естественный баланс, который приводит к оптимальному качеству зрения здорового глаза.

Однако aberrации человеческого глаза флуктуируют во времени. Для анализа динамических свойств aberrаций глаза необходимо, прежде всего, производить измерение aberrаций с частотой, превышающей характерную частоту флуктуаций aberrаций глаза. Программное обеспечение абберметра было оптимизировано таким образом, чтобы обработка одного изображения занимала около 1 миллисекунды. Таким образом, после оптимизации программы скорость измерения ограничивалась лишь аппаратными средствами, в основном быстродействием камеры (Basler A602f), которая составляла 50 Гц. При измерениях в течение 5 секунд с интервалом 20мс (частота 50Гц) измерялись aberrации до 4-го радиального порядка включительно (14 коэффициентов Цернике). По измеренным временным зависимостям aberrаций (рис.13 (а)) рассчитывался спектр флуктуаций aberrаций (рис.13 (б)). Из рис. 13 видно, что для частот, превышающих 5 Гц, спектральная амплитуда флуктуаций aberrаций убывает примерно на четыре порядка. Учитывая точность измерения aberrаций с помощью датчика Шака-Гартмана, амплитуда aberrаций, находящихся за пределами 5 Гц не превышает амплитуду шумового сигнала.

На основе проведенных исследований aberrаций глаза в работе приводится моделирование оптической системы глаза. В диссертации

обсуждаются модели глаза пациента, имеющие характер поведения статических и динамических aberrаций аналогичные реальному человеческому глазу. Создание таких моделей важно для дальнейшей отработки оптимальной методики коррекции осевых и внеосевых aberrаций глаза. В первой части параграфа §4.2.3. предлагается динамический имитатор (модель) глаза, содержащий гибкое биморфное зеркало. Уникальность предложенной модели заключается в том, что в отличие от всех существующих имитаторов оптической системы глаза, она может воспроизводить флуктуации aberrаций глаза в режиме реального времени. Как показали эксперименты, ошибка воспроизведения различных aberrаций может несколько меняться от пациента к пациенту, что связано с разной амплитудой и структурой воспроизводимых фазовых искажений, однако в большинстве случаев ошибка не превышает $\lambda/10$ мкм, при этом каждая aberrация в отдельности воспроизводится с точностью, превышающей $\lambda/20$ мкм.

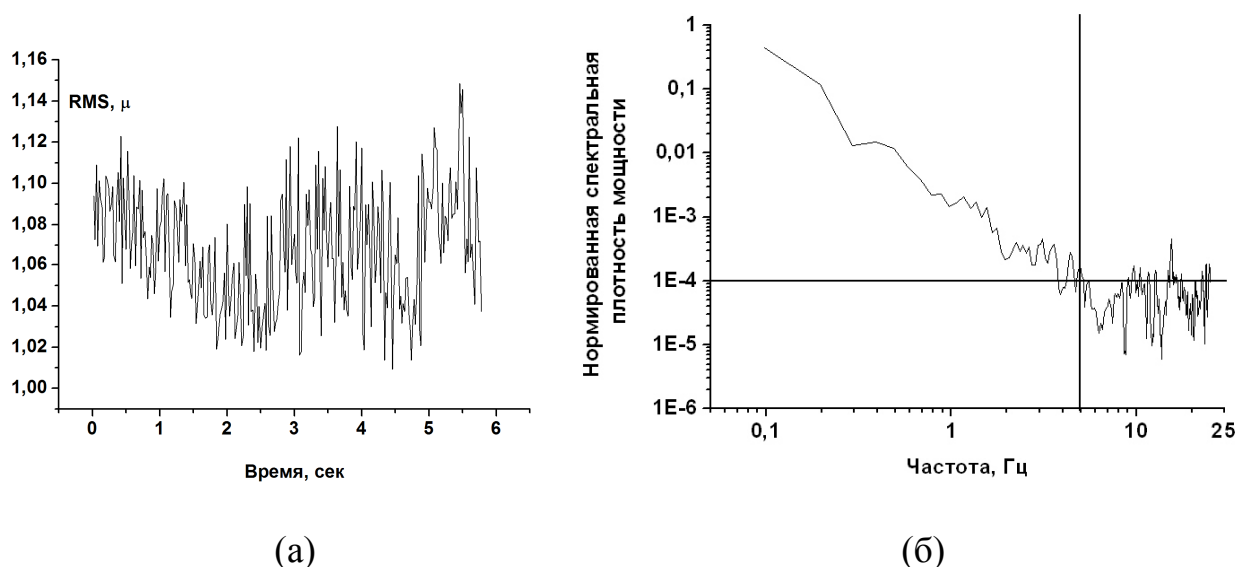


Рис. 13. Флуктуации aberrаций человеческого глаза во времени: (а) - флуктуации амплитуды суммарных aberrаций (RMS), (б) - пример спектра флуктуаций aberrаций (пациента РЛл).

В главе 4 приведены результаты построения моделей глаза, корректно описывающих распределение aberrаций между внутриглазной оптикой и роговицей, а также внеосевое поведение aberrаций глаза, экспериментально измеренные для каждого из обследуемых пациентов. За основу бралась модель человеческого глаза Гульстранда-Наварро. При моделировании оптической системы конкретного глаза мы изменяли значения смещений, углов поворота роговицы и хрусталика, варьировали положение зрачка, значения радиусов кривизны поверхностей и стремились получить поведение внеосевых aberrаций, качественно повторяющее результаты эксперимента для каждого конкретного глаза. При этом была получена зависимость среднеквадратичного отклонения волнового фронта от положения опорного источника, совпадающая с экспериментально измеренной зависимостью в пределах точности измерений.

Параграф 4.2.4 посвящен коррекции aberrаций глаза адаптивным зеркалом. Коррекция внеосевых aberrаций глаза непосредственно связана с

проблемой расширения зоны изопланатизма оптической системы глаза. Эта проблема тесно связана с получением изображения глазного дна с хорошим разрешением в большом телесном угле.

