

УДК 681.7.069.24

**ФОКУСИРОВКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОЩНЫХ  
ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ**  
(аналитический обзор исследований в России)

В. И. Баринов

Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации, Москва, Россия

*Представлено состояние и направление отечественных исследований и разработок в области фокусировки и распространения в атмосфере лазерного излучения. В рассмотрении наряду с основными физическими процессами, определяющими эффективность фокусировки мощного излучения, включены также перспективные фокусирующие элементы и устройства, реализованные на базе достижений линейной, нелинейной и адаптивной оптики.*

**ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Лазерная техника нашла многообразные применения в науке и на практике. Сегодня научно-технический уровень любой страны в значительной мере определяется широтой проводимых лазерных исследований и интенсивностью внедрения лазерных технологий. При этом наряду с продолжающимся прогрессом в развитии собственно лазеров и увеличении их мощности значительно возрос удельный вес исследований и разработок, связанных с доставкой лазерного излучения заданного качества (размер пятна, равномерность облучения, форма и длительность импульса и др.) к тем или иным объектам. Как следствие, особое место заняли взаимосвязанные проблемы фокусировки и распространения лазерного излучения и, прежде всего, в атмосфере. Ведь для успешного использования лазерных систем связи и передачи энергии, локации, дальнометрирования и других приложений необходимы количественные данные о влиянии окружающей среды на параметры луча. При этом необходимая дальность транспортировки лазерной энергии может меняться в огромных пределах: от долей и единиц метров (в технологических установках) до сотен километров, как, например, в уже реально поставленной задаче передачи энергии с Земли на низкоорбитальные космические аппараты [1].

Распространение лазерного излучения в атмосфере сопровождается обычно весьма большим набором явлений линейного и нелинейного взаимодействия [2]. Как правило, ни одно из этих явлений не проявляется в отдельности, хотя в большинстве случаев можно четко выделить доминирующие процессы. По чисто качественным признакам указанные явления можно разделить на следующие основные группы: рефракция лучей лазерного пучка; поглощение энергии лазерного пучка атмосферными газами; рассеяние энергии лазерного пучка частицами аэрозолей и на флуктуациях плотности воздуха; флуктуация параметров лазерных пучков, обусловленная атмосферной турбулентностью; вынужденное рассеяние интенсивного излучения в атмосфере; тепловое самовоздействие лазерных пучков; оптический пробой воздуха. Последние три эффекта характерны для мощных лазерных пучков, обладающих к тому же высокой интенсивностью, т. е. высокой плотностью потока лучевой энергии.

Высокая интенсивность излучения может быть достигнута, по меньшей мере, только в условиях отсутствия возмущений волнового фронта на выходной апертуре лазера и при наличии высококачественной фокусирующей системы. В качестве интегральной меры качества лазерного пучка вне резонатора обычно принимают величину его реальной угловой расходимости [3], которую сравнивают с наименьшей достижимой в дифракционном пределе:

$$\theta = 2,44 \lambda / D,$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;

$D$  — характерный размер апертуры.

Как правило, расходимость излучения лазеров, если не принимать специальных мер, значительно превосходит дифракционную: в 3—6 раз — для газовых и в 10—20 раз — для твердотельных лазеров. К сожалению, именно в мощных лазерах особенности протекающих в них процессов и нелинейных явлений вызывают наибольшие искажения волнового (фазового) фронта выходного излучения, существенно увеличивая его расходимость.

Применение телескопических систем (обычно, типа Кассегрена) позволяет уменьшить эффективную расходимость излучения, но при этом существенно могут возрасти общие габаритные размеры лазерной системы. По этой и ряду других причин коэффициент увеличения телескопических устройств обычно не превышает 2—3 раз, и проблема расходимости ими не решается кардинально.

Во всех случаях мощных лазерных систем требуется высокое качество таких ключевых элементов, как зеркала резонаторов, телескопических и фокусирующих систем. При этом речь идет и о точности воспроизведения необходимой геометрической формы, и о минимизации возможных термодформаций. Особенно остро эти вопросы встали с внедрением в практику наиболее мощных на сегодня непрерывных  $\text{CO}_2$ -лазеров среднего инфракрасного диапазона (с длиной волны 10,6 мкм).

Развитие высокоэнергетических лазерных систем непрерывного действия увеличило потребность в лазерных зеркалах с высоким коэффициентом отражения. Большинство конструкционных материалов (медь, молибден, алюминий), используемых в производстве металлооптики, на длине волны 10,6 мкм имеют коэффициент отражения менее 99 %. Нанесение на полированные поверхности из этих металлов отражающего слоя из меди, серебра, золота позволяет увеличить отражательную способность зеркала до 99,1—99,2 %. Добиться более существенного увеличения коэффициента зеркального отражения на этой длине волны, а, значит, снижения тепловыделения и уровня термодформаций поверхности на зеркалах, изго-

товленных по традиционной схеме (основа с системой охлаждения, отражающее покрытие, защитное покрытие), не представляется возможным.

Однако существует способ увеличения отражательной способности поверхности с помощью многослойных диэлектрических или полупроводниковых покрытий. Такого рода покрытия успешно используются в оптической промышленности для изменения характеристик оптических изделий в ультрафиолетовой, видимой и ближне-инфракрасных областях спектра. Использование явлений интерференции и поляризации света в тонких слоях коренным образом изменяет свойства поверхности, начиная от увеличения коэффициента отражения и кончая сложными селективно-спектральными задачами.

Интерференционные многослойные покрытия, увеличивающие коэффициент отражения исходной полированной поверхности, состоят из чередующихся четвертьволновых слоев материалов с низким и высоким показателями преломления  $n$ , причем степень достигаемого увеличения коэффициента отражения зависит от соотношения показателей преломления и числа слоев с высоким и низким значениями  $n$ . Лимитирующим фактором для достижения максимально возможного отражения от полированной поверхности является величина показателя поглощения  $k$  слоев, входящих в состав интерференционного покрытия. В оптимальном случае для изготовления интерференционных зеркал величина показателя поглощения  $k$  пленкообразующего материала на рабочей длине волны должна быть на уровне  $1 \cdot 10^{-4}$ . Количество таких материалов для  $10,6$  мкм весьма ограничено, особенно для слоев с малым показателем преломления. Тем не менее, мировой уровень оптической технологии характеризуется возможностью достижения коэффициента отражения  $99,8$ — $99,9$  % для зеркал мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров, при этом обеспечиваются высокие и стабильные эксплуатационные параметры.

Но никакой прогресс в области статических силовых зеркал не может заменить необходимости решения проблемы повышения качества исходного луча, а также компенсации воздействия на него окружающей среды в процессе его распространения. Поэтому совершенствование внешних характеристик лазерных источников всегда было и остается одним из наиболее важных направлений исследований и разработок. Наиболее "революционными" в этой области явились идеи адаптивной оптики, попытки реализации которых начались с середины 70-х годов [3—5]. Как правило, адаптивная система состоит из тракта, в составе которого содержатся оптическое приемное и передающее устройства, а также воздействующий на волновой фронт активный элемент, управляемый через датчик волнового фронта и цепь обратной связи.

В качестве активных элементов (фазовых корректоров) чаще всего используются так называемые адаптивные зеркала различных видов: секционированные, с непрерывно деформируемой поверхностью и многоэлементные оптические системы.

В настоящее время секционированные зеркала рассматриваются как основа для создания крупногабаритных телескопов. Подобный телескоп может быть комбинированным, т. е. каждая отдельная секция может представлять собой сплошное адаптивное зеркало.

Применительно к лазерной технике наиболее предпочтительны сплошные адаптивные зеркала, которые по конструкции исполнительных устройств также делятся на несколько подклассов. Наибольшее распространение в адаптивной оптике получил пьезоэлектрический привод. Область локальной деформации, отражающая число степеней свободы зеркала, может быть задана эффективной шириной деформации единичной амплиту-

ды, вызванной воздействием одного привода. Функция, описывающая эту единичную деформацию и называемая функцией отклика, — одна из важнейших характеристик адаптивного зеркала. Уже существуют зеркала с дискретными приводами (или актюаторами), число которых и, соответственно, число каналов управления достигает нескольких десятков.

В отличие от зеркал с дискретными исполнительными механизмами в биморфных адаптивных зеркалах в качестве управляемой структуры используются сплошные пластины из пьезокерамического материала, присоединенные к зеркальной пластине по всей поверхности. На внешней стороне пьезокерамической пластины выполняется система управляющих электродов, чаще всего представляющая собой сектора, разделенные дорожками. С точки зрения управления волновым фронтом, биморфное зеркало отличается от адаптивных зеркал с дискретными исполнительными механизмами существенно неглобальным характером функций отклика управляющих электродов. Подобное свойство биморфных зеркал обуславливает их высокую эффективность при компенсации крупномасштабных аберраций волнового фронта.

Несмотря на большие потенциальные возможности, адаптивная оптика пока оказывается слишком сложной и дорогостоящей техникой для широкого внедрения в лазерные установки технологического профиля. Ее применение оправдывается только в составе установок особо большой мощности и в крупногабаритных астрономических телескопах. Однако несомненно, что по мере накопления опыта работы с адаптивными системами, отработки их элементной базы и ключевых системных вопросов, адаптивная оптика станет в скором будущем неотъемлемым элементом мощных технологических лазерных установок, предназначенным для компенсации, по крайней мере, возмущений низшего порядка у волнового фронта выходного излучения или для нивелирования теплового самовоздействия пучков в условиях распространения по протяженным воздушным трассам.

Адаптивная оптика в вышеуказанном определении, т. е. с использованием электромеханического управления фазовым корректором, практически не годится для компенсации фазовых искажений излучения высокоэнергетичных импульсных (моноимпульсных) лазеров из-за относительно низкого быстродействия: длительность импульса большинства таких лазеров (1—10 мкс) во много раз меньше постоянной времени электромеханической адаптивной системы (1—10 мс). Но почти одновременно с формированием основных научных и технических принципов адаптивной оптики, а именно с середины 70-х годов, возникло новое направление — обращение волнового фронта (ОВФ), обладающее совершенно самостоятельной концепцией управления фазой оптического излучения [5—7]. ОВФ, основанное на нелинейных эффектах воздействия света на вещество, имеет столь специфические физические особенности, что, являясь фактически одной из разновидностей адаптивной оптики, в научной литературе теперь претендует на самостоятельную терминологию. Так, в частности, появилось и закрепилось название ОВФ-зеркало, ОВФ-процесс, ОВФ-усилитель и т. д.

Привлекательность концепции ОВФ состоит в том, что весь процесс компенсации искажений производится в реальном времени фактически одним элементом, например, ячейкой с жидкостью, сжатым газом или кристаллической пластинкой, причем процесс идет без применения измерителей волнового фронта и устройств управления исполнительным механизмом.

В настоящее время наиболее развиты методы ОВФ на основе вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) и четырехволнового

смещения (ЧВС). Возможность использования ВРМБ для ОВФ была впервые показана в России (СССР) еще в 1973 г. [6].

Следует отметить, что в отличие от фазового сопряжения, осуществляемого адаптивным зеркалом, процесс ОВФ автоматически учитывает неоднородности амплитудного распределения и соответствующую дифракционную расходимость излучения. Постоянная времени процесса ОВФ при ВРМБ не более  $10^{-9}$  с, что позволяет осуществлять практически безынерционное обращение очень коротких световых импульсов на возникающей гиперзвуковой решетке.

Вся аппаратура ОВФ представляет собой кювету длиной 0,1—1 м, диаметром 1 см, с жидкостью или газом под высоким давлением. В качестве обрабатываемых сред используются жидкости — ацетон, бензол, сернистый углерод, хлористый углерод, а также газы — метан (120—150 атм.), гексафторид серы (20—30 атм.). Обращение волнового фронта обнаружено и в многомодовых оптических волокнах.

ОВФ на ВРМБ успешно реализуется в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, где легко (в режиме с модулированной добротностью) достигается превышение порога ВРМБ (1—10 МВт/см<sup>2</sup>). В практически важном среднем инфракрасном диапазоне, например для 10,6 мкм, ОВФ осуществить таким способом гораздо сложнее, так как энергетический порог при этом может в сотни раз превышать порог для источников видимого излучения. Поэтому ОВФ излучения генераторов с  $\lambda = 10,6$  мкм производят в поле двух встречных волн накачки.

В этом случае падающее излучение, взаимодействуя со встречной волной накачки, образует гиперзвуковую волну. На гиперзвуке рассеивается другая волна накачки, в результате чего возникает обращенная по отношению к падающей волна. Этот процесс и называется четырехволновым смещением.

В настоящее время ОВФ используется прежде всего для достижения дифракционной расходимости выходного луча лазерных систем, построенных по схеме “задающий генератор — усилитель с ОВФ-зеркалом”. При этом необходима поляризационная развязка между генератором и усилителем, что существенно затрудняет реализацию этих систем, весьма простых в своей идейной основе. Успешно развиваются также работы по передаче импульсной лазерной энергии на удаленные объекты при использовании ОВФ-зеркал для компенсации влияния турбулентности атмосферы.

Для лазерных пучков большой мощности в непрерывном режиме наиболее опасны эффекты тепловой дефокусировки.

Тепловое самовоздействие лазерных пучков, распространяющихся в атмосфере, обусловлено поглощением энергии излучения атмосферными газами и аэрозолями [2]. С этим связано изменение плотности среды в канале, в результате чего формируется нестационарная газовая линза, вызывающая нелинейную угловую расходимость пучка. Эффект может быть скомпенсирован только средствами адаптивной оптики при наличии соответствующего канала обратной связи.

Другой важный нелинейный эффект связан с так называемым оптическим пробоем.

Под оптическим пробоем газов понимают явление возникновения и развития бурной ионизации газов под действием мощного лазерного излучения. Явление сопровождается появлением “лазерной искры”, распространением ударных волн и фронтов ионизации, перекрытием лазерного пучка за счет сильного поглощения и нелинейного рассеяния света в образовавшейся плазме [8—10]. Указанный эффект накладывает ограничения на предельные

мощности световой энергии, которые можно транспортировать через атмосферу.

В последнее время основной центр исследований сместился в сторону так называемой "длинной лазерной искры", возникающей в луче длиннофокусной линзы при достаточной импульсной мощности лазера и имеющей обычно форму продольной цепочки отдельных плазматидов ("четочная" структура искры). Явление впервые открыто академиком Н. Г. Басовым с сотрудниками [9] и привлекает к себе постоянное внимание как с точки зрения изучения особенностей протекающих здесь физических процессов, так и возможных его многочисленных практических приложений. В качестве последних можно указать задачи коммутации сверхвысоковольтных цепей, защиты особо важных объектов типа атомных электростанций и линий электропередач от поражения молнией, создания динамических плазменных антенн и некоторые другие [10].

Так или иначе, но очевидно, что в принципе проблема передачи лазерной энергии с дифракционной расходимостью в атмосфере на большие расстояния разрешима уже современными методами. При этом могут быть компенсированы не только атмосферные турбулентности, но и все нелинейные эффекты самовоздействия пучка, кроме, пожалуй, связанных с оптическим пробоем.

Российские ученые и инженеры внесли большой, а во многих случаях определяющий вклад в разработку практически всех известных лазерных направлений, в том числе и касающихся проблем фокусировки и распространения мощного излучения. Данный обзор посвящен анализу сегодняшнего состояния и последних достижений отечественной науки и техники в указанной области.

#### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИИ

Лазерные исследования и разработки пользовались в СССР настолько очевидным приоритетом, что это, по мнению президента отечественной Лазерной ассоциации [11], дает основание поставить лазерную отрасль по научно-технологическому потенциалу на третье место в стране после атомной и аэрокосмической отраслей. Распад СССР сохранил за Россией все основные научно-технические лазерные центры, причем ряд из них приобрел статус федерального научного центра со всеми вытекающими отсюда обязанностями государственной поддержки. Практически во всех указанных центрах в той или иной степени ведутся работы в области фокусировки и распространения лазерного излучения. Но наиболее представительными и компетентными в данной области являются такие известные организации, как Физический институт им. П. Н. Лебедева и Институт общей физики Российской Академии наук, Всероссийский научный центр "Государственный оптический институт имени Вавилова", Государственный научный центр — Научно-производственное объединение "Астрофизика" и ряд других.

Структура и направления исследований по обсуждаемой тематике в общем соответствуют сложившимся в мировой научной практике. Это прежде всего материаловедческие, технологические и конструкторские изыскания в интересах совершенствования статических элементов "силовой" оптики, широкий фронт работ по адаптивной оптике и обращению волнового фронта, теоретические и экспериментальные исследования линейных и нелинейных эффектов, сопровождающих распространение мощного лазерного излучения в атмосфере. Следует отметить, что сегодняшний этап исследований имеет ярко выраженный и доминирующий аспект народнохозяйственных приложений, соответствующий общей конверсионной перестройке приоритетных задач высоких технологий.

В следующем разделе конкретно рассмотрены наиболее важные и интересные работы по данной тематике, выполненные в течение нескольких последних лет. В отдельных случаях для прояснения логики развития некоторых направлений ретроспектива анализа может захватывать и 10—15 последних лет.

#### ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДОВ ФОКУСИРОВКИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

##### Исследования и разработка новых элементов и систем "силовой" оптики

Зеркала современных лазерных систем (и телескопов) должны обеспечивать качество изображения и расходимость излучения на уровне предела, ограничиваемого дифракцией. Это означает, что среднеквадратичное отклонение формы оптической поверхности зеркал от заданной не должно превышать сотых долей рабочей длины волны. С учетом возможных размеров зеркал (0,5 м и более) это позволяет характеризовать их как наиболее точные изделия современного приборостроения.

##### Статическая оптика

Во Всероссийском научном центре "Государственный оптический институт" (С.-Петербург) большое внимание в последнее время уделялось разработке зеркал для мощных лазерных систем и крупногабаритных телескопов из нетрадиционных материалов [12].

"Классические" материалы оптических элементов — стекло, кварц — обладают умеренной удельной жесткостью и чрезвычайно малой теплопроводностью, которые в рамках данных систем не могут быть принципиально модифицированы. Единственной возможностью повысить температурную стабильность зеркал из подобных материалов является уменьшение температурного коэффициента линейного расширения. Многолетние усилия разработчиков в этом направлении привели к созданию таких сверхнизкорасширяющихся материалов, как ситалл (зарубежные аналоги — церодур, легированный плавленый кварц ULE). Следует, однако, иметь в виду, что экстремально малый температурный коэффициент линейного расширения этих материалов реализуется только в узком температурном диапазоне.

Использование металлов и хорошо теплопроводящих материалов позволяет ограничить термодформации за счет большого коэффициента теплопроводности, несмотря на значительную величину коэффициента линейного расширения, так как эффективность материала в рассматриваемом вопросе определяется отношением этих коэффициентов. Это обусловило абсолютное доминирование металлооптики в мощных лазерных системах. Но недостаточная удельная жесткость обычно используемых металлов — меди, алюминия, молибдена и других — затрудняет создание крупногабаритных зеркал со стабильными геометрическими параметрами. Данная проблема практически решается благодаря предложению использовать такие нетрадиционные материалы, как бериллий, кремний и карбид кремния. Одним из решающих аргументов в пользу последних является принципиально более высокая удельная жесткость (в 2—5 раз больше, чем у всех традиционных материалов), сочетающаяся с превосходной температурной стабильностью.

Следует отметить, что карбид кремния SiC обладает удельной жесткостью бериллия и температурной стабильностью, в несколько раз лучшей, чем у всех ранее созданных сверхнизкорасширяющихся материалов (включая и "рекордсмена" ULE).

В интересах создания легких жестких опорных конструкций зеркал большое внимание уделяется композиционным материалам (КМ) различной природы. Так, на основе углерод-алюминиевых КМ созданы опорные конструкции для зеркал из кремния и карбида кремния, согласованные с последними по температурному коэффициенту линейного расширения. Разработанные математические модели описания свойств волокнистых КМ с учетом неупругого поведения компонент позволяют эффективно управлять состоянием этих материалов в целях обеспечения максимальной размерной стабильности [12].

В настоящее время основное внимание материаловедов направлено на отработку технологии изготовления облегченных крупногабаритных (диаметр 1 м и более) заготовок из карбида кремния в условиях обеспечения создания в ближайшие годы зеркал из этого материала диаметром до 1,5 м.

Введенные в практику нетрадиционные материалы вследствие особенностей структуры, физических и химических свойств не во всех случаях позволяют получать оптические поверхности с требуемой шероховатостью при их непосредственной обработке. Кроме того, в случае использования бериллия вообще нежелательна непосредственная оптическая обработка из-за очень больших трудностей обеспечения экологической безопасности работающих и окружающего пространства.

Для преодоления этих трудностей обычно применяют конструкционные покрытия, представляющие собой слой инородного материала, соединяемый с основой зеркала и подвергающийся оптической обработке. Толщина слоя, как правило, находится в пределах 0,5—5 мм. Различные технологии дают возможность применять в качестве конструкционных покрытий медь, никель, золото, кремний и другие материалы. В Государственном оптическом институте разработана уникальная технология создания металлических зеркал с использованием конструкционных стеклянных покрытий. Наличие последних позволяет использовать богатый опыт оптической обработки этих материалов, а изменением состава стекла можно согласовать коэффициенты линейного расширения покрытия и основы зеркала [12].

В то же время отработана технология полирования для получения сверхгладких оптических поверхностей (со среднеквадратичной шероховатостью менее 100 А) для таких нетрадиционных материалов, как кремний и карбид кремния. Однако недостаточная величина коэффициента отражения излучения требует нанесения дополнительных отражающих и защитных покрытий на эти материалы. Очевидно, что порог разрушения этих покрытий будет определять предельные эксплуатационные характеристики всех перспективных зеркал мощных лазерных систем.

К настоящему времени в Государственном оптическом институте выполнен широкий комплекс исследований по разработке конструкции и отработке технологии нанесения отражающих покрытий для лазерных зеркал, работающих в различных диапазонах спектра. Так, для зеркал, работающих в импульсном режиме на длинах волн 0,308 и 1,064 мкм, разработаны конструкция и технология нанесения многослойного диэлектрического покрытия на ненагреваемую подложку. При этом порог разрушения достигает 200 Дж/см<sup>2</sup> для импульса микросекундной длительности. Коэффициент зеркального отражения больше 99 %.

Для зеркал, работающих на длинах волн 5,1 и 10,6 мкм, разработана технология металлодиэлектрических покрытий, состоящих из слоя аморфной меди с устойчивым значением коэффициента зеркального отражения не менее 99,1 %. В непрерывном режиме порог разрушения составляет 1000 кВт/см<sup>2</sup> при длительности воздействия 3 мин.

Эта же технология была использована для изготовления дифракционных решеток, что позволило увеличить плотность штрихов со 100 штрихов на 1 мм (полированная медь) до 150. Получены решетки с эффективностью в первом порядке 93—94 %, устойчиво работающие при лучевой нагрузке 4 кВт/см<sup>2</sup>.

Совокупность научных и экспериментальных результатов по нетрадиционным материалам для зеркал, по оптическим отражающим и защитным покрытиям, а также результаты по получению сверхгладких поверхностей дают возможность создавать зеркала для технологических лазеров, работающих в непрерывном и импульсно-периодическом режимах с мощностью излучения до 200 кВт [12].

Лазерные зеркала из карбида кремния в последнее время разработаны также в Научно-производственном объединении "Луч" (Подольск, Московская область) [13]. Оптимизация теплофизических и механических свойств карбидокремниевых материалов обеспечивает надежную работоспособность зеркал в лазерных установках с уровнем лучевой нагрузки до 30 кВт/см<sup>2</sup>.

Высокая лучевая и коррозионная стойкость карбида кремния, а также износостойкость защитного покрытия оптической поверхности обеспечивают повышенный ресурс работы зеркал, основными элементами которых являются подложка (отражающая пластина) и основание. В основании охлаждаемых зеркал организуются тракты подвода, распределения и эвакуации хладагента, а также устройства для закрепления их в лазерных системах.

Для изготовления зеркал лазерных технологических установок перспективно использование моно- и поликристаллического кремния, свойства которого по некоторым параметрам лишь незначительно уступают карбиду кремния.

Такие зеркала (при мощности установок менее 5 кВт) представляют собой неохлаждаемые подложки различной конфигурации: цилиндрические, эллипсные, прямоугольные, без отверстий и с отверстиями различной формы.

Кремниевые пластины используются также в качестве подложки при изготовлении крупногабаритных зеркал (диаметр до 700 мм), в том числе с облегченным основанием ячеистой конструкции из карбида кремния. Ниже приведены основные технические характеристики зеркал из карбида кремния и кремния, разработанных на предприятии "Луч":

форма оптической поверхности .....	сферическая
ошибки изготовления, мкм, менее .....	0,3
шероховатость поверхности, Å, менее .....	50
отражающее покрытие .....	медь
защитное покрытие .....	на основе окислов
коэффициент отражения, %, более .....	99,0
то же, при интерференционном покрытии, % .....	99,4—99,6
ресурс работы, ч .....	1000

В работе [14] отражены результаты разработки технологии нанесения интерференционных покрытий, увеличивающих отражательную способность металлооптических поверхностей до уровня 99,5—99,8 % при сохранении высоких и стабильных эксплуатационных характеристик зеркал.

В качестве материала для нанесения четвертьволнового слоя с низким показателем преломления в работе по созданию зеркал с интерференционными покрытиями использовался фторид тория ThF<sub>4</sub>, показатель преломления которого на длине волны 10,6 мкм равен 1,35. Это один из немногих

материалов с малым показателем преломления, область прозрачности которого распространяется в пределах 0,2—14 мкм.

В качестве материала с высоким показателем преломления взят селенид цинка ZnSe, показатель преломления которого равен 2,42, а показатель поглощения  $k$  составляет величину менее  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Наносимые по разработанной технологии интерференционные покрытия, имея значительную физическую толщину, тем не менее, не отрываются от подложки липкой лентой, легко очищаются от пыли и загрязнений ватным тампоном, смоченным в ацетоне. При климатических испытаниях во влажной камере (относительная влажность 90—95 %, температура 35—40 °C) покрытия не разрушались и не изменяли оптических характеристик в течение 10 сут.

Количество использованных пар покрытий варьировалось от 1 до 4. Наибольшую лучевую стойкость имели двухслойные покрытия — до 58 кВт/см<sup>2</sup>, хотя и четырехслойные (на медной основе) имели достаточно высокий предел — 50 кВт/см<sup>2</sup>. Экспериментально измеренный коэффициент отражения для двухслойного покрытия на длине волны 10,6 мкм составил 99,5 %, тогда как восьмислойное покрытие (четыре пары слоев) — 99,8 %.

Очевидно, что эти результаты находятся на уровне лучших мировых достижений в рассматриваемой области.

В Государственном научном центре Российской Федерации — Научно-производственном объединении “Астрофизика” (Москва) также созданы металлические “силовые” зеркала различного назначения, в том числе с высокой лучевой прочностью и облегченные зеркала диаметром до 1000 мм из алюминиевых сплавов, кремния, карбида кремния и других перспективных материалов с высокими техническими характеристиками. Эти технологии послужили основой для нового направления: на базе достижений в области оптики, телескопостроения и в других областях в настоящее время ведутся энергичные работы по созданию гелиоэнергетических устройств различного назначения [15—17].

Необходимо отметить, что для зеркал с малой лучевой нагрузкой коэффициент отражения может быть доведен до 100 % с очень высокой точностью. Так, в одной из последних работ [18] Государственного института прикладной оптики (Казань) для длины волны 0,63 мкм были созданы интерференционные покрытия на кварцевой подложке, обеспечивающие коэффициент отражения на уровне 99,94 %. Здесь в качестве высокопреломляющих материалов были выбраны  $\text{TiO}_2 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ , а в качестве низкопреломляющего — двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ . Подобные зеркала могут найти применение в различных областях науки и техники в качестве прецизионных элементов оптических систем и в то же время служат определенным ориентиром по предельным возможностям для силовых зеркал.

К настоящему времени, помимо совершенствования техники и технологии высококачественных зеркальных элементов, известен и ряд других способов улучшения формирования пространственной структуры выходного излучения лазеров, основанных на внесении в пучок элементов с изменяющимися вдоль радиуса оптическими характеристиками, например, коэффициентом пропускания. В последнем случае такими элементами являются аподизирующие апертуры, позволяющие при определенных видах искажений волнового фронта исходного излучения получать выходное излучение с расходимостью, близкой к дифракционной, или (при внутриврезонаторном использовании) подавлять генерацию нежелательных мод.

В литературе обсуждается несколько возможных материалов и способов формирования профиля аподизирующих апертур ("мягких" диафрагм), однако отдать предпочтение тому или иному способу довольно трудно, поскольку для решения практических задач часто требуется наличие у материала, из которого изготавливается апертура, сразу несколько свойств. Это, во-первых, высокая механическая, термическая и оптическая прочность, во-вторых, возможность формирования заданного профиля на необходимой длине волны, в-третьих, высокий коэффициент поглощения в непрозрачной части апертуры и, в-четвертых, простота изготовления исходного материала и способа формирования профиля.

Менее существенной, но весьма желательной, является реверсивность способа формирования профиля, позволяющая производить формирование нескольких разных профилей. К сожалению, ни один из ранее предложенных материалов не удовлетворяет одновременно всем этим требованиям. Поэтому как своеобразный прорыв в данном вопросе следует рассматривать работу [19] Государственного оптического института, в которой для диапазона 0,6—3,5 мкм предложены аддитивно окрашенные кристаллы флюорита с коллоидами. Как показали исследования, аподизирующие апертуры из этого материала могут устанавливаться как внутри резонатора, так и вне его при пиковой интенсивности до 700 МВт/см<sup>2</sup> в режиме модулированной добротности (длительность импульса 10—20 нс) и до 10 Вт/см<sup>2</sup> — в непрерывном режиме. В случае принудительного охлаждения такие оптические элементы могут эксплуатироваться и в более жестком режиме. При этом у элементов сохраняются высокие лучевая прочность и теплопроводность, близкие к соответствующим значениям для неокрашенных кристаллов CaF<sub>2</sub>. Следует подчеркнуть, что физические процессы, протекающие в предлагаемом фоторегистрирующем материале, являются обратимыми и, следовательно, один кристалл может быть многократно использован для записи и стирания изображения.

В работе использованы слабелегированные щелочными ионами (Li, Na, K) кристаллы CaF<sub>2</sub>, выращенные в вакууме. При облучении ультрафиолетовым светом (в разработанной технологии излучением азотного лазера) при температуре 70—110 °С происходит образование интенсивных полос поглощения с максимумом на 3,5 мкм. Дальнейший отжиг засвеченного кристалла при температурах 120—350 °С приводит к практически монотонному сдвигу максимума первоначально образованной полосы в более коротковолновую область, вплоть до 0,5 мкм, в зависимости от температуры отжига. Еще более высокотемпературный отжиг приводит к восстановлению исходного спектра.

Параметры режима облучения азотным лазером (мощностью 0,05 Вт) подбирались эмпирически в зависимости от желаемой формы профиля с учетом чувствительности кристалла к поглощенной энергии, которая на краю апертуры достигала 100 Дж/см<sup>2</sup>.

Такие аподизирующие диафрагмы могут быть с успехом использованы, в частности, для подавления дифракционных неоднородностей световых пучков, вызывающих самофокусировку и разрушение лазерных элементов.

Как развитие указанного направления можно рассматривать совместную работу [20] Института общей физики и Института радиотехники и электроники (Москва), посвященную исследованию аподизирующей диафрагмы на основе фотоокисления редкоземельной примеси во флюорите CaF<sub>2</sub> : Pr. Здесь "мягкая" диафрагма использовалась в качестве внутрирезонаторного элемента эрбиевого лазера (YAG : Er<sup>3+</sup>) с целью достижения одномодового режима генерации, и ее эффект сравнивался с действием обычной

(“жесткой”) диафрагмы с отверстием 3 мм, обеспечивающей тот же режим. Применение “мягкой” диафрагмы позволило в 1,5 раза уменьшить расходимость излучения и во столько же раз увеличить выходную энергию импульсно-периодического лазера, работавшего на длине волны 2,94 мкм и с импульсной энергией накачки 200 Дж (коэффициент полезного действия около 1 %).

Отличительной особенностью принятой технологии изготовления вышеуказанной аподизирующей диафрагмы являлось предварительное гамма-окрашивание кристалла (доза  $10^9$  рентген) с последующим облучением в течение 3 ч излучением непрерывного аргонового лазера (0,488 мкм).

### Детерминированно управляемая оптика

Расширение сферы научных и промышленных применений мощных твердотельных лазеров требует развития методов управления характеристиками их излучения. Однако использование внрезонаторной формирующей оптики при решении многих задач малоэффективно или нецелесообразно по технико-экономическим соображениям. В этом случае особенно актуальными являются попытки внутрирезонаторного управления при решении задачи достижения высокого качества излучения без ухудшения энергетических характеристик лазера.

Перспективным направлением развития методов внутрирезонаторного управления режимом работы лазера является использование детерминированных алгоритмов управления конфигурацией резонатора. В этом случае конфигурация управляемого резонатора определяется как функция требуемых выходных характеристик и априорно устанавливается однозначное соответствие между сигналами управления и характеристиками выходного излучения. Оптимальная организация детерминированного управления позволяет в процессе генерации контролировать отдельные выходные характеристики или их комбинации при использовании минимального набора управляющих параметров без привлечения сложных поисковых алгоритмов.

В работе [21] Института общей физики анализировались и экспериментально исследовались свойства резонатора, управляемая конфигурация которого (через деформируемое зеркало) позволяет контролировать расходимость и модовую структуру излучения твердотельного лазера в условиях внутрирезонаторной тепловой линзы.

Для управления конфигурацией резонатора необходимо, чтобы деформируемое зеркало обеспечивало диапазон изменения оптической силы, сопоставимый с диапазоном изменения оптической силы тепловой линзы, и обладало высокими коэффициентом отражения, качеством отражающей поверхности и лучевой стойкостью. Приемлемые эксплуатационные характеристики, как было показано, могут быть получены при изготовлении деформируемых зеркал из традиционных материалов лазерной оптики ближнего инфракрасного диапазона типа кварца и стекла.

Было изготовлено несколько образцов кварцевых деформируемых зеркал с толщиной плоской отражающей пластины 250 мкм и диаметром управляемой области 9 мм. Управление кривизной отражающей поверхности осуществлялось путем изменения давления под гибкой пластиной.

Обычно основной вклад в снижение яркости излучения твердотельного лазера вносит наведенная в активном элементе тепловая линза. Изменение режима накачки приводит к изменению фокусного расстояния тепловой линзы, что сопровождается соответствующим изменением расходимости выходного излучения и выходной мощности.

Применительно к используемому лазеру со средней мощностью 25 Вт необходимый диапазон изменения оптической силы гибкого зеркала определялся величиной 4 диоптрии. В исходном плоскопараллельном резонаторе была обеспечена средняя осевая сила света в  $10^5$  Вт на стерадиан. Использование управляемого глухого зеркала в сочетании с аподизированным выходным позволило поднять осевую силу света до  $1,4 \cdot 10^6$  Вт на стерадиан без снижения выходной мощности. Тем самым расходимость излучения уменьшилась в 3,5—4 раза, хотя она и осталась еще примерно в три раза больше дифракционного предела.

Максимальная яркость выходного излучения обеспечивалась при коэффициенте геометрического увеличения "наведенного" неустойчивого резонатора  $M = 1,0-1,15$ , что подтверждает ранее сделанное предположение о необходимости формирования в процессе управления "слегка неустойчивой" конфигурации [22].

Приведенные результаты по коррекции тепловой линзы позволяют сформулировать новый подход к созданию непрерывных и импульсно-периодических твердотельных лазеров с высокой яркостью излучения на основе сравнительно простой техники и алгоритма детерминированно управляемой оптики. При этом оптимальная геометрия резонатора может поддерживаться при помощи управления кривизной глухого зеркала в широком диапазоне изменения мощности накачки и оптической силы тепловой линзы.

### Исследования волнового фронта мощного лазерного излучения

Совершенствование внешних характеристик лазерных источников, прежде всего обеспечение высокого качества выходного пучка, становится одним из наиболее актуальных направлений развития лазерной техники. Особенно остро этот вопрос стоит для мощных технологических лазеров, где высокие уровни накачки, большие объемы рабочей среды, интенсивные потоки световой энергии являются основной причиной множества разнообразных по своей природе линейных и нелинейных эффектов, способных влиять на формируемый пучок и его способность к фокусировке. Все это выражается через фазовые характеристики — угловую расходимость, ориентацию оси диаграммы направленности, временные флуктуации этих важнейших параметров.

В связи со сказанным разработка методов и средств контроля фазовой поверхности пучка на высоких уровнях мощности и энергии становится первоочередной задачей.

В работе [23] Государственного оптического института приведены результаты прямого интерферометрического контроля фазовой поверхности выходного пучка технологического  $\text{CO}_2$ -лазера импульсно-периодического действия (и с энергией каждого импульса 100—200 Дж). Интерферометрическая диагностика в подобных случаях проводится редко и представляет интерес уже сама по себе, но цель работы была гораздо глубже. Опираясь на фактический материал, авторы хотели показать, что излучение реального лазера обладает более сложным фронтом, чем деформированная сфера. Ответственность за это несут топологические дефекты, меняющие структурные свойства фазовой поверхности. Они появляются вследствие неоднородностей в резонаторе, приобретаемых и накапливающихся в процессе работы лазера.

Диагностика волнового фронта была проведена для каждого импульса пучка с помощью методов сдвиговой интерферометрии. Установлено, что топология волнового фронта меняется в течении серии импульсов, остава-

ясь эквивалентной простейшей деформированной сфере в начальной части дуга. Наблюдавшиеся дислокации и их пространственная плотность локализованы случайным образом в сечении лазерного пучка. Показано, что топологические превращения обусловлены термодетформациями зеркал резонатора и другими процессами, вызывающими появление неоднородностей в лазерном резонаторе. Сделано предположение о том, что волновые дислокации — это типичные дефекты всех видов силовых лазеров.

Надо отметить важный вклад данной работы в саму методику подобных измерений. Контроль искажений выходного излучения, как уже отмечено, проводился методами сдвиговой интерферометрии. Эти методы в данном случае не имеют альтернативы, поскольку контролю подвергается сам формируемый в лазере пучок. Известные интерферометрические схемы, предполагающие наличие опорного пучка с правильной формой фазовой поверхности (плоская или сферическая) и гладким распределением интенсивности, оказываются непригодными, поскольку такой опорный пучок взять негде. Возможность использования неинтерферометрических методов контроля типа метода Гартмана, по мнению авторов, не очевидна в их условиях и требует отдельного внимательного анализа.

Эффективность фