

На правах рукописи

ШЕЛДАКОВА ЮЛИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА

**ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ И
УПРАВЛЕНИЕ ИХ
ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ**

Специальность 01.04.21 - "Лазерная физика"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в Московском государственном открытом университете и в ООО «АДОПТ», г.Москва.

Научные руководители: доктор физико-математических наук
А.В.Кудряшов
кандидат физико-математических наук
Т.Ю.Черезова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Ф.А.Стариков
кандидат физико-математических наук
С.С.Чесноков

Ведущая организация: Институт проблем механики РАН

Защита состоится 25 мая 2007 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.45 в Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, г.Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корпус, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 18 » апреля _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 501.001.45
Доктор физико-математических наук

А.Н. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований:

Для решения многих задач современной лазерной физики требуется сконцентрировать как можно большую энергию излучения на поверхности мишени. Так, например, для исследования взаимодействия излучения фемтосекундного титано-сапфирового лазера с различными материалами, необходимо получить наибольшую плотность мощности в фокусе внеосевого параболического зеркала. Однако, как показывают последние экспериментальные исследования в различных лабораториях, достижение максимальных значений яркости фокального пятна невозможно без использования методов и элементов адаптивной оптики.

С помощью адаптивных оптических систем можно компенсировать искажения волнового фронта, а также управлять модовым составом лазерного излучения. Одним из основных элементов таких систем, является датчик волнового фронта, сигнал с которого через электронную систему поступает на исполнительный элемент - корректор или гибкое зеркало. По заданному алгоритму профиль поверхности зеркала изменяется для компенсации фазовых искажений падающего излучения. Для измерения волнового фронта широко используются интерференционные методы, а также датчики Шака-Гартмана. Техническая реализация последних намного проще интерферометрических методов. Более того, они специально ориентированы на диагностику волнового фронта лазерных пучков.

Одним из недостатков применения измерителей волнового фронта в системах коррекции aberrаций лазерного излучения является сложность диагностики фазовых искажений после всех элементов, составляющих оптическую схему. Датчик волнового фронта располагается, как правило, перед фокусирующим элементом, и адаптивная система не может учесть aberrации, возникающие после фокусатора. Поэтому для оценки эффективности фокусировки необходимо использовать специальные

датчики для анализа распределения интенсивности лазерного излучения, которые позволяют измерить, например, диаметр пучка, угол расходимости или параметр качества M^2 и напрямую дать информацию о степени фокусировки светового пучка. Соответственно требуется разработка специальных методов и алгоритмов работы адаптивных систем с таким типом датчиков. Одновременно возможно решение задач оптимизации и юстировки всей оптической схемы и, в частности, основного фокусирующего элемента - параболического зеркала.

Цель диссертационной работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании эффективности разработанных автором методов управления в замкнутых адаптивных системах для улучшения фокусировки мощного лазерного излучения.

Для этого решаются следующие задачи:

- Разработка методики и аппаратуры для исследования и контроля параметров излучения лазера.
- Разработка алгоритмов управления биморфным деформируемым зеркалом в замкнутых адаптивных системах.
- Экспериментальная реализация предложенных алгоритмов и методик управления пространственными характеристиками лазерных пучков.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые разработана методика управления адаптивной системой, основанная на измерении параметра M^2 лазерного излучения и реализующая гибридный алгоритм управления биморфным зеркалом, который сочетает в себе генетический алгоритм и метод покоординатного спуска.
2. Использование метода покоординатного спуска впервые позволило сфокусировать 75% выходной мощности 40ТВт титано-сапфирового лазерного излучения в первый дифракционный максимум и получить пиковую интенсивность 2×10^{20} Вт/см².

3. Впервые использование гибкого биморфного зеркала в схеме генератор-усилитель непрерывного 100 Вт АИГ:Nd лазера позволило улучшить качество излучения более чем в два раза с применением гибридного метода управления.
4. Впервые предложена методика юстировки внеосевых параболических зеркал, основанная на минимизации параметра качества пучка M^2 .

Практическая ценность

1. Гибридный метод управления биморфным зеркалом может эффективно использоваться для улучшения фокусировки АИГ:Nd лазерного излучения.
2. Использование метода покоординатного спуска при управлении деформируемым биморфным зеркалом в мульти-тераваттных фемтосекундных лазерных комплексах позволяет увеличить выходную энергию импульсов и плотность интенсивности в фокусе параболического зеркала.
3. Применение предложенного способа юстировки внеосевых параболических зеркал, основанного на использовании M^2 -датчика, позволяет увеличить точность позиционирования такого зеркала.
4. Предложенный метод генерации опорной картины для датчика волнового фронта Шака-Гартмана может быть использован для увеличения точности измерения фазы пучка на 5-10%.
5. Разработанный M^2 -датчик позволяет определять такие параметры пучка, как положение центра тяжести, диаметр, угол расходимости, параметр качества M^2 , эллиптичность, кратковременную и долговременную стабильность мощности (интенсивности) излучения, а также аппроксимировать профиль интенсивности пучка гауссовой и прямоугольной функцией.
6. Применение разработанных алгоритмов поиска экстремумов интерференционных картин при диагностике оптических

поверхностей произвольной формы и поверхностей с отверстиями показало эффективность использования данных алгоритмов в условиях оптического производства.

Основные научные положения выносимые на защиту:

1. Адаптивная система апертурного зондирования, работающая по методу покоординатного спуска и использующая M^2 -датчик, в 40-TW титано-сапфировом фемтосекундном лазерном комплексе позволяет сфокусировать 75% выходной мощности излучения в первый дифракционный максимум и добиться пиковой интенсивности более $2 \times 10^{20} \text{Вт/см}^2$.
2. Использование адаптивной оптической системы апертурного зондирования, работающей по гибриднему алгоритму с M^2 -датчиком, в непрерывном 100 Вт АИГ:Nd лазере позволяет получить более чем двукратное улучшение качества лазерного излучения в схеме генератор-усилитель. В случае применения адаптивного корректора в качестве зеркала резонатора 1 кВт АИГ:Nd лазера параметр качества пучка может быть улучшен на 10% без потерь мощности.
3. Юстировка внеосевых параболических зеркал, основанная на минимизации параметра качества пучка M^2 , позволяет установить параболическое зеркало с точностью не хуже 1% для угловой ориентации зеркала по отношению к его оси вращения.

Внедрение результатов.

Результаты работы были использованы в ведущих научно-исследовательских институтах: Японский исследовательский институт атомной энергии (JAERI), г.Нара; Национальные лаборатории ДСО (DSO National Laboratories), Сингапур; МГУ им. М.В.Ломоносова; НПО «Алмаз» им. академика А.А.Расплетина.

Апробация результатов работы

Материалы диссертации представлялись на российских и международных конференциях, среди которых можно выделить: «Оптика лазеров», Санкт-Петербург (2000, 2003), «Лазерные технологии ILLA», Владимир-Суздаль (2001), «IQEC/LAT», Москва (2002), «Photonics West», Сан-Хосе, США (2003, 2004, 2005, 2006, 2007), «AMOS Technical Conference», Мауи, США (2004), «NWP, Topical Problems of Nonlinear Wave Physics», Санкт-Петербург – Нижний Новгород (2005), «CAOL, 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers», Ялта, Украина (2005), «ICOL, International Conference on Optics and Optoelectronics», Дехрадун, Индия (2005), «International Conference on High Power Laser Beams (HPLB)», Нижний Новгород (2006). Кроме того, результаты докладывались на научных семинарах кафедры Общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им М.В.Ломоносова, на научном семинаре МГОУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 33 работы (в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах), список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 121 наименование. Общий объем диссертации 149 страниц, включая 73 рисунка и 17 таблиц.

Личный вклад

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

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность разрабатываемой темы, отмечается ее научная новизна и практическая ценность, формулируются выносимые на защиту положения, а так же кратко изложены содержание и структура диссертации по главам.

Первая глава диссертации посвящена описанию методики измерения основных параметров лазерного излучения, таких как диаметр пучка, угол расходимости, параметр качества M^2 , приведён обзор литературы и классификация методов измерения перечисленных параметров.

В первом параграфе рассмотрено классическое представление пучка, предложенное А.Сигманом, вводится понятие параметра качества M^2 , приводится описание методики измерений согласно международному стандарту ISO11146. Также обсуждаются альтернативные методы: метод варьируемой диафрагмы, метод движущегося острого края (ножа) и метод движущейся щели. Дано описание измерения параметров пучка с использованием распределения Вигнера и корреляционной функции плотности, приведёна методика измерений с использованием нелинейных свойств жидких кристаллов.

Во втором параграфе первой главы обсуждаются достоинства и недостатки каждого из перечисленных методов. На основании приведённого обзора делается вывод, что наиболее удобным во всех отношениях способом измерения параметров лазерного пучка является методика, основанная на вычислении моментов распределения интенсивности лазерного излучения. Реализация данной методики возможна при помощи оптической схемы, представленной на Рис. 1.

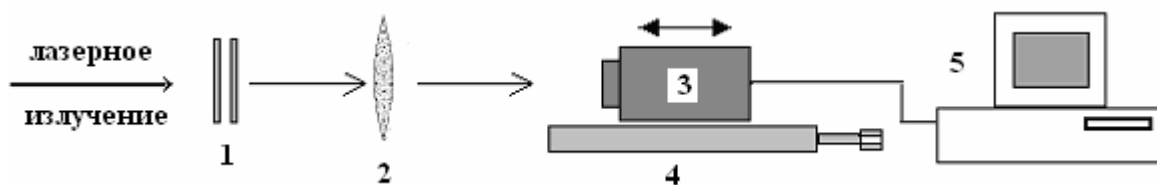


Рис. 1. Схема M^2 -датчика. 1 – ослабляющие фильтры, 2 – собирающая линза, 3 – ПЗС-камера, 4 – юстировочный столик, 5 – компьютер

В этом же параграфе показано, что в качестве детектирующей системы для регистрации распределения интенсивности может использоваться ПЗС-камера, поскольку современные ПЗС-камеры имеют высокую линейность преобразования и малый уровень шумов.

В третьем параграфе рассмотрены факторы, влияющие на точность измерения диаметра лазерного пучка. Приведены зависимости точности измерений от дискретизации изображения по координатам и уровню яркости, размера и положения площадки интегрирования при определении вторых моментов интенсивности, фонового шума и ограниченной точности определения положения ПЗС-камеры, нестабильности интенсивности излучения лазера.

Четвёртый параграф первой главы посвящён обсуждению разработанного программного обеспечения для M^2 -датчика, которое позволяет определять такие параметры пучка, как положение центра тяжести, диаметр, угол расходимости, параметр качества M^2 , эллиптичность, кратковременную и долговременную стабильность мощности (интенсивности) излучения, программное обеспечение может использоваться для аппроксимации профиля интенсивности пучка гауссовой и прямоугольной функцией.

Вторая глава диссертации посвящена описанию методики измерения волнового фронта лазерного излучения. Рассматриваются метод Шака-Гартмана и интерферометрические способы, обсуждаются достоинства и недостатки перечисленных методов при измерении волнового фронта пучка и диагностике оптических поверхностей.

В первом параграфе представлена конструкция датчика типа Шака-Гартмана. Отмечено, что для согласования апертуры исследуемого лазерного пучка и датчика может использоваться фокусирующая линза. Для такой конструкции рассмотрена проблема получения опорного фронта, с которым сравнивается реальный волновой фронт в процессе измерений. Предложена методика генерации опорной картины на основе записанных

волновых фронтов для разных диаметров пучка и данных об измеряемом волновом фронте. Представлен пример использования математически полученной опорной картины для измерения волнового фронта реального лазерного пучка.

Во втором параграфе главы рассмотрены интерферометрические методы измерения волнового фронта. Подробно описан принцип действия интерферометра Физо, представлены методы обработки интерференционных картин. Показано, что использование фильтрации шумов приводит к уменьшению ошибки измерений. Рассмотрены алгоритмы поиска экстремумов интерференционных полос и методы анализа информации об экстремумах, предложена процедура идентификации экстремумов.

Третий параграф второй главы содержит экспериментальные результаты измерения волнового фронта на примере исследования формы оптических поверхностей с использованием интерферометра Физо. Подробно описан процесс обработки интерференционных картин с дополнительно введённым наклоном, рассмотрены факторы, влияющие на точность метода.

В третьей главе диссертации рассмотрена адаптивная оптическая система для формирования и компенсации аберраций лазерного излучения. Система состоит из корректора, электронного блока управления и датчика сигнала ошибки. В качестве корректора используются биморфные деформируемые зеркала, которые хорошо себя зарекомендовали в задачах компенсации фазовых искажений. Для оценки качества фокусировки предложено применять M^2 -датчик, который позволяет не только регистрировать распределение интенсивности в фокальном пятне, но так же рассчитывать ряд важных параметров лазерного излучения, таких как диаметр пучка, угол расходимости, стабильность излучения. Демонстрируются примеры использования адаптивной системы.

В первом параграфе третьей главы дано описание конструкции и основных характеристик биморфного деформируемого зеркала. В работе используется зеркало, которое состоит из трёх склеенных пластин: подложки, выполненной из оптического материала, и двух пьезокерамических дисков (Рис. 2). При подаче напряжения на электроды, нанесённые на пьезокерамические диски, под действием обратного поперечного пьезоэффекта происходит расширение или сжатие пьезокерамики, что вызывает деформацию зеркала.

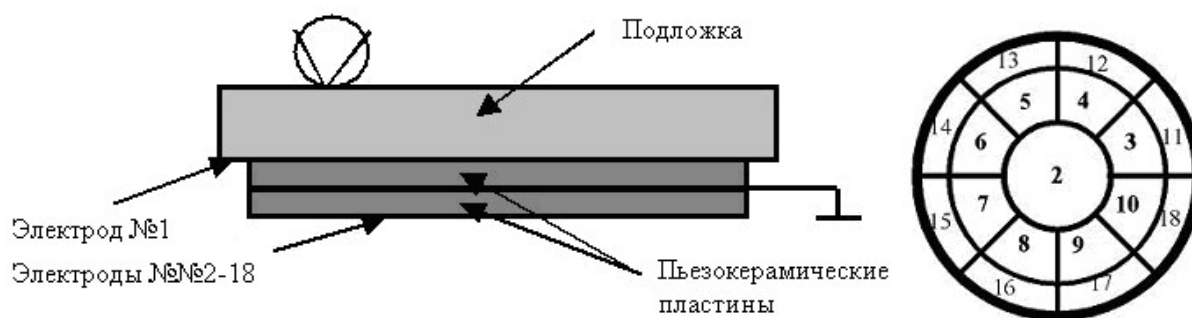


Рис. 2. Конструкция биморфного деформируемого зеркала и схема электродов на внешней пьезокерамической пластине

Далее в этом параграфе приводится пример использования интерферометра для исследования функций отклика биморфного зеркала. Функция отклика электрода зеркала – это изменение профиля поверхности зеркала в ответ на воздействие единичного электрического напряжения на данный электрод при нулевых напряжениях на остальных электродах.

Во втором параграфе рассматривается адаптивная система апертурного зондирования. Дано описание используемых методов оптимизации волнового фронта световых пучков. Метод апертурного зондирования заключается в измерении реакции оптимизируемого параметра на небольшие, преднамеренно вносимые фазовые искажения и определении его глобального экстремума. Таким параметром может быть пиковая интенсивность, функционал, пропорциональный мощности излучения, радиус пучка, смещение центра пучка, распределение светового поля в плоскости фокусировки или комбинация этих критериев. Далее в главе дана классификация методов поиска экстремума функции многих переменных,

таких как градиентный метод, метод Ньютона, симплекс-метод, а так же генетический алгоритм. Более детально рассмотрен гибридный метод, на первом этапе работы которого применяется генетический алгоритм, а далее полученный результат оптимизации используется в качестве начального приближения для одного из градиентных методов. Такая комбинация позволяет найти наилучшее решение, чего не гарантируют градиентные методы; скорость сходимости при этом существенно уменьшается по сравнению с использованием генетического алгоритма.

В качестве иллюстрации работы метода покоординатного спуска, генетического и гибридного алгоритмов в третьем параграфе третьей главы показано использование замкнутой системы на лабораторном макете.

Далее в третьем параграфе приводятся результаты использования замкнутой системы для коррекции излучения 40 ТВт фемтосекундного лазера, работающего в Японском исследовательском институте атомной энергии - JAERI. Представленный титано-сапфировый лазерный комплекс был создан для проведения различных физических исследований при фокусировке лазерного излучения на мишени, в частности, для проведения экспериментов по фотоионизации атомов гелия, и при длительности импульсов 40фс, частоте следования 10 Гц и энергии импульса до 600 мДж обеспечивал плотность мощности в фокусе параболического зеркала $2,6 \times 10^{19}$ Вт/см². Использование метода покоординатного спуска в качестве алгоритма управления биморфным зеркалом позволило сфокусировать 75% энергии в пределах первого дифракционного максимума и добиться пиковой интенсивности 2×10^{20} Вт/см² (Рис. 3).

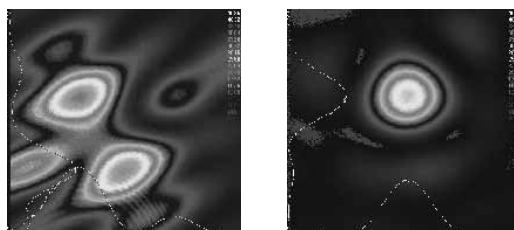


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в фокусе параболического зеркала до (слева) и после (справа) коррекции методом покоординатного спуска

В этом же параграфе представлено использование биморфного зеркала для коррекции непрерывного лазерного излучения твердотельного 100 Вт АИГ:Nd лазера в Национальных лабораториях ДСО, Сингапур. Лазер был собран по схеме генератор-усилитель. В качестве генератора использовался лазерный диод. На Рис. 4-а изображено распределение интенсивности излучения в фокусе линзы до накачки активного элемента. Параметр качества при этом составил по оси X $M_x^2=1,6$, по оси Y $M_y^2=1,7$. При накачке параметр качества M^2 увеличился до $M_x^2=5,1$, $M_y^2=6,5$ (Рис. 4-b). После замыкания цепи обратной связи с использованием гибридного метода удалось достигнуть более чем двукратного уменьшения параметра качества до $M_x^2=2,6$, $M_y^2=2,9$ (Рис. 4-с).



Рис. 4. Распределение интенсивности в дальнем поле. а – без накачки; б – с накачкой без коррекции; с – с накачкой после коррекции

В случае же применения биморфного зеркала в качестве глухого зеркала резонатора лазера, собранного на основе блока усилителя представленного выше лазера, при выходной мощности 500 Вт удалось улучшить параметр качества пучка на 10% без потерь мощности.

Далее в третьем параграфе рассматривается проблема юстировки внеосевых параболических зеркал. Предложен способ юстировки зеркал с использованием M^2 -датчика. Также представлены результаты исследования качества поверхности зеркал при помощи датчика Шака-Гартмана. Описан эксперимент по коррекции аберраций параболических зеркал с использованием биморфного зеркала, приводится сравнение метода покоординатного спуска и метода фазового сопряжения для решения поставленной задачи.

В заклучении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Представлена адаптивная оптическая система, которая позволяет корректировать статические или медленноменяющиеся aberrации мощного лазерного излучения. Система включает биморфное деформируемое зеркало и измеритель M^2 в качестве датчика сигнала ошибки.
2. Рассмотрены методы управления системами апертурного зондирования, подробно описан процесс коррекции лазерного излучения с использованием метода покоординатного спуска, генетического алгоритма и гибридного метода. Продемонстрировано сравнение перечисленных методов при использовании адаптивной системы в лабораторной установке для коррекции aberrаций лазерного излучения.
3. Применение адаптивной системы с применением метода покоординатного спуска к 40 ТВт титано-сапфировому фемтосекундному лазерному комплексу в JAERI (Нара, Япония) позволило значительно улучшить фокусировку лазерного излучения. Продемонстрирована концентрация 75% выходной мощности излучения в первый дифракционный максимум с использованием M^2 -датчика как части адаптивной оптической системы.
4. Использование адаптивной оптической системы с применением гибридного метода в 100 Вт непрерывном АИГ:Nd лазере (Национальные лаборатории ДСО, Сингапур) позволило получить более чем двукратное улучшение качества лазерного излучения при исследовании схемы генератор-усилитель. Также показано, что применение адаптивного корректора в качестве глухого зеркала резонатора 500 Вт многомодового АИГ:Nd лазера, улучшило параметр качества пучка на 10% без потерь мощности.
5. Предложен способ юстировки внеосевых параболических зеркал, основанный на минимизации параметра качества пучка M^2 , который не

требует использования дополнительных юстировочных элементов и обладает достаточной точностью: 1% для угловой ориентации зеркала и 2,3% для среднеквадратичного отклонения величины M^2 .

6. Продемонстрирована возможность коррекции аберраций внеосевых параболических зеркал с использованием датчика Шака-Гартмана в качестве диагностирующего элемента, проведено сравнение метода покоординатного спуска и метода фазового сопряжения для решения поставленной задачи.
7. Показано, что общая ошибка измерений M^2 -датчика может быть минимизирована путём подбора соответствующих элементов прибора и определяется, в основном, шумовым сигналом ПЗС-камеры, её пространственным разрешением и флуктуациями лазерного излучения.
8. Генерация опорных волновых фронтов позволяет использовать датчик типа Шака-Гартмана для пучка любой апертуры (в пределах конструктивных возможностей датчика) без предварительной записи большого количества опорных картин для разных диаметров пучка, а так же уменьшить ошибку, связанную с несоответствием диаметра измеряемого и опорного пучков.
9. Предложенная процедура идентификации экстремумов при обработке интерференционных картин позволяет повысить точность диагностики сложных по форме оптических элементов и сократить время анализа интерферограмм.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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*, том 20, № 4, сс.380-383 (2007)
2. Е.А.Орленко, Т.Ю.Черезова, Ю.В.Шелдакова, А.В.Кудряшов, «Внеосевые параболические зеркала: способ юстировки, измерение и коррекция аберраций», *Оптический журнал* № 72, сс. 306-312 (2005)
3. Yu.Akahane, J.Ma, Yu.Fukuda, M.Aoyama, H.Kiriyama, J.Sheldakova, A.Kudryashov, K.Yamakawa, «Characterization of wave-front corrected 100 TW, 10 Hz laser pulses with peak intensities greater than 10^{20} W/cm²», *Review of Scientific Instruments*, Vol. 77(2), pp.023102, (2006)
4. Yu.Akahane, J.Ma, Yu.Fukuda, M.Aoyama, H. Kiriyama, N.Inoue, K.Tsuji, Y. Nakai, Y.Yamamoto, J.V.Sheldakova, A.V.Kudryashov, K.Yamakawa, «Generation and Evaluation of a 10^{20} W/cm² Intensity by Focusing Wavefront Corrected 100 TW, 10 Hz Laser Pulses», *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, № 8, pp. 6087-6089, (2005)
5. А.Г.Александров, В.Е.Завалова, А.В.Кудряшов, А.Л.Рукоуев, В.В.Самаркин, Ю.В.Шелдакова, Т.Ю.Черезова, «M²-датчик для задач адаптивной оптики», *МГОУ-XXI-Новые технологии* № 6, сс. 5-10 (2005)
6. 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* 6452, pp. 645207 (2007)
7. J.V.Sheldakova, V.V.Samarkin, A.V.Kudryashov, «Correction of the radiation of 1kW CW diode pumped glass laser», *Proc. SPIE* 6101, pp. 61010B (2006)
8. J.V.Sheldakova, T.Y.Cherezova, A.V.Kudryashov, «Genetic and hill-climbing algorithms for high power laser beam correction», *Proc. SPIE* 5975, pp. 265-272 (2005)
9. Julia V Sheldakova, Tatyana Y Cherezova, Alexander G Aleksandrov, Alexey L Rukosuev, Alexis V Kudryashov, «The use of M2 meter to correct for high-power laser aberrations», *Proc. SPIE* 5708, pp. 352-359 (2005)
10. J.Sheldakova, A.L.Rukosuev, A.V.Kudryashov, «Genetic and hill-climbing algorithms for laser beam correction», *Proc. SPIE* 5333, pp. 106-111 (2004)
11. J. Sheldakova, A. Rukosuev, A. Alexandrov, A. Kudryashov, «Multy-dither adaptive optical system for laser beam control», *Proc. SPIE* 4969, pp. 115-121 (2003)
12. Y.V.Sheldakova, T.Y.Cherezova, A.V.Kudryashov, «Analysis of the laser intensity distribution». *Proc. SPIE* 4900, pp. 367-372 (2002)

13. T.Y.Cherezova, Y.V.Sheldakova, A.V.Kudryashov, «Low-cost laser-beam analyzer», *Proc. SPIE* **4629**, pp. 122-128 (2002)
14. Y.V.Sheldakova, T.Y.Cherezova, A.V.Kudryashov, «M²-sensor for the adaptive optical system». *Proc. SPIE* **4644**, pp. 392-399 (2002)
15. J.V.Seldakova, T.Y.Cherezova, A.Kudryashov, «Low-cost M²-sensor for the adaptive optical system». *Proc. SPIE* **4493**, pp. 285-293 (2002)
16. Kostylev A., Sobolev A., Sheldakova Y., Cherezova T., Kudryashov A., «Intracavity adaptive optics: any distance formation», *Technical Program of XII Conference on Laser Optics*, p. 66 (2006)
17. Akahane, Y.; Aoyama, M.; Kiriya, H.; Fukuda, Y.; Inoue, N.; Ueda, H.; Tsuji, K.; Nakai, Y.; Yamamoto, Y.; Yamakawa, Y.; Sheldakova, Y.V.; Kudryashov, A.V., «Wavefront correction of 100-TW, 10-Hz Ti:sapphire laser pulses and new approach to access 10²³ W/cm²», *Technical Program of III Int. Conf. for Young Scientist on Laser Optics (LOYS)*, p. 16 (2006)
18. 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)
19. 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)
20. A.Yu.Kostylev, A.S.Sobolev, Yu.V.Sheldakova, T.Yu.Cherezova, A.V.Kudryashov, «Genetic algorithm for intracavity bimorph mirror control», *Proc. of LFNM 2006 (8nd International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling)*, pp.438-441, (2006)
21. T.Cherezova, A.Sobolev, A.Kudryashov, Yu.Sheldakova, V.Samarkin, «Tiny multilayer deformable mirror», *Proc. of LFNM 2006 (8nd International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling)*, pp.348-351, (2006)
22. Kudryashov, A.V.; Samarkin, V.V.; Aleksandrov, A.G.; Rukosuev, A.L.; Zavalova, V.E.; Sheldakova, J.V. «High power lasers and adaptive optics», *Proc. of CLEOE.2005*, p.419, (2005)
23. 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)
24. Yamakawa, K.; Ma, J.; Akahane, Y.; Aoyama, M.; Fukuda, Y.; Kiriya, H.; Tajima, T.; Kudryashov, A.; Sheldakova, J., «Wavefront correction of a 100-TW, 10-Hz Ti:sapphire laser system and the method aiming at 10²³ W/cm² in a petawatt Ti:sapphire amplifier chain», *Proc. of LEOS 2005 (The 18th*

- Annual Meeting of the IEEE Lasers&Electro-Optics Society), pp.617-618, (2005)
25. 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), **1**, p.209 (2005)
 26. Akahane, Y.; Aoyama, M.; Kiriyama, H.; Fukuda, Y.; Inoue, N.; Ueda, H.; Tsuji, K.; Nakai, Y.; Yamamoto, Y.; Yamakawa, Y.; Sheldakova, Y.V.; Kudryashov, A.V., «Wavefront correction of a 100TW high-peak-power, ultrashort laser pulse», *Proc. Of Quantum Electronics Conference*, 2004. (IQEC). International Volume , Issue , pp. 1037 – 1039 (2004)
 27. J.Sheldakova, A.Kudryashov,A.Rukosuev,P.Romanov. «Closed loop adaptive optical system based on combined genetic and hill-climbing algorithms», *Proc. of 2004 AMOS Technical Conference*, pp. 331-336 (2004)
 28. Yu.V.Seldakova, T.Yu.Cherezova, A.Kudryashov, «The M²-sensor for the adaptive optical system». *Proc. 3rd Int. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 23-26 July 2001, Albuquerque, NM, USA, Ed. Sergio R.Restano & Scott W.Teare, pp. 27-34, Starline Printing, Inc, (2002)
 29. Кудряшов А.В., Черезова Т.Ю., Шелдакова Ю.В., «M²-датчик для адаптивных систем», VII Междунар. конф. «Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения»: *программа и аннотации докладов*. 22-26 июня 2001 г., Владимир – Суздаль/ Под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева. – ИПЛИТ РАН, Шатура – ВлГУ, Владимир, – с.119. (2001)
 30. Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Шелдакова Ю.В. Автоматизированный измеритель параметра качества лазерного излучения M2 (BQF-1). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006612060. 15.06.2006.
 31. Шелдакова Ю.В., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В. Анализатор распределения интенсивности лазерного излучения (M2-Sensor). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002610978. 19.06.2002.
 32. Кудряшов А.В., Рукосуев А.Л., Шелдакова Ю.В. Программа обработки интерференционных картин с дополнительно введённым наклоном (Interf5). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005612060. 16.06.2005.
 33. Кудряшов А.В., Шелдакова Ю.В., Самаркин В.В. Программа автоматического управления биморфным зеркалом в замкнутой петле обратной связи (CILoop9). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610575. 04.03.2005.

Отпечатано на участке оперативной полиграфии
Мебельного комбината г.Шатура
140700, г.Шатура Московской обл., Ботинский проезд 37

Заказ № 2 от « 15 » апреля 2007г. Тираж 100 экз.