Вначале параграфа рассмотрен вопрос коррекции осевых aberrаций измеряемых пациентов гибким биморфным 18-ти электродным зеркалом. Результаты для 6 из них показаны на рис. 14. Из измеренных пациентов у РЛ была близорукость 1.7 Дптр, и 1.4 Дптр на правом и левом глазу соответственно, у пациента ИИ близорукость составляла 1.2 Дптр. Остальные обладали умеренной рефракцией менее 0.5 Дптр. Для пациентов РЛ и ИИ остаточная ошибка коррекции составила около 0.1 мкм, для остальных пациентов – не более 0.05 мкм, что говорит о высоком качестве компенсации aberrаций. Таким образом, результаты динамической коррекции aberrаций глаза с помощью биморфного зеркала продемонстрировали, что использование подобного типа корректоров позволяет успешно компенсировать aberrации пациентов с амплитудой aberrаций до 4.5 мкм. Остаточная ошибка коррекции для всех шести пациентов не превысила 0.1 мкм, то есть использование биморфных зеркал позволяет получать дифракционно-ограниченное разрешение изображения глазного дна вдоль направления коррекции.

Вторая часть параграфа посвящена коррекции внеосевых aberrаций человеческого глаза или, иными словами, расширению зоны изопланатизма человеческого глаза. Зона изопланатизма человеческого глаза определялась, как область, в которой остаточная среднеквадратичная ошибка коррекции меньше 1 рад^2 . Остаточная ошибка коррекции в 1 рад^2 соответствует числу Штреля, равному 0.37. Используя этот критерий, мы провели расчеты размера зоны изопланатизма человеческого глаза. При этом предполагалось, что корректор является идеальным, то есть, способен полностью компенсировать волновой

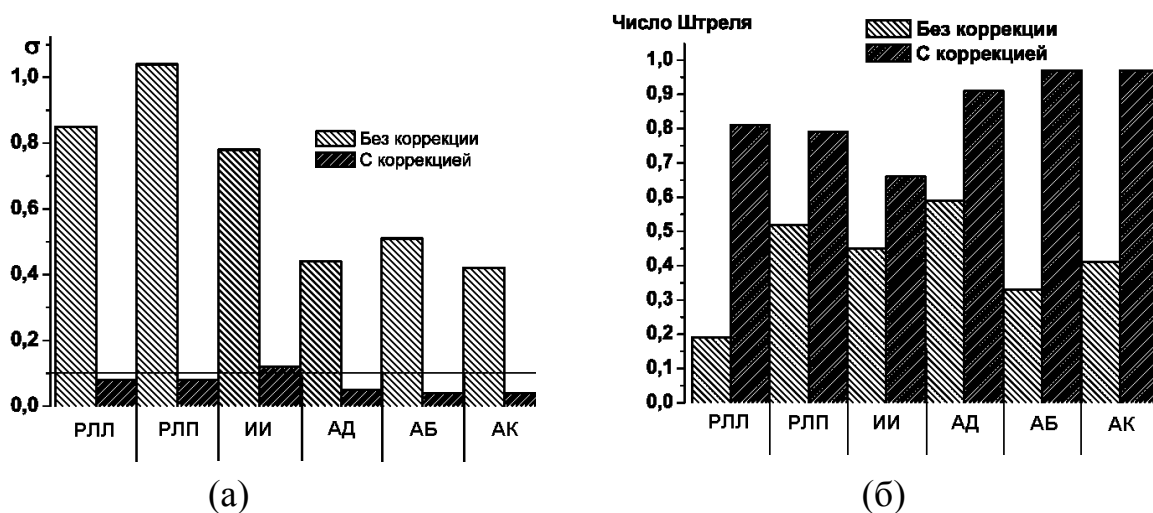


Рис. 14. (а) - среднеквадратичное отклонение волнового фронта от плоского до и после коррекции; (б) – число Штреля с коррекцией и без с учетом только полиномов Цернике высших порядков.

фронт от опорного источника.

На рис. 15 показана зависимость числа Штреля для волнового фронта, распространяющегося от различных участков сетчатки. Число Штреля рассчитывалось по формуле $s(\alpha) = \exp[-\sigma(\alpha)^2]$, где $\sigma(\alpha)^2$ – остаточная ошибка коррекции волнового фронта, распространяющегося в направлении α . В соответствии с этим критерием был оценен размер зоны изопланатизма для каждого из пациентов. Размер зоны изопланатизма для этих моделей глаза составил 2.4° , 2.6° и 1.7° для пациентов АБ, АД и РЛ соответственно. Размер зоны изопланатизма для модели глаза Гульстранда-Наварро (см. рис.15) составил 3.4° . Тот факт, что размер зоны изопланатизма для модели реального глаза превышает размер зоны для идеальной модели объясняется наличием в глазу элементов разъюстировки: наклонов, смещений, искажений оптических элементов.

Далее нами рассматривались различные методики расширения зоны изопланатизма человеческого глаза. Первый рассмотренный метод, так называемая коррекция по средней фазе, заключается в усреднении фазы, соответствующей нескольким опорным источникам, и последующей компенсации усредненной фазы корректором волнового фронта. На рис.16 представлен график зависимости ошибки коррекции от положения изображаемой точки для различных случаев. Видно, что методом коррекции по средней фазе можно добиться равномерной коррекции искаженного изображения в большей области, но при этом внутри этой области качество коррекции хуже, чем в случае одного опорного источника. Для данного пациента АД (рис.16(a)) размер зоны изопланатизма был увеличен с 2.5° до

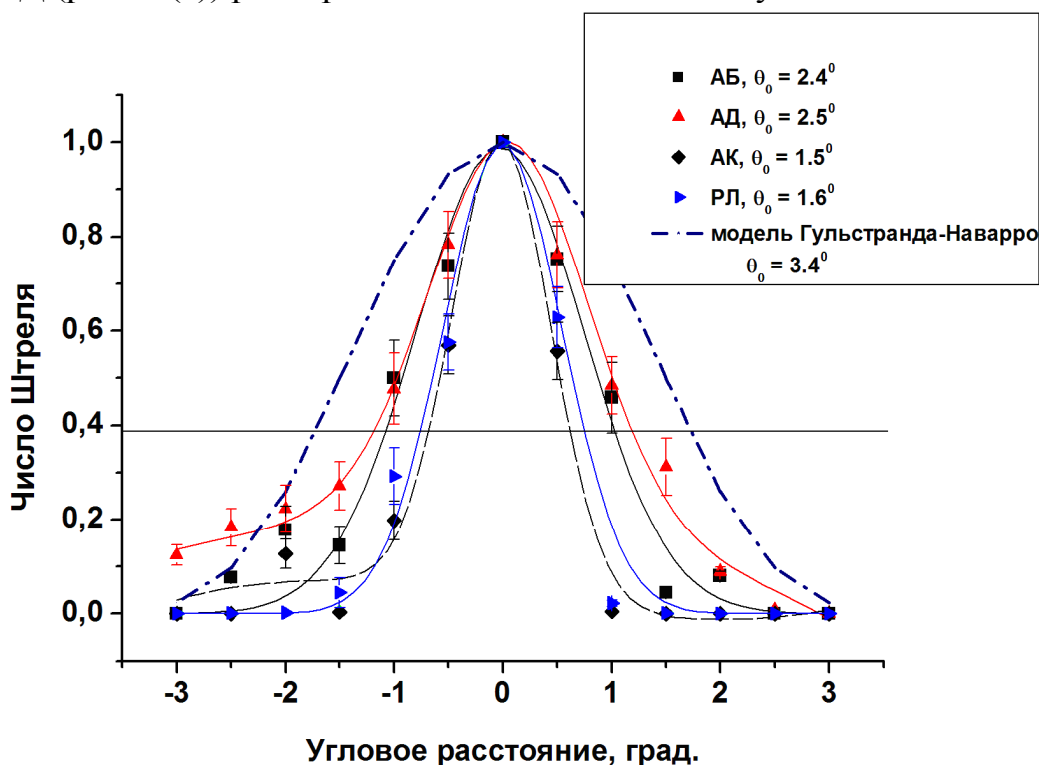


Рис. 15. Число Штреля для четырех пациентов. Горизонтальной линией показано число Штреля, равное 0,37, что соответствует границе зоны изопланатизма.

4.2°. Для пациентов АБ и РЛ размер зоны изопланатизма увеличился с 2.4° и 1.6° до 3.0° и 2.3° соответственно. Также нами был рассчитан эффект от коррекции по средней фазе для модели Гульстранда-Наварро (рис. 16(б)). Размер зоны изопланатизма для модели был расширен с 3.4° до 4.8°, то есть примерно в 1.4 раза. Следующий рассмотренный в диссертационной работе метод - коррекция с использованием двух корректоров, каждый из которых компенсирует aberrации какого-то определенного слоя, дает значительное расширение зоны изопланатизма (в 5.5-6.5 раза) в приложениях атмосферной оптики. Однако использование этого метода для человеческого глаза привело к незначительному расширению угла изопланатизма глаза. Это связано, прежде всего с тем, что хрусталик и роговица являются «толстыми» асферическими элементами, и световой пучок, проходящий через них, приобретает дополнительные aberrации – дефокусировку, астигматизм, кому. Амплитуда этих aberrаций возрастает вместе с увеличением угла падения пучка, поэтому данные aberrации невозможно скорректировать с помощью двух тонких корректоров, помещенных в плоскости, сопряженные хрусталику и роговице. В связи с этим, нами был предложен метод расширения зоны изопланатизма посредством нейтрализации преломляющей силы слоя роговицы при помещении ее в иммерсионную жидкость. Ожидалось, что при этом эффект анизопланатизма оптической системы глаза будет определяться лишь внутриглазной оптикой, то есть влияние этого эффекта будет уменьшено. На рис.17 показаны графики зависимости ошибки коррекции пациента АД в случае использования одного корректора

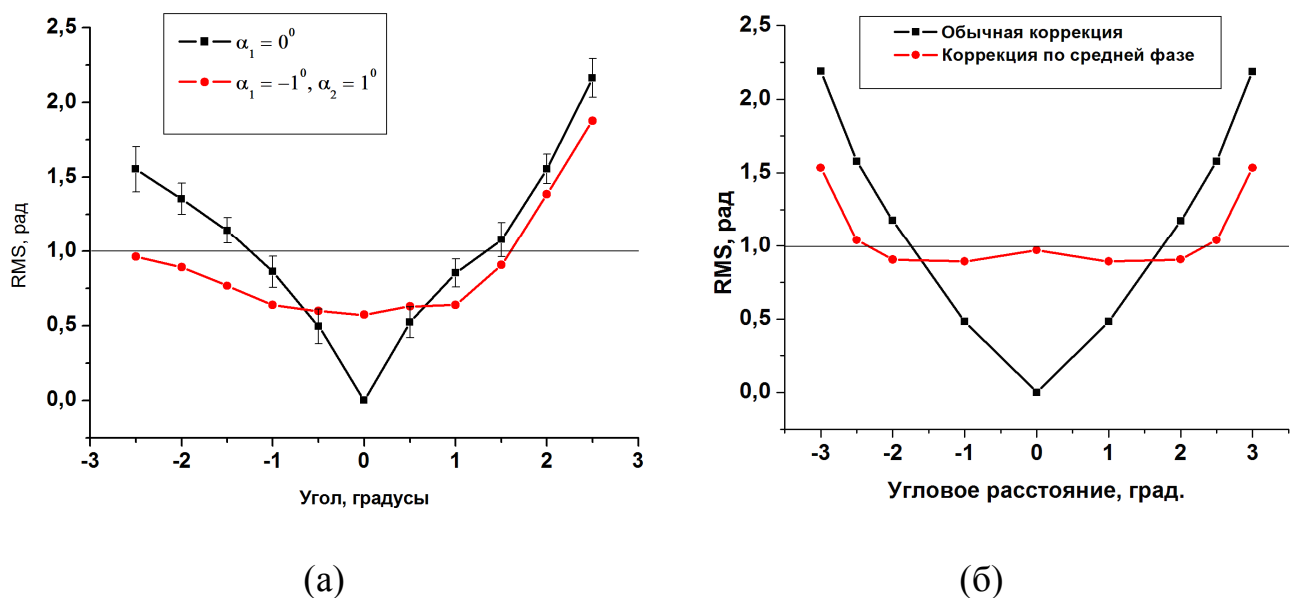


Рис. 16. Зависимость ошибки коррекции от положения изображаемой точки в методе коррекции по средней фазе (а) - для пациента АД; (б) – для модели глаза Гульстранда-Наварро при аналогичной геометрии опорных источников, α_1 и α_2 - угловые координаты опорных источников.

без нейтрализации роговицы (обычной коррекции) и в случае использования иммерсионной жидкости. Видно, что размер зоны изопланатизма увеличивается с 2,5 до 4,7 градусов. Для других обследованных пациентов данная методика позволяла увеличить размер зоны изопланатизма в 1.5-1.9 раз. На рис. 17(б) показан результат использования иммерсионной методики для идеального глаза, который задавался моделью Гульстранда - Наварро. Размер зоны изопланатизма для модели был увеличен с 3.4° до 6.1°, то есть примерно в 1.8 раза. При этом в отличие от метода коррекции по средней фазе, не происходит увеличения остаточной ошибки в центре глазного дна. Предложенный метод по эффективности наиболее эффективным, так как он позволяет значительно увеличить размер зоны изопланатизма, не увеличивая при этом ошибку коррекции в центре. Для его реализации не нужно создавать несколько опорных источников на сетчатке, не требуется увеличивать число корректоров или датчиков Гартмана. Поэтому такой метод может быть использован расширения поля зрения фундус-камер.

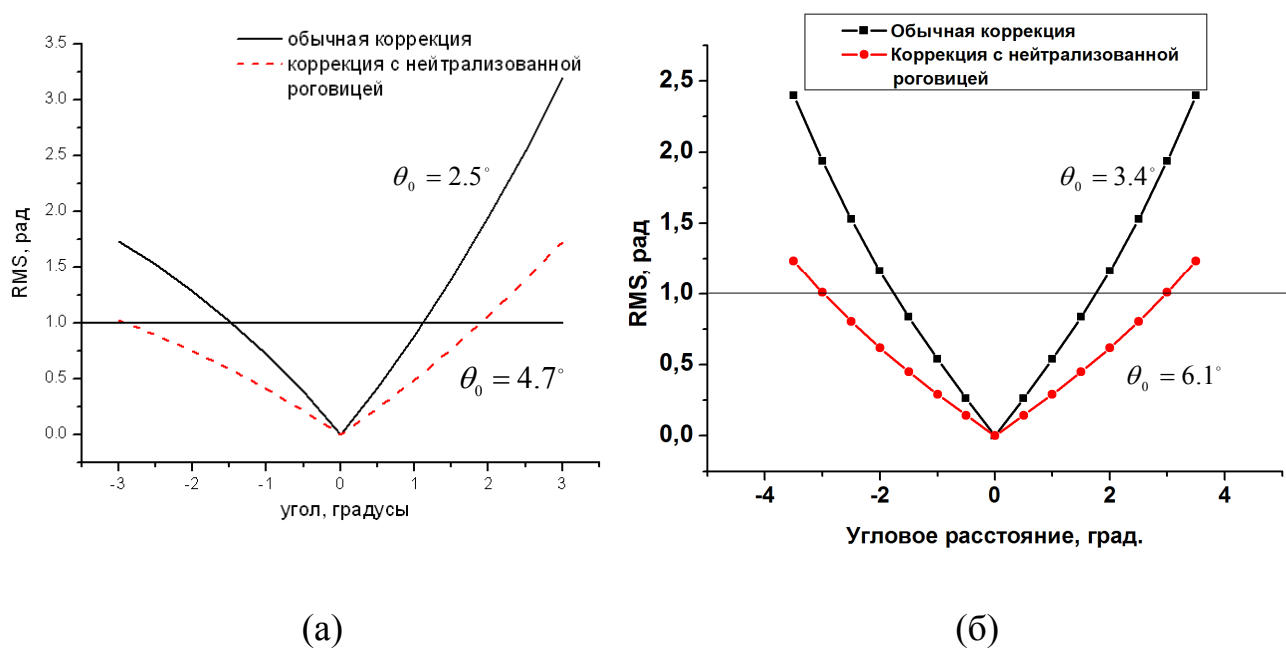


Рис.17. Результаты коррекции с нейтральной внешней поверхностью роговицы. (а) – для пациента АД, (б) - для модели глаза Гульстранда-Наварро.

В приложении 1 приводится уточнение аналитического решения деформации зеркала. В приложении 2 дается краткое описание проекционной формулировки метода конечных элементов. В приложении 3 приводится список медицинских терминов, используемых автором в главе 4. В приложении 4 приведены формулы и последовательность записи полиномов Цернике до 4-го радиального порядка, принятые в офтальмологии. Приложение 5 содержит описание основных свойств полиномов Цернике.

Основные выводы и результаты работы:

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработана оригинальная методика расчета, позволяющая осуществлять оптимизацию пространственных характеристик излучения различных типов лазеров внутрирезонаторным гибким зеркалом в любой выбранной плоскости, в том числе в ближнем и в дальнем поле. Методика основана на использовании внутрирезонаторного гибридного алгоритма и применима как к одномодовому, так и к многомодовому по поперечным индексам излучению и позволяет итерационно определить сигналы управления, исходя из известных функций отклика зеркала, конфигурации резонатора и типа оптимизируемого параметра излучения. С помощью предложенной методики численно показана возможность увеличения выходной мощности излучения и пиковой интенсивности в дальней зоне низшей поперечной моды АИГ лазера на 39% и 44% соответственно с помощью внутрирезонаторного гибкого 5-ти электродного корректора; показана возможность формирования распределений интенсивности кольцевых пучков в дальнем поле АИГ лазера при оптимизации отношения максимальной интенсивности к интенсивности в центре пучка и эффективное формирование супергауссовых пучков при оптимизации выходной мощности; бессель-гауссовых в ближнем поле гелий-неонового лазера. Методика апробирована экспериментально для управления фокусировкой излучения с начальном M^2 , равным 56, мощностью 500 Вт непрерывного твердотельного керамического АИГ лазера с диодной накачкой. Управление по данной методике 18-ти электродным корректором позволило улучшить фокусировку на 10% без потерь мощности и улучшить в 1,6 раза при потерях мощности 30%.
2. Применение методики расчета формирования в ближнем поле заданных распределений интенсивности TEM_{00} моды внутрирезонаторным гибким управляемым зеркалом, построенной на основе внутрирезонаторного фазового сопряжения, позволило рассчитать возможность формирования в ближнем поле устойчивого телескопического резонатора твердотельного АИГ лазера заданных распределений интенсивности низшей поперечной моды внутрирезонаторным корректором. Применение данной методики в различных точках области устойчивости показало эффективное формирование супергауссовых пучков в случае короткого резонатора ($g_1g_2=0.83$, $N_1=0,9$, $N_2=95,5$). При этом наиболее сильно увеличивается селективность мод резонатора (от 2 до 50 раз), уменьшаются потери супергауссовой низшей поперечной моды в 1.1-1.8 раз (по сравнению с гауссовой модой) при увеличении ее модового объема.
3. Впервые для коррекции и формирования заданных параметров лазерного излучения предложена методика управления гибким внерезонаторным зеркалом, сочетающая в себе генетический алгоритм с алгоритмом

покоординатного спуска. Методика позволяет итерационно определить оптимальные сигналы управления гибким корректором. Эффективность данной методики подтверждена численно и экспериментально. С помощью указанной методики управления численно продемонстрирована возможность формирования заданного супергауссова распределения интенсивности излучения CO_2 лазера в дальней зоне $I = \exp\left\{\left(\frac{r}{0,4}\right)^8\right\}$ многомодового пучка, содержащего 4 поперечные моды, имеющие соответствующий вклад в суммарную мощность: TEM_{00} , - 17%. TEM_{01} (кольцевая) - 35%, TEM_{10} - 14%, TEM_{02} (кольцевая) - 34%. Экспериментально продемонстрировано с точностью 3% (RMS) формирование в дальней зоне супергауссова пучка порядка 4.3 и 4.1 диодного лазера из гауссова пучка. Применение данной методики позволило экспериментально получить улучшение фокусировки излучения твердотельного и диодного лазеров в 2-3 раза при максимизации функционала, обратно пропорционального диаметру фокального пятна и прямо пропорционального пиковой интенсивности в фокусе линзы.

4. В результате проведенного цикла экспериментальных и теоретических исследований возможности внерезонаторного формирования вихревых пучков была предложена оригинальная методика расчета сетки электродов гибкого биморфного зеркала для воспроизведения заданного волнового фронта с минимальной ошибкой. Методика основана на итерационной процедуре, в основе которой лежит решение задачи нахождения расположения электрода по заданной деформации зеркала. По данной методике рассчитан и изготовлен гибкий 8-ми электродный биморфный корректор, способный воспроизводить волновой фронт вихревого пучка. Расчетная ошибка формирования 8.25%. С помощью данного корректора, имеющего непрерывный профиль поверхности, впервые продемонстрировано экспериментальное формирование вихревого пучка в дальнем поле. Экспериментально впервые получена генерация вихревых пучков до 32 топологического заряда с помощью нематического управляемого жидкокристаллического транспаранта, имеющего разрешение 832x624, размер пикселя 32 мкм, максимальную фазовую задержку 2π на длине волны 532 нм. Демонстрирована также эффективная коррекция нематическим жидкокристаллическим модулятором вихревого пучка с разрывом волнового фронта в две длины волны, сгенерированного спиральной фазовой пластинкой.
5. На основании теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности использования двумерного алгоритма Гершберга-Сакстона для внерезонаторного формирования заданных распределений интенсивности, установлено, что сходимость алгоритма может быть априорно определена по значению параметра $\beta = \pi \frac{\omega \cdot \omega'}{\lambda f}$. Так, например, при β , лежащем в интервале $1.23 < \beta < 4.45$, задача

формирования супергауссова пучка 6-го и 12-го порядков из гауссова пучка достигают точности формирования идеальным корректором, не хуже, чем 10%. Экспериментальная реализация алгоритма Гершберга-Сакстона для формирования заданных распределений интенсивности с помощью жидкокристаллического модулятора (с разрешением 832x624, размером пикселя 32 мкм) продемонстрировала возможность формирования различных распределений интенсивности, имеющих широкий пространственный спектр.

6. Экспериментальные исследования aberrаций сильнофокусирующей внеосевой оптики позволили сделать вывод о том, что коррекция таких aberrаций эффективна 17-электродным биморфным зеркалом. Так, например, для внеосевых параболических зеркал с фокусными расстояниями 150 мм и 50 мм, апертурой 50 мм и 20 мм управление адаптивным зеркалом позволило снизить амплитуду aberrаций оптических элементов в 2÷3 раза. При этом установлено, что коррекция aberrаций таких оптических элементов одинаково эффективна при использовании алгоритмов фазового сопряжения и покоординатного спуска. Использование метода фазового сопряжения для коррекции aberrаций указанных параболических зеркал дает снижение амплитуды aberrаций (P-V) 1,96-2,9 раза, применение метода покоординатного спуска дает снижение амплитуды aberrаций (P-V) в 2,26-2,4 раза. Исследование влияния aberrаций оптических элементов на M^2 -параметр пучка, отраженного или прошедшего сквозь него, позволило предложить оригинальный метод юстировки сложных оптических элементов по минимизации M^2 -параметра пучка. Метод апробирован для юстировки внеосевых параболических зеркал с фокусными расстояниями 150 мм и 50 мм, апертурой 50 мм и 20 мм и дает точность выставления углового положения не хуже $\pm 0,2^0$.
7. Проведенный цикл экспериментальных исследований внеосевых aberrаций и aberrаций компонент человеческого глаза позволяет сделать вывод, что основной спектр флуктуаций aberrаций глаза лежит в диапазоне до 5 Гц, суммарные aberrации человеческого глаза не превышают по амплитуде aberrации отдельных оптических элементов глаза. Исследование динамики флуктуаций aberrаций человеческого глаза позволило предложить уникальный имитатор aberrаций глаза, основанный на гибком биморфном корректоре, воспроизводящем волновой фронт человеческого глаза в динамике со среднеквадратичной ошибкой, не превышающей величину $\lambda/10$ мкм ($\lambda=780$ нм), а для отдельных aberrаций $\lambda/20$ мкм. Исследование статических aberrаций позволило впервые предложить модели глаза, объясняющие характер поведения осевых и внеосевых aberrаций измеряемых глаз пациентов, а также распределение aberrаций между оптическими элементами глаза. Такие модели отличаются от существующих моделей глаза значениями смещений, углов поворота

оптических элементов, положением зрачка, кривизной поверхностей сферических элементов.

8. На основе экспериментального исследования аберраций впервые определен размер зоны изопланатизма человеческого глаза. В соответствии с принятой оценкой размера зоны изопланатизма, как площади, где остаточная среднеквадратичная ошибка коррекции не превышает 1 рад^2 , размер такой зоны составляет для измеренных пациентов $1.5^\circ - 2.8^\circ$. Размер зоны изопланатизма для модели глаза Гульстранда-Наварро равен 3.4° . Различие между размером зоны изопланатизма модельного и реального глаза объясняется наличием разъюстировок оптических элементов и неидеальной формой поверхности элементов в оптической системе реального глаза. Разработана и исследована на эффективность методика расширения зоны изопланатизма человеческого глаза. Методика расширения зоны изопланатизма человеческого глаза по средней фазе позволяет расширить размер зоны в 1.2-1.5 раза при увеличении остаточной ошибки коррекции в центре глазного дна до 1 рад. Для идеальной модели Гульстранда-Наварро размер зоны изопланатизма был расширен до 4.8° . Методика, использующая два тонких корректора, расположенных в плоскостях, сопряженных с хрусталиком и роговицей, не дает значительного расширения угла изопланатизма, что объясняется, тем, что глаз является системой, состоящей из «толстых» линз. Методика нейтрализации преломляющей силы слоя роговицы иммерсионной жидкостью позволяет расширить зону изопланатизма в 1.5-1.9 раза без увеличения остаточной ошибки коррекции в центре глазного дна. Для модели Гульстранда-Наварро применение данной методики позволило расширить зону изопланатизма до 6.1° .

Список цитируемой литературы

1. Технологические лазеры. т.1.//Под ред. Г.А.Абильситова. -М: Машиностроение, 1991, - 432с.
2. N.A.Generalov, N.G.Solov'yov, M.Yu.Yakimov, V.P.Zimakov. Beam quality improvement by means of unstable resonator with variable reflectivity output coupler.// In Laser Resonators, Alexis Kudryashov, Pierre Galarneau, Editors, Proc. SPIE v. 3267, pp.226-234, (1998).
3. D.L.Fried. Branch point problem in adaptive optics// JOSA A, v.15, №10, pp.2759-2786, (1998).
4. S.R.Seshadri. Scalar modified Bessel-Gauss beams and waves// JOSA A, v.24, №9, pp. 2837-2842 (2007).
5. С.А.Ахманов, М.А.Воронцов, В.П.Кандидов, А.П.Сухоруков, С.С.Чесноков. Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации. Известия высших учебных заведений// Сер. Радиофизика, т.ХХІІІ, сс.1-37, (1980).

6. М.И.Калиниченко, В.А.Трофимов. О возможности аномального роста концентрации продукта лазериндуцированной обратимой химической реакции вблизи боковой поверхности кюветы// ЖТФ, т.63, сс.195-198, (1993).

Публикации по теме диссертации:

1. T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Chapter 6 in Laser Beam Shaping by Means of Flexible Mirrors// Laser Beam Shaping Applications, Fred Dickey, Scott Holswade, David Shealy Editors (Published by Taylor & Fransis Group), pp. 211-241, (2006).
2. V.V.Samarkin, A.V.Kudryashov, T.Yu.Cherezova, S.S.Chesnokov. Formation of a super-gaussian distribution of the CW CO₂ laser beam by using of deformable mirror// Laser Beam and Optics Characterization, H. Weber, H. Laabs, Editors (Published by Technische Universitat Berlin, Optisches Institut), pp. 178-185, (2000).
3. А.В.Дубинин, А.И.Беляков, Т.Ю.Черезова, А.В.Кудряшов. Изопланатизм оптической системы человеческого глаза// Оптический журнал, том 75, №3, с.43-45 (2008).
4. A.Dubin, T.Cherezova, A.Belyakov, A.Kudryashov. Human retina imaging: widening of high resolution area// *Journal of Modern Optics*, v.55, №4-5, 20 February – 10 March, pp.671-681, (2008).
5. Ю.В.Шелдакова, А.В.Кудряшов, А.Л.Рукоуев, Т.Ю.Черезова. Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки светового излучения// Оптика атмосферы и океана, т. 20, № 4, сс.380-383, (2007).
6. А.Ю.Костылев, И.В.Ильина, Т.Ю.Черезова, А.В.Кудряшов. Формирование вихревых пучков управляемыми фазовыми элементами// Оптика атмосферы и океана, т. 20, №11, сс. 1028-1032, (2007).
7. Александров А.А., Кудряшов А.В., Рукоуев А.Л., Черезова Т.Ю., Шелдакова Ю.В. Адаптивная оптическая система управления лазерным излучением// Оптический журнал, т. 74, №8, сс.550-554, (2007).
8. С.О.Галецкий, А.И.Беляков, Т.Ю.Черезова, А.В.Кудряшов. Создание модели человеческого глаза методами адаптивной оптики (письмо в редакцию)// Оптический журнал, т. 73, №7, сс. 79-82, (2006).
9. Е.А.Орленко, Т.Ю.Черезова, Ю.В.Шелдакова, А.Л.Рукоуев, А.В.Кудряшов. Внеосевые параболические зеркала: способ юстировки, измерение и коррекция aberrаций// Оптический журнал, т.72, №4, сс. 20-28, (2005).
10. А.С.Соболев, Т.Ю.Черезова, А.В.Кудряшов. Аналитическая и численная модели гибкого биморфного зеркала// Оптика атмосферы и океана, т. 18, №3, сс. 277-281, (2005).
11. J. V. Sheldakova, A. V. Kudryashov, V. Y. Zavalova, T. Y. Cherezova. Beam quality measurements with Shack-Hartmann wavefront sensor and M2-sensor: comparison of two methods// Proc. SPIE, v.6452, p. 645207, (2007).

12. I.V.Ilyina, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Far field laser intensity distribution formation by means of intracavity adaptive optics// Proc. SPIE v.6452, p.64520C, (2007).
13. A.Kostylev, A.Sobolev, T.Cherezova, Y.Sheldakova, A.Kudryashov. Intracavity genetic algorithm for any distance beam parameters control// Proc.SPIE, v.6346, pp.63461X-1-63461X-9, (2007).
14. A.Sobolev, T.Cherezova, V.Samarkin, A.Kudryashov. Bimorph Flexible Mirror for Vortex Beam Formation// Proc.SPIE, v.6346, pp. 63462A-1-63462A-6, (2007).
15. A.V.Dubinina, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. High Resolution Field-of-View widening in Human Retina Imaging// Programme and Summary Book of 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, p.90, (2007).
16. I.V.Ilyina, T.Yu.Cherezova. Gerchberg-Saxton algorithm for multimode beam reshaping// Programme and Summary Book of 6th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, p.164, (2007).
17. Александров А.Г., Беляков А.И., Галецкий С.О., Завалова В.Е., Кудряшов А.В., Черезова Т.Ю. Учет неравномерности распределения интенсивности при измерении аберраций человеческого глаза// МГОУ XXI – Новые Технологии, №4, сс. 11-16, (2006).
18. А.Г.Александров, В.Е.Завалова, А.В.Кудряшов, А.Л.Рукосуев, В.В.Самаркин, Ю.В.Шелдакова, Т.Ю.Черезова. М²-датчик для задач адаптивной оптики// МГОУ-XXI-Новые технологии, № 6, сс. 5-10, (2005).
19. A.Dubinina, T.Cherezova, A.Belyakov, A.Kudryashov. Human eye anisoplanatism: eye as a lamellar structure// Proc. SPIE, v.6138, p.613813, (2006).
20. A.Sobolev, T.Cherezova, V.Samarkin, A.Kudryashov. Screw phase dislocation formation by means of flexible bimorph mirror// Proc. of LFNМ 2006 (8nd International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling), pp.434-437, (2006).
21. A.Yu.Kostylev, A.S.Sobolev, Yu.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Genetic algorithm for intracavity bimorph mirror control// Proc. of LFNМ 2006 (8nd International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling), pp.438-441, (2006).
22. I.V.Ilyina, A.S.Sobolev, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Gerchberg-Saxton iterative algorithm for flexible mirror performance// Proc. of LFNМ 2006 (8nd International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling), pp.442-445, (2006).
23. Kostylev A., Sobolev A., Sheldakova Y., Cherezova T., Kudryashov A. Intracavity genetic algorithm for any distance beam parameters control// Proc. of XVI Int. Symp. On Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers Conference. p.89, (2006).
24. T.Yu.Cherezova, A.Yu.Kostylev, A.S.Sobolev, Yu.V.Sheldakova, V.V.Samarkin, A.V.Kudryashov. Genetic algorithm for intracavity adaptive

- mirror control// Proc. of HPLB 2006 (International Conference on High Power Laser Beams), pp.18-19, (2006)
25. Galetskiy S., Belyakov A., Cherezova T., Kudryashov A. Dynamic generation of phase profiles inherent to human eye// Technical Digest of Laser Optics for Young Scientists, p.23, (2006).
 26. J.Sheldakova, T.Cherezova, A.Alexandrov, A.L.Rukosuev, A.V.Kudryashov. The use of M2 meter to correct for high-power laser aberrations// Proc. SPIE v.5708, pp. 352-359, (2005).
 27. J.V.Sheldakova, T.Y.Cherezova, A.V.Kudryashov. Genetic and hill-climbing algorithms for high-power laser beam correction// Proc. SPIE, v.5975, pp. 265-272, (2005).
 28. S.Galetskiy, R.Letfullin, A.Dubinin, T.Cherezova, A.Belyakov, A.Kudryashov. Custom-oriented wavefront sensor for human eye properties measurements// Proc. SPIE, v.6018, pp.601806-601806-9, (2005).
 29. A.S.Sobolev, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Multimorph Mirrors: a New Generation of Bimorph Mirrors// Proc. of CAOL 2005 (2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers), v.1, pp.198-201, (2005).
 30. J.Sheldakova, T.Cherezova, A.Kudryashov. M2 Meter as a Part of Closed-Loop Adaptive Optical System for High-Power Laser Beam Correction// Proc. of CAOL 2005 (2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers), v.1, p.209, (2005).
 31. J.Sheldakova, A.Kudryashov, A.Rukosuev, T.Cherezova. Adaptive optical system for laser beam focusing// Proc. of ICOL 2005 (International Conference on Optics and Optoelectronics), p.5, (2005).
 32. Letfullin R., Belyakov A., Cherezova T., Kudryashov A. A human eye model based on bimorph flexible mirror// Proc. SPIE, v.5864, p.58640F, (2005).
 33. Dubinin A., Belyakov A., Cherezova T., Kudryashov. Human retina imaging: isoplanatism considerations// Proc. SPIE, v.5864, pp. 95-113, (2005).
 34. Letfullin R., Belyakov A., Cherezova T., Kudryashov. Human eye model based on bimorph flexible mirror// Proc. SPIE, v.5894, pp.95-102, (2005).
 35. Letfullin R., Belyakov A., Cherezova T., Kudryashov A. Double-pass measurement of human eye aberrations: limitations and practical realization// Proc. SPIE, v. 5572, pp.340-349, (2004).
 36. A.Dubinin, A.Belyakov, T.Cherezova, A.Kudryashov. Anisoplanatism in adaptive Optics Compensation of Human Eye aberrations// Proc. SPIE, v.5572, pp.330-340, (2004).
 37. F.A. Starikov, S.A. Byiko, G.G. Kochemasov, S.M. Kulikov, A.N. Manachinskii, N.V. Maslov, V.N. Novikov, etc. A.V. Kudryashov, V.P. Aksenov, F.Yu. Kanev, T.Yu.Cherezova. Development an Adaptive Optical System for phase correction of laser beams with phase front dislocation: generation of an optical vortex// XI-th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics Final Programme, Abstract book, p.71, (2004).
 38. Yu.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. Analysis of the laser intensity distribution// Proc. SPIE, v.4900, pp.367-372, (2002).

39. Yu.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.Kudryashov. The M^2 -sensor for the adaptive optical system// Proc. 3rd Int. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, pp.23-26 July 2001, Albuquerque, NM, USA, Ed. Sergio R.Restano & Scott W.Teare, pp. 27-34, Starline Printing, Inc. (2002).
40. J.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.Kudryashov. Low-cost M^2 -sensor for the adaptive optical system// Proc. SPIE, v.4493, pp. 285-293, (2002).
41. Yu.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov. M^2 -sensor for the adaptive optical system// Proc. SPIE, v.4644, pp. 392-399, (2002).
42. T.Y.Cherezova, Y.V.Sheldakova, A.V.Kudryashov. Low-cost laser-beam analyzer// Proc. SPIE, v.4629, pp. 122-128, (2002).
43. Шелдакова Ю.В., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В. Анализатор распределения интенсивности лазерного излучения (M2-Sensor)// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ Роспатент, №2002610978, (2002).
44. T.Yu.Cherezova, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov, V.V.Samarkin. Active laser resonator performance: formation of a specified intensity output// Applied Optics, v.40, №33, pp. 6026-6033, (2001).
45. Ю.Н.Завалов, Л.Н.Капцов, А.В.Кудряшов, В.В.Самаркин, Т.Ю.Черезова, С.С.Чесноков. Формирование заданного распределения интенсивности излучения в непрерывном технологическом CO₂ лазере// Квантовая электр., т.27, №1, сс. 57-58, (1999).
46. T.Yu.Cherezova, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov, V.V.Samarkin. Active correctors as the alternative to graded phase mirror - CO₂ and YAG laser beam formation// Proc. of 2nd Int. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, pp. 187-193, Word Scientific, (2000).
47. T.Yu.Cherezova, V.V.Samarkin, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Formation of the specified laser output by means of intracavity active mirrors// Proc. SPIE, v.3760, pp. 76-82, (1999).
48. T.Yu.Cherezova, V.V.Samarkin, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Given laser output formation: adaptive optics approach – theory and experiment// Proc. SPIE, v.3611, pp. 90-101, (1999).
49. Капцов Л.Н., Кудряшов А.В., Черезова Т.Ю., Чесноков С.С. Формирование заданного распределения интенсивности на выходе технологического CW CO₂-лазера с помощью внутрирезонаторного гибкого зеркала// Изв. академии наук сер. Физическая, т. 63, №10., сс. 2004-2009, (1999).
50. T.Yu.Cherezova, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Numerical simulation of the intracavity laser-beam formation by means of adaptive optics// Proc. SPIE, v.3267, pp.287-294, (1998).
51. T.Yu.Cherezova, S.S.Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Super-Gaussian output laser beam formation by bimorph adaptive mirror// Opt. Comm., v.155, pp. 99-106, (1998).
52. Cherezova T.Yu., Chesnokov S.S., Kaptsov L.N., Kudryashov A.V. Doughnut-like laser beam output formation by intracavity flexible controlled mirror// Opt. Express, v.3, №3, pp. 180-189, (1998).

53. L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov, T.Yu.Cherezova, S.S. Chesnokov. Formation of specified intensity distribution of industrial laser with intracavity flexible mirror// VI International Conference Industrial Lasers & Laser Applications'98 (ILLA'98), Programme and Abstracts, p.123, (1998).
54. T.Yu.Cherezova, S.S. Chesnokov, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Laser resonators with the given output by using adaptive mirrors// CLEO/EUROPE'98, Technical Digest, p. 78, (1998).
55. T.Yu.Cherezova, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Cw industrial rod YAG:Nd³⁺ laser with an intracavity active bimorph mirror// Appl. Opt, v.35, №15, pp. 2554-2561, (1996).
56. T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov, P.A.Belanger, C.Pare. Super-Gaussian Output Beam Formation in a CW CO₂ Laser by intracavity Controlled Bimorph Mirror// CLEO/EUROPE'96, Technical Digest, paper CWF14, (1996).
57. T.Yu.Cherezova, L.N.Kaptsov, F.V.Kudryashov. The formation of the Super-gaussian output in a CW CO₂-laser by intracavity bimorph flexible mirror// Proc. SPIE, v.2778, pp.694-695, (1996).
58. T.Y.Cherezova, L.N.Kaptsov, A.V.Kudryashov. Application of intracavity adaptive mirror for CW solid state laser radiation control// Proc. SPIE, v.2257, pp. 230-233, (1994).
59. А.Аббас, Л.Н.Капцов, А.В.Кудряшов, Т.Ю.Черезова. Управление параметрами излучения твердотельного технологического ИАГ:Nd³⁺ лазера методами адаптивной оптики. 1. Резонатор лазера с адаптивным зеркалом// Квантовая электр., т.19, сс. 576-578, (1992).
60. А.Аббас, Л.Н.Капцов, А.В.Кудряшов, Т.Ю.Черезова. Управление параметрами излучения твердотельного технологического ИАГ:Nd³⁺ лазера методами адаптивной оптики. 3. Уменьшение расходимости и формирование модовых структур// Квантовая электр. Т.19, сс. 581-583, (1992).