

Работа выполнена в Институте прикладной физики
Российской академии наук (г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

Кирсанов Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ФИЛЬТРОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ВЫСОКИМ
РЕСУРСОМ РАБОТЫ ДЛЯ МНОГОКАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С
КАЧЕСТВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЗКИМ К ДИФРАКЦИОННОМУ**

01.04.21 – лазерная физика, технические науки

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород, 2012

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кожеватов Илья Емельянович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Скворцов Михаил Николаевич

кандидат физико-математических наук,
Кулагин Олег Валентинович

Ведущая организация: Институт лазерно-физических исследований
(ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская
область)

Защита состоится « 24 » мая 2012 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д 003.024.01 при Институте лазерной физики СО
РАН по адресу: 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института прикладной
физики РАН и Института лазерной физики СО РАН.

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Н.Г.Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В последнее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к разработке мощных лазерных установок, генерирующих фемтосекундные импульсы субпетаваттного и петаваттного уровня мощности [1-3, 1*-7*]. Это обусловлено такими фундаментальными и прикладными задачами, как проблема управляемого термоядерного синтеза и исследование взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, включая плазму, что, в частности может быть использовано для формирования пучков заряженных частиц высоких энергий.

Методом повышения мощности лазерного излучения является усиление частотно-модулированных импульсов с их последующим сжатием на дифракционных решетках в вакуумных компрессорах [4]. При этом возможно либо непосредственное усиление chirпированного импульса в усилителях на неодимовом стекле, либо использование более широкополосных параметрических усилителей или усилителей на Ti-сапфире, в которых вторая гармоника неодимового лазера служит накачкой [2]. На сегодняшний день фосфатное и силикатное стекло допированное ионами неодима (Nd:glass) как активная лазерная среда не имеет конкурентов по объему и апертуре создаваемых активных элементов в сочетании с высоким оптическим качеством. Поэтому лазеры и усилители на Nd:glass являются неотъемлемой частью практических всех мощных лазерных систем. Для эффективного преобразования излучения неодимового лазера во вторую гармонику необходимо иметь на выходе лазерного комплекса на неодимовом стекле качество излучения близкое к дифракционному. Высокое качество излучения достигается при решении целого комплекса задач, среди которых важнейшими являются создание эффективных лазерных усилителей и обеспечение их функционирования при плотностях энергий 5-10 Дж/см² без повреждения оптических элементов, что достигается при использовании пространственной фильтрации излучения. В данной работе указанные задачи решались применительно к разработке 300 Дж 1 нс усилителя накачки на неодимовом стекле субпетаваттного комплекса PEARL [1*] (ИПФ РАН, Н.Новгород), однако полученные результаты могут быть использованы при создании любых мощных лазерных комплексов.

Лазеры с большой энергией выходного импульса, как правило, представляют собой цепочку лазерных усилителей (квантронов), диаметр которых увеличивается от входа к выходу [1-3]. Важной задачей является разработка и оптимизация отражателей квантронов, которые позволяют обеспечить эффективную и однородную по сечению активного элемента накачку, с одной стороны, и снизить энергоемкость установки как целого, с другой стороны. В настоящее время одними из наиболее эффективных являются зеркальные отражатели со специальной формой поверхности и серебряным покрытием [5]. Основной проблемой при использовании таких отражателей

является быстрое снижение отражающей способности вследствие окисления серебра. Предложенная в данной работе замена серебряного покрытия на алюминиевую пленку MIRO с оксидированным защитным слоем [6] позволила существенно (до нескольких лет) повысить ресурс работы квантронов без регламентного обслуживания. Разработанная технология крепления фольги MIRO на ребрах жесткости специальной формы существенно удешила процесс изготовления отражателей по сравнению с аналогами, выполненными из цельных металлических заготовок с последующим серебряным покрытием. Помимо высокого ресурса работы разработанные отражатели позволили вдвое снизить энергоемкость квантронов и всей установки в целом.

Наряду с лазерными усилителями ключевыми элементами многокаскадных лазерных комплексов являются пространственные фильтры (ПФ), которые выполняют целый ряд задач. Телескопы ПФ согласуют диаметр пучка с апертурой усилителей и переносят изображение последовательных плоскостей, проходящих через активные элементы усилителей, тем самым, уменьшая вариации интенсивности в них. Диафрагмы, установленные в фокальной плоскости линз телескопов ПФ, уменьшают угол видения усилителей, что предотвращает их самовозбуждение из-за паразитных отражений, понижают уровень спонтанной люминесценции усилителей [13] и подавляют мелкомасштабную самофокусировку (ММС).

Разработка пространственных фильтров для лазерных комплексов требует решения целого ряда научно-технических задач. Так, для повышения стабильности диаграммы направленности излучения было необходимо разместить 300 Дж Nd-glass усилитель комплекса PEARL на одном оптическом столе с размером 1.2x4.5 м, что поставило задачу создания компактных ПФ. В то же время ПФ с экономически доступной сферической оптикой не могут иметь короткофокусные линзы, так как последние вносят в пучок сферическую абберацию [15]. Определенные требования на конструкцию всего ПФ накладывает наличие диафрагмы в фокусе линз. Поскольку диафрагма ПФ отсекает высокочастотные составляющие пространственного спектра излучения для предотвращения пробоев оптических элементов, ее диаметр не должен превышать 20-30 дифракционных пределов. С другой стороны, размер диафрагмы должен быть достаточно большим для того, чтобы на краях диафрагмы вследствие высокой интенсивности излучения не возникла плазма, и лазерный импульс проходил через диафрагму без искажений. Для надлежащего функционирования ПФ необходимо также создать методику настройки (юстировки) диафрагмы по продольной и поперечной координате. Большая, в десятки и сотни метров, длина оптического пути в мощных лазерных установках [1-3, 1*], флуктуации окружающей температуры на доли градусов, связанные с тепловыделением в аппаратуре, вызывают неизбежные изменения в настройке положения проходящего излучения в фокальной плоскости ПФ относительно диафрагмы. Это приводит к необ-

ходимости разработки методов постоянного контроля положения диафрагмы ПФ и ее подстройки.

В зависимости от типа исполнения можно выделить 2 наиболее распространенных вида ПФ. Пространственные фильтры могут быть изготовлены, например, в виде цельного вакуумированного телескопа Кеплера с жестко закрепленными линзами и диафрагмой в расчетном месте. В этом варианте исполнения настройка ПФ осуществляется с помощью внешних заводящих зеркал [1,10,11], что в цепочке каскадов усилителей требует обязательной подстройки всех последующих зеркал с проверкой попадания на активные элементы и дальнейшей коррекции направления излучения. Для большеапертурных лазерных систем, таких как ИСКРА-5 [12], характерно исполнение ПФ в виде отдельно стоящих линз большого диаметра (от 0.5 до 1 метра в диаметре) и вакуумированной кюветы с диафрагмой, расположенной в фокальной плоскости транспортного телескопа. Для создания 300 Дж компактного лазера накачки на неодимовом стекле [8*,9*] для субпетаватного фемтосекундного комплекса PEARL потребовалась существенная доработка конструкции ПФ и, соответственно, создание новых методик настройки диафрагмы ПФ.

Отдельной задачей юстировки тяжелых оптических элементов установки PEARL, таких как дифракционные решетки, является проблема минимизации угловых отклонений при их перемещении. В силу технологических причин при изготовлении систем прецизионного позиционирования не удастся обеспечить параллельность осей перемещения элементов качения, что приводит к возникновению угловых микроотклонений, которые приводят к разъюстировке системы. Разработанные в диссертации методы компенсации микроотклонений позволяют на порядок уменьшить возможные микроотклонения в системах линейного перемещения. Аналогичные принципы могут быть использованы также в системах углового перемещения. Разработанные в диссертации системы прецизионного перемещения оптических элементов могут служить элементной базой любых мощных лазерных комплексов, а также использоваться в широком круге физических экспериментах.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы являлась разработка и создание эффективных лазерных усилителей с высоким ресурсом работы и компактных вакуумных пространственных фильтров с дистанционно управляемой диафрагмой для многокаскадных лазерных усилителей. Для этого было необходимо решить ряд задач, включая разработку оптимальной конструкции ПФ, создание оборудования для телеметрического контроля положения диафрагмы; разработку методик ручной и автоматической настройки положения диафрагмы ПФ, экспериментальную проверку работоспособности предложенных отражателей квантронов в различных комплектациях для активных элемен-

тов различного диаметра; разработку комплекса технологической оснастки для изготовления отражателей квантронов. Дополнительной задачей работы являлась разработка методов компенсации микроотклонений в системах линейного и углового перемещения.

Научная новизна

В результате выполнения работы:

1. разработана серия пространственных фильтров для многокаскадных лазерных усилителей, конструктивные особенности которых удовлетворяют противоречивым требованиям функционирования ПФ: их компактности, с одной стороны, и качества излучения близкого к дифракционному, с другой. Отличительной особенностью разработанных ПФ является размещение диафрагмы в кювете пространственного фильтра на компактной прецизионной вакуумной трехкоординатной системе линейного перемещения с шаговыми двигателями в качестве исполняющих механизмов, что позволяет дистанционно управлять взаимным расположением диафрагмы и проходящего через нее лазерного излучения, а также выводить диафрагму из области перетяжки пучка для настройки транспортного телескопа;
2. разработаны методики настройки продольного и поперечного положения диафрагмы ПФ в ручном и автоматическом режиме; разработана методика экспресс-контроля продольного положения диафрагмы на основе ИК-визуализатора;
3. предложена, экспериментально проверена и запущена в опытную серию конструкция отражателей для лазерных усилителей с отражающей поверхностью из алюминиевой фольги с оксидным покрытием, что позволило существенно (до нескольких лет) повысить ресурс работы квантронов без регламентного обслуживания. Разработана технология клейки фольги в ребра жесткости специальной формы.
4. предложена и экспериментально реализована система компенсации микроотклонений в системах линейного перемещения (трансляторах) за счет контролируемого изгиба направляющих элементов качения. При использовании предложенного метода удалось уменьшить микроотклонения до единиц угловых секунд.

Практическая значимость диссертационной работы

Разработанные автором отражатели квантронов и пространственные фильтры являются важнейшими элементами ряда компактных лазерных комплексов с рекордными параметрами по мощности излучения (до 0.56 ПВт в комплексе PEARL с длительностью импульса 43 фс).

Сконструированные отражатели для выходных каскадов усиления мощных многокаскадных лазеров позволили поднять эффективность накачки выходных каскадов более чем в два раза. Используемая в качестве отража-

тельной поверхности алюминиевая пленка MRO [6] показала более высокие эксплуатационные качества, чем отражатели на основе посеребрённых поверхностей.

Найденное при разработке пространственных фильтров техническое решение - исполнение устройства юстировки диафрагмы в виде отдельного унифицированного для всех ПФ блока - позволяет легко извлекать его для регламентного обслуживания систем перемещения и для замены диафрагмы. При монтаже установки блок юстировки жестко закрепляется внутри вакуумной трубы с помощью распорных винтов. Созданная аппаратура телеметрического контроля положения диафрагмы и программно-аппаратная система юстировки диафрагмы позволяет оперативно осуществлять автоматическую настройку ее положения относительно проходящего излучения.

Предложенная автором система компенсации микроотклонений в элементах линейного перемещения может быть использована для систем юстировки вакуумных компрессоров, в которых необходимо перемещать массивные дифракционные решетки без угловых отклонений штрихов или плоскостей отражения.

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкция зеркальных двухсекционных отражателей с формой, близкой к эвольвенте на основе алюминиевой фольги с защитным оксидным слоем, позволяет существенно увеличить КПД и ресурс выходных каскадов лазерных усилителей и упростить технологию изготовления и сборки;
2. Конструкция пространственных фильтров, выполненных в виде вакуумированной кюветы с расположенной внутри нее системой позиционирования селективирующей диафрагмы и юстируемыми линзами в качестве вакуумных окон, позволяет компактно разместить на одном оптическом столе шестикаскадный лазер накачки на неодимовом фосфатном стекле с параметрами 300 Дж/1 нс и качеством излучения, близким к дифракционному.
3. Унифицированные для всех пространственных фильтров (ПФ) установки трехкоординатные устройства систем линейного позиционирования селективирующих диафрагм на основе шаговых двигателей в качестве исполняющих механизмов, методики и аппаратно-программного комплекса юстировки обеспечивают автоматическое позиционирование диафрагм ПФ в вакууме по трем координатам с высокой (до 3-5 мкм) точностью и стабильностью положения диафрагм после настройки;
4. Введение компенсирующего упругого изгиба направляющих в устройство прецизионного позиционирования массивных оптических элементов (например, дифракционных решёток) при осуществлении контроля на основе специально разработанного автоколлиматора позволяет существенно (до единиц угловых секунд) уменьшить микроотклонения при линейном перемещении.

Публикации и апробация результатов

В общей сложности по теме диссертации соискатель имеет 26 публикаций, в том числе 7 статей в реферируемых научных журналах, 1 препринт, 18 публикаций в сборниках трудов конференций. Результаты, представленные в Главе 3, стали основой двух патентов на изобретения Российской Федерации. Статьи по теме диссертации опубликованы в журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации, в том числе «Письма ЖЭТФ», «ПТЭ», «Квантовая электроника», «Applied Optics», «Laser Physics Letters», «Optics Express» и др. Результаты работы неоднократно докладывались и получили одобрение на российских и международных конференциях: Laser Optics 2006, 2008, 2010; CLEO/EUROPE 2008; Advanced Solid-State Photonics 2005, 2007; ULIS 2007; Лазерная физика и оптические технологии 2008 и др. Разработанная модель пространственного фильтра награждена дипломом и медалью 7-й Международной специализированной выставки Лаборатория-Экспо-2009 (Всероссийский выставочный центр). Несколько комплектов ПФ были закуплены у ИПФ РАН ЗАО «Лазерная физика», г. Санкт-Петербург и ИЛФИ-ФНИИЭФ, г. Саров.

Личный вклад автора.

Данная диссертационная работа посвящена решению ряда научно-технических проблем, возникших в процессе разработки в ИПФ РАН субпетаваттного комплекса PEARL. В этой работе принимал участие большой коллектив сотрудников ИПФ РАН под руководством Хазанова Е.А., в соавторстве с которыми опубликована часть статей по теме диссертации. В то же время большинство технических вопросов создания лазера накачки на неодимовом стекле для комплекса PEARL решалось непосредственно автором диссертации. В частности, Кирсановым А.В. предложена и экспериментально проверена новая конструкция зеркальных отражателей ламп для квантронов с большим ресурсом, что позволило существенно увеличить эффективность выходных каскадов лазера накачки. Кирсанову А.В. также принадлежит разработка конструкции и техническая реализация пространственных фильтров нового поколения, что позволило повысить качество излучения и стабильность лазера накачки, и разработка методов автоматической юстировки. В полученных Кирсановым А.В. по результатам диссертации патентах отражен новый подход к компенсации угловых отклонений в прецизионных системах позиционирования.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка, включающего 60 наименований. Работа изложена на 129 листах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 2 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, а также основные положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна полученных результатов и их практическая ценность. Кратко, по главам, изложено содержание диссертации.

В первой главе обсуждаются основные проблемы достижения высоких параметров выходного излучения в лазерах накачки параметрических усилителей петаваттного уровня мощности и методы их решения. В разделе 1.1 описывается общая схема шестикаскадного лазера на неодимовом стекле [8*,9*], вторая гармоника которого используется в качестве накачки для выходного каскада параметрического усилителя субпетаваттного комплекса «PEARL». Подробно рассмотрены научно-технические задачи, решение которых позволило достичь рекордных параметров (300 Дж 1 нс) лазера накачки, размещенного на одном оптическом столе, в том числе: формирование необходимой пространственной структуры пучка на входе лазера накачки для максимального съема запасенной энергии с усилителя; стабилизация направления распространения лазерного излучения в усилителе; создание эффективных и долговечных лазерных усилителей; подавление самовозбуждения комплекса в целом; обеспечение переноса и масштабирования изображения с усилителя на усилитель; минимизация мелкомасштабной самофокусировки; уменьшение влияния люминесценции предыдущих усилительных каскадов на последующие.

Раздел 1.2 посвящен проблеме стабилизации интенсивности и направления распространения лазерного излучения в Nd:glass лазере накачки, которая решалась путем размещения специальной диафрагменной линии [11*,12*] в блоке формирования пространственной структуры входного излучения.

В разделе 1.3 описана конструкция эффективных отражателей для лазерных усилителей выходных каскадов 300 Дж 1 нс лазера накачки на неодимовом стекле [8*,13*]. Проведено экспериментальное сравнение отражателей, выполненных, как по традиционной схеме с использованием диффузного керсилового (кварцевой керамики) отражателя, так и более эффективной конструкции зеркального отражателя (см. Рис.1), с секциями с формой близкой к эвольвенте окружности с радиусом, равным радиусу лампы. Экспериментально показано, что такой отражатель вдвое снижает энергопотребление каждого используемого усилителя. Существенное повышение ресурса работы и упрощение технологии изготовления квантрона достигнуто за счет использования покрытия на основе пленки MIRO [6] вместо традиционного серебряного. Унифицированный ряд эффективных усилителей с активным элементом большой апертуры (60-100 мм) обладают незначительными азимутальными вариациями поперечного распределения коэффициента усиления, которые легко компенсируются путем поворота усилите-

лей вокруг их оси.

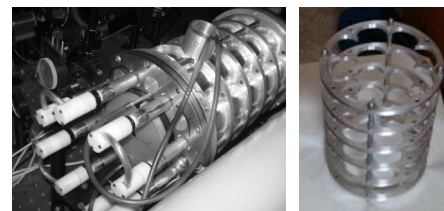


Рис.1 Внешний вид и каркас квантрона с отражателем на основе алюминиевой фольги MIRO с защитным оксидным слоем. Диаметр активного элемента 100 мм.

В разделе 1.4 обосновывается выбор конструкции пространственных фильтров для лазера накачки комплекса «PEARL». Предложена эффективная и компактная схема ПФ с диафрагмой, установленной внутри вакуумной камеры на миниатюрной трехкоординатной системе перемещения [14*-17*]. Линзы Кеплера телескопа используются одновременно в качестве вакуумных окон, что уменьшает количество оптических поверхностей и, соответственно, приводит к улучшению качества пучка. Размещение линз на гибких сильфонах позволяет подстраивать телескоп и выводить паразитные блики из апертуры пучка. Для контроля положения диафрагмы в составе разработанного ПФ предусмотрена система видеомониторинга ее относительного положения (Рис.2).

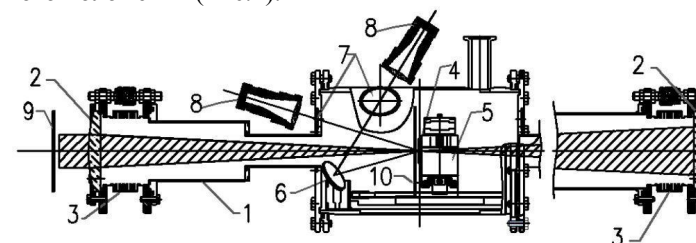


Рис.2 Схема пространственных фильтров, разработанных для 300 Дж 1 нс компактного лазера на неодимовом стекле: (1) – вакуумированная ювета с линзами (2) в качестве окон, закрепленных на гибких металлических сильфонах (3), (4) - диафрагма, закрепленная на блоке юстировки (5), (6) -зеркало для наблюдения за положением диафрагмы, (7) - вакуумное окно, (8) - ПЗС-матрица, (9) - вбрасываемая настроечная диафрагма, (10) – экран отсечки шумов суперлюминесценции.

Во второй главе приведены расчеты и результаты экспериментальных исследований оптических элементов пространственных фильтров – линз и диафрагм.

В разделе 2.1 приведены расчеты радиусов линз ПФ с целью обеспечения минимальной сферической аберрации и комы, вносимой каждой линзой. Показано, что минимум комы находится при соотношении радиусов линзы $R_1 : R_2 = 1:9$ [14*]. При этом сферическая аберрация не минимальна. Однако она увеличивается не более чем на 0.1% от своего

минимума при $R_1 : R_2 = 1 : 6$ для выбранных материала и толщины линз. Полученные результаты подтверждены на основании прямого расчета траектории прохождения луча через линзу.

Раздел 2.2 посвящен выбору оптимального фокусного расстояния линз ПФ для обеспечения минимальной сферической aberrации. В качестве критерия минимальной длины телескопа выбиралось увеличение расходимости пучка из-за сферической aberrации в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с дифракционной расходимостью θ_d . Как показывают расчеты, для однократного телескопа с апертурой $2R = 10$ см и гауссова пучка с радиусом $a = R/2.3$ минимальная длина телескопа будет составлять $2f = 400$ см. Для П-образного пучка при тех же параметрах $2f = 562$ см [17*].

В разделе 2.3 рассматривался вопрос о выборе диаметра диафрагмы пространственного фильтра. С точки зрения подавления мелкомасштабной самофокусировки (ММС) диаметр диафрагмы D для ПФ с фокусным расстоянием входной линзы f , апертурой проходящего излучения a и волновым вектором k , должен удовлетворять неравенству:

$\Theta_{\max} f > D/2 \gg f/ka$, где $\Theta_{\max} = (2\gamma I/n_0^2)^{1/2}$ - угловой масштаб неоднородностей, максимально нарастающих в световой волне интенсивности I при прохождении ее через прозрачный диэлектрик с показателем преломления $n_{NL} = n_0 + \gamma I$. Типичное значение γ для электронной самофокусировки составляет $\gamma = (3 \div 5) \cdot 10^{-7}$ см²/ГВт. Из вышеуказанных соображений в ПФ лазера на неодимовом стекле выбраны размеры диафрагм порядка 1-2 мм [14*-17*].

Помимо подавления ММС диафрагмы таких диаметров уменьшают возможные плотности энергии шумов суперлюминисценции с 15 Дж/см² [7] до приемлемых $w_{ASE} = 5.5 \cdot 10^{-5}$ Дж/см². Для полной отсечки шумов суперлюминисценции усилителей перед диафрагмой ПФ устанавливается экран.

На основе кода «Френель» [13] проведено моделирование прохождения через ПФ реального пучка с неоднородностью профиля интенсивности, обусловленной мелкомасштабной фокусировкой, сделаны оценки потерь для диафрагм диаметром 1 и 3 мм.

В разделе 2.4 приведены результаты эксперименты по измерению деполаризации лазерного излучения проходящего через линзу, зажатую как вакуумное окно. Показано, что при диаметре линзы в 1.6-2 раза больше апертуры проходящего оптического излучения, интенсивность деполаризованной компоненты излучения в рабочей области линзы составляет не более 0.05 % от интенсивности проходящего излучения, что находится на уровне остаточной деполаризации в стекле.



Рис.3. Блок юстировки диафрагмы пространственных фильтров.

В третьей главе описана система прецизионного дистанционного трехмерного позиционирования диафрагмы ПФ с шаговыми двигателями в качестве исполняющего механизма [14*-17*]. В Разделе 3.1 приведено общее описание блока юстировки диафрагмы (Рис.3) в виде вакуумной сборки трех систем линейного перемещения (трансляторов). Каждый транслятор обеспечивает перемещение диафрагмы по одной из трех ортогональных осей X, Y и Z. Система позиционирования диафрагмы унифицирована для всех ПФ многокаскадного усилителя. Проведен расчет нагрузки на каждый из трансляторов.

В Разделе 3.2 подробно описываются системы линейного перемещения (трансляторы) и их электромеханический привод. Трансляторы собраны по схеме направляющих прямолинейного движения с трением качения. В качестве кинематической схемы опорных узлов элементов качения выбрана закрытая четырехточечная призматическая схема с предварительным натягом. Исполняющими механизмами выбраны компактные четырехфазные шаговые двигатели (ШД) типа ДШР-39, имеющие 200 стабильных положений ротора на оборот вала. Один шаг соответствует 1.25 мкм для поперечных координат X и Y при перемещении на 40 мм по горизонтальной оси X и 26 мм по вертикальной оси Y, и 5 мкм для продольной координаты Z при перемещении на 70 мм. Вращение вала ШД, связанного гибкой муфтой с парой винт-гайка, передается в поступательное движение каретки транслятора. Управление шаговыми двигателями осуществляется дистанционно при помощи электронного блока управления, которые представляют собой комбинированное устройство, позволяющее перемещать диафрагму, как в ручном, так и в автоматическом режиме с использованием персональных компьютеров.

Раздел 3.3 посвящен экспериментальному определению точности привода и шаговых двигателей. В качестве метода контроля линейного перемещения выбран развитый в данной работе способ контроля координат изображения на поле ПЗС матрицы. Оптическими средствами на поле ПЗС матрицы передается изображение яркой точки, закрепленной на подвижной части анализируемого транслятора. Разработанная программа с помощью окна захвата определяет положение яркой точки на матрице камеры в пикселях с точностью (среднеквадратичное отклонение координаты) не хуже 1/30 размера пикселя изображения, а в некоторых случаях и выше [18*]. Проведенные эксперименты показали, что системы линейного перемещения с ШД в качестве исполнительных элементов вполне надежно обрабатывают минимальные перемещения в 1-2 шага. Таким образом, технически достижимое минимальное смещение диафрагмы пространственных фильт-

ров для выбранной конструкции исполнительных элементов составляет 2-3 мкм. Экспериментально показано, что системы позиционирования собственного производства [19*] не уступают по характеристикам зарубежным аналогам [14]

В разделе 3.4 описана система компенсации угловых микроотклонений подвижных частей систем перемещения, которая может быть выполнена за счет введения в конструкцию транслятора элементов подстройки [22*]. За счет этих элементов (Рис.4а) осуществляется контролируемый изгиб системы перемещения, обеспечивающий совмещение осей перемещения элементов качения двух опорных узлов в одной плоскости. Использование предложенного метода позволило на порядок (до единиц угловых секунд) уменьшить угловые отклонения относительно оси перемещения каретки транслятора (Рис.4б). В случае прецизионных систем вращения компенсация отклонений оси вращения может быть осуществлена аналогичным образом [22*].

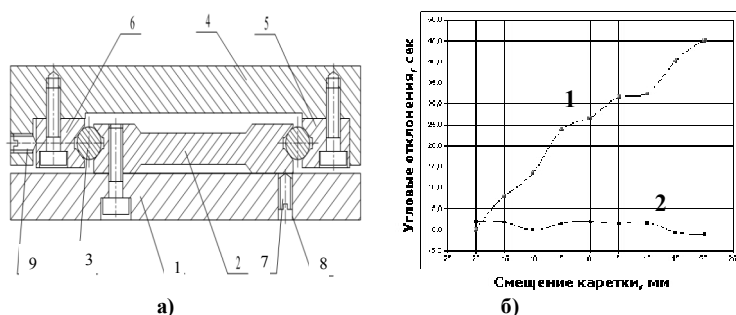


Рис.4 (а) Механизм компенсации микроотклонений: 1 – основание, 2 – регулируемая опорная планка, 3 – элемент качения, 4 – верхняя платформа, 5, 6 – боковые опорные планки, 7 – элемент регулировки, 8 – отверстие для регулировки, 9 – элемент бокового предварительного натяга. (б) Угловые отклонения до (кривая 1) и после (кривая 2) компенсации.

В четвертой главе диссертации описывается аппаратно-программный комплекс и методика юстировки ПФ в составе Nd-glass 300 Дж 1 нс лазера [24*, 25*].

Раздел 4.1 посвящен настройке пространственных фильтров как Кеплеровых телескопов. Совмещение фокальных плоскостей линз ПФ контролировалось по степени коллимированности выходного излучения и осуществлялось путем размещения вакуумных окон (линз Кеплеровых телескопов) на гибких металлических сильфонах, снабженных системой регулировки наклона и фиксации состояния. Для выведения бликов из апертуры излучения обе линзы пространственного фильтра заклонялись на углы ~2-3 градуса. Компенсация возникающего при этом астигматизма осуществлялась при заклонении выходных линз относительно перпендикулярных осей.

В разделах 4.2 и 4.3 описаны методики настройки продольного и попе-

речного положения диафрагмы ПФ [25*]. На первом этапе для отработки процесса юстировки ПФ использовался метод сканирования пространственной структуры излучения щелью размером 8 мкм. На основе данного метода была определена точность продольного позиционирования диафрагмы, которая, как было выяснено, легко обеспечивается с помощью разработанной системы 3D позиционирования. На последующем этапе процесс сканирования излучения осуществлялся непосредственно диафрагмой ПФ, что позволило избежать введения в кювету ПФ дополнительных устройств. Поскольку метод сканирования оказался достаточно громоздким и неудобным для юстировки ПФ в связи с необходимостью большого количества измерений, были разработаны другие методы настройки, которые позволяли настраивать ПФ за 2-3 минуты.

Для настройки продольного положения диафрагмы был предложен быстрый и надежный метод, реализующийся при размещении перед входной линзой ПФ пластинки-аббератора. При этом рассеянное ей излучение засвечивало все поле диафрагмы, в том числе, и ее края, которые становились резкими на изображении фокальной плоскости Кеплера телескопа в случае точной настройки диафрагмы ПФ. Экспресс-проверку продольной настройки диафрагмы ПФ удобно осуществлять с помощью размещенного на ее поверхности визуализатора лазерного излучения ИК диапазона [25*].

В Разделе 4.3 рассмотрен метод юстировки поперечного положения ПФ по дифракционным кольцам [25*], формируемым при прохождении излучения через дополнительную диафрагму с диаметром в 10-20 раз меньше диаметра пучка, устанавливаемую перед входной линзой ПФ для настройки. Для юстировки диафрагмы в конструкции ПФ была предусмотрена система визуализации на основе внешних видеокамер. Кольцевая структура дальней зоны равномерно засвеченного круглого отверстия (картина Эйри) позволяет очень точно юстировать диафрагму относительно пучка лазера. Повторяемость настройки диафрагмы таким способом совпадала с точностью позиционирования подвижки диафрагмы, т.е. укладывалась в интервал ± 2 мкм. Такой точности настройки достаточно для хорошей повторяемости поперечного распределения лазерного пучка многокаскадного усилителя.

В Разделе 4.3 описан процесс автоматической юстировки диафрагмы (Рис.5) по дифракционным кольцам после грубого попадания пучка в диафрагму. Процедура точной настройки была автоматизирована с помощью компьютерной программы, написанной по следующему алгоритму [24*]:

1) центр дифракционной картины от дополнительной диафрагмы определялся как точка, относительно которой преобразование картины интенсивности (отражение, поворот) в наименьшей степени искажают исходное распределение. При наличии нарушений симметрии картины дифракционных колец небольшая область вблизи центра из рассмотрения исключалась;

2) определялось направление и необходимое перемещение диафрагмы для обеспечения симметрии;

3) исполнительный механизм обрабатывал необходимое смещение диафрагмы;

4) процедура нахождения центра дифракционной картины повторялась до обеспечения полной симметрии дифракционной картинке.

Полная автоматическая настройка диафрагмы одного пространственного фильтра осуществляется за время порядка одной минуты.

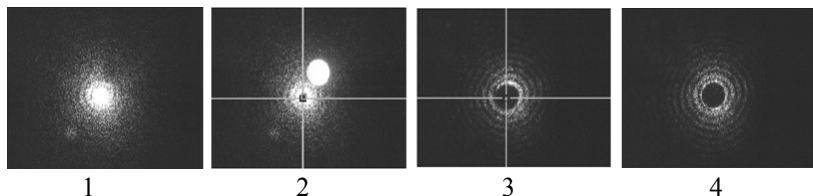


Рис.5 Последовательность настройки диафрагмы пространственного фильтра. 1 - дифракционная картина, формируемая в фокальной плоскости ПФ при прохождении пучка через вбрасываемую диафрагму. Данная структура формируется на материале, из которого изготовлена диафрагма, т.е. излучение через диафрагму не проходит. 2 – подсветка диафрагмы дополнительным источником света либо со стороны входной линзы для определения положения диафрагмы на ПЗС-матрице. 3 – грубое совмещение излучения и диафрагмы. 4 – настроенное положение диафрагмы.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена, экспериментально проверена и запущена в опытную серию конструкция зеркальных отражателей ламп накачки квантронов мощных выходных каскадов усиления, выполненных из алюминиевой фольги с оксидным покрытием, закрепленной на ребрах жесткости специальной формы, близкой к эвольвенте. Использование такой конструкции позволило существенно увеличить КПД (до 2х раз) и ресурс (до 10^3 вспышек) выходных каскадов лазерных усилителей, а также упростить технологию изготовления квантронов.

2. Разработанная новая конструкция пространственных фильтров для многокаскадных лазерных усилителей, выполненных в виде вакуумированной кюветы с расположенной внутри нее системой позиционирования селективной диафрагмы и юстируемыми линзами в качестве вакуумных окон, позволила разместить на одном оптическом столе с размерами 1.2x4.5 м шестикаскадный лазер накачки на неодимовом фосфатном стекле с параметрами 300 Дж/1 нс и расходимостью излучения, не превышающей 3x-4x дифракционных пределов.

3. Разработана вакуумная трехкоординатная система позиционирования диафрагмы пространственных фильтров с шаговыми двигателями в качестве исполняющих механизмов. Экспериментально продемонстрирована точность поперечного позиционирования диафрагмы на уровне 3-5 мкм при полном перемещении 30-40 мм. Созданная аппаратура телеметрического контроля положения и программно-аппаратная система юстировки диафрагмы позволяет оперативно осуществлять ручную и автоматическую настройку ее положения относительно проходящего излучения.

4. Предложена и экспериментально реализована система компенсации микроотклонений в системах линейного и углового перемещения (трансляторах). Компенсация осуществляется за счет введения в конструкцию трансляторов регулировочных элементов, осуществляющих контролируемый изгиб системы с целью совмещения осей перемещения элементов качения (шариков) в одной плоскости. Использование предложенного метода позволило на порядок (до единиц угловых секунд) уменьшить угловые отклонения относительно оси перемещения каретки транслятора.

Список цитированной литературы

1. D.M.Pennington, M.D.Perry, B.C.Stuart, et.al., *Petawatt laser system in Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion: Second Annual International Conference*, M. L. Andre ed., Proc. SPIE, **3047**, 490-500 (1997).
2. O.V. Chekhlov, J.L.Collier, I.N.Ross, et. al. *35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system*, Optics Letters, 2006 p.3665
3. C. N. Danson, P. A. Brummitt, R. J. Clarke, et. al, "*Vulcan petawatt - an ultra-high-intensity interaction facility*", Nucl. Fusion, **44**, S239-S249 (2004)
4. D. Strickland and G. Mourou, "*Compression of Amplified Chirped Optical Pulses*," Opt. Commun. 56, 219 (1985).
5. В.И.Баянов, Е.Г.Бородачев, В.М.Волынкин и др, *Стержневые усилители большой апертуры на фосфатном неодимовом стекле для лазеров с высокой яркостью излучения.*// Кв. электроника, 13, 1891 (1986).
6. Интернет-ресурс <http://www.alanod.com>
7. А.И.Макаров, А.К. Потемкин, *О предельном коэффициенте усиления многокаскадного лазерного усилителя*, Квантовая электроника, 1985, т.12, № 5, с.1054-1058.
8. W.Koehner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer-Verlag New York Inc. 1976.
9. М. Борн, Э. Вольф, «*Основы оптики*», изд. «Наука», М. 1970, С.234-265.
10. R.D.Boyd et al, *Alignment and Diagnostics on the National Ignition Facility Laser System*, 44th Annual Meeting of the International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, Colorado, 1999.
11. Бубнов И.А., Малинова Т.П., Матвеев В.Ю. и др. *Методы и алгоритмы работы юстировочного модуля многопучковой лазерной установки "ИСКРА-6"*// Оптический журнал. - 2006. - № 1. - С.22-28.

12. В.И. Аненков, В.А. Багрецов, В.Г. Безуглов. *Импульсный лазер «Искра-5» с мощностью 120 Твт*. Квантовая электроника. 18, №5, 1991.
13. Епатко И.В., Малютин А.А., Серов Р.В. и др. *Новый алгоритм численного моделирования распространения лазерного излучения* // Квантовая Электроника, v.25, №8, p.717-722, 1998
14. Б.М.Уваров, В.А.Бойко, В.Б.Подаревский, Л.И.Власенко; *Детали и механизмы приборов*, справочник, Киев 1987., стр. 138 -139.
15. *Справочник конструктора точного приборостроения*, //Машиностроение, Ленинград, 1989г.
16. *Справочник конструктора оптико-механических приборов*. Кругер М.Я. и др. Изд. «Машиностроение», Ленинград, 1968г.
17. Интернет-ресурс <http://www.standa.lt>

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1*. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals*// Laser Physics Letters, 2007, v.4, № 6, p.421-427.
- 2*. Ложкарев В.В., Гаранин С.Г., Герке Р.Р., Гинзбург В.Н., Катин Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартьянов М.А., Палашов О.В., Потемкин А.К., Рукавишников Н.Н., Сергеев А.М., Сухарев С.А., Хазанов Е.А., Фрейдман Г.И., Чарухчев А.В., Шайкин А.А., Яковлев И.В. *100 тераваттный фемтосекундный лазер на основе параметрического усиления*// Письма в ЖЭТФ, 2005, т.82, № 4, с.196-199.
- 3*. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V., Garanin S.G., Sukharev S.A., Rukavishnikov N.N., Charukhchev A.V., Gerke R.R., Yashin V.E. *200 TW 45 fs laser based on optical parametric chirped pulse amplification*, Optics Express, 2006, v.14, № 1, p.446-454.
- 4*. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals*// 2006, N.Novgorod: IAP RAS: Preprint IAP #720.
- 5*. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V., Garanin S.G., Rukavishnikov N.N., Sukharev S.A. *OPCPA at petawatt level*// Proc. of International Conference on Ultra Intense Laser Interaction Sciences (ULIS 2007), Bordeaux, France, 2007, p.21.

6*. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Toward multi-petawatt laser based on chirped pulse optical parametric amplification*// Proc. of Int. Conf. Frontiers of Nonlinear Physics, Nizhny Novgorod – Saratov - Nizhny Novgorod, 2007, p.18-19.

7*. A.A. Shaykin, G.I. Freidman, S.G. Garanin, V.N. Ginzburg, E.V. Katin, A.I. Kedrov, E.A. Khazanov, A.V. Kirsanov, V.V. Lozhkarev, G.A. Luchinin, L.V. L'vov, A.N. Mal'shakov, M.A. Martyanov, V.A. Osin, O.V. Palashov, A.K. Poteomkin, N.N. Rukavishnikov, V.V. Romanov, A.V. Savkin, A.M. Sergeev, S.A. Sukharev, O.V. Trikanova, I.N. Voronich, I.V. Yakovlev, and B.G. Zimalin. *Petawatt OPCPA laser in Russia : status and expectations*. in CLEO /EUROPE-EQEC 2009, Munich.

8*. Poteomkin A.K., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. *Compact 300 J/ 300 GW frequency doubled neodymium glass laser. Part II: Description of Laser setup*// IEEE Journal of Quantum Electronics, v.45, №7, p.854-862, 2009.

9*. Poteomkin A.K., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Malshakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Shaykin A.A. *Compact neodymium phosphate glass laser emitting 300J/300GW pulses for pumping of a chirped pulse optical parametric amplifier*// Laser Optics 2006: Solid State Lasers and Nonlinear Frequency Conversion, Proc. SPIE v.6610, p.661005-1-661005-11.

10*. Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. *Beam input system for Nd:glass amplifier*// Proc. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, St. Petersburg, Russia, 2005 , p.Lf112.

11*. Martyanov M.A., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. *Beam profiling in 100 J 1 ns Nd:glass laser*. //Proc. of Int. Symp. «Topical Problem of Nonlinear Wave Physics» St.Petersburg - N.Novgorod, 2005, p.82-83.

12*. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Shaykin A.A., Zelenogorsky V.V. *Transport telescopes for 300 J 1 ns multi-cascade Nd:glass amplifier*// Proc. of International Conference on High Power Laser Beams, Nizhny Novgorod - Yaroslavl - Nizhny Novgorod, 2006, p.87.

13*. А.К. Потемкин, К.А. Журич, А.В.Кирсанов, Е.А. Копелович, М.В. Кузнецов, А.А. Кузьмин, Ф.А. Флаг, Е.А. Хазанов, А.А. Шайкин *Эффективные широкоапертурные стержневые усилители на неодимовом стекле*// Квантовая электроника, т.41, №6, с.487–491, 2011.

14*. Потемкин А.К., Катин Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартьянов М.А., Матвеев А.З., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Компактный лазер на фосфатном стекле с неодимом с энергией 100 Дж и мощностью 100 ГВт для накачки параметрического усилителя chirпированных импульсов*// Квантовая электроника, 2005, т.35, № 4, с.302-310.

15*. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. *Spatial filters for multistage laser amplifiers*// Laser Optics 2006:

Solid State Lasers and Nonlinear Frequency Conversion_Proc. SPIE v.6610, p.66100H-1-66100H-12.

16*. Poteomkin A.K., Barmashova T.V., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. *Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers.*// Applied Optics, 2007, v.46, № 20, p.4423-4430.

17*. Кирсанов А.В., Бармашова Т.В., Зеленогорский В.В., Потемкин А.К. *Автоматизированный двухкоординатный автоколлиматор для измерений малых угловых отклонений*, Приборы и техника эксперимента, 2009, т.52, № 1, с. 155-157.

18*. Туркин А.А., Зеленогорский В.В., Кирсанов А.В. *Прецизионное измерение линейных перемещений подвижных частей трансляторов с помощью видеокамеры с точностью до 100 нанометров.*// Сб. докл. XVII ВНТК "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве", г.Нижний Новгород, 2006, р.6.

19*. Интернет-ресурс <http://www.optomech.ru>

20*. Бармашова Т.В., Кирсанов А.В., Зеленогорский В.В., Потемкин А.К. *Экспериментальное исследование угловой стабильности трансляторов с помощью автоматизированного комплекса на основе видеокамеры и полупроводникового лазера.*// Сб. докл. XVII ВНТК "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве", г.Нижний Новгород, 2006, р.8.

21*. Кирсанов А.В., Гинзбург В.Н., Катин Е.В., Ложкарев В.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартьянов М.А., Палашов О.В., Потемкин А.К., Шайкин А.А., Хазанов Е.А. *Прецизионные оптико-механические узлы в субтетаваттном фемтосекундном лазере.* Труды VII Международная научная конференция "Лазерная физика и оптические технологии", г.Минск, Беларусь, 2008, т.2 с. 133-135.

22*. Кирсанов А.В. *Устройство для прецизионного линейного перемещения оптических элементов.* //Патент на изобретение № 2348952 по заявке № 2007114671 от 18.04.2007 г.

23*. Кирсанов А.В. *Устройство для прецизионного вращения оптических элементов.* //Патент на изобретение № 2365950 по заявке № 2008100334 от 09.01.2008 г.

24*. Бармашова Т.В., Зеленогорский В.В., Кирсанов А.В., Катин Е.В., Мартьянов М.А., Потемкин А.К. *Система автоматизированной юстировки диафрагм пространственных фильтров для каскадов мощных лазерных усилителей.*// Сб. докл. XVII ВНТК "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве", г.Нижний Новгород, 2006, р.9.

25*. Kirsanov A.V., Khazanov E.A., Luchinin G.A., Martyanov M.A., Poteomkin A.K., Shaykin A.A. *Pinhole alignment of the spatial filters for 300J Ins multistage Nd:glass amplifier.*// Proc. of International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/ International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, Minsk, Belarus, 2007, p.L05-12.

Кирсанов Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ФИЛЬТРОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ВЫСОКИМ
РЕСУРСОМ РАБОТЫ ДЛЯ МНОГОКАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С
КАЧЕСТВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЗКИМ К ДИФРАКЦИОННОМУ**

Автореферат

Подписано к печати 18.04.12. Формат 60 × 90 ¹/₁₆.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 150 экз. Заказ № _____.

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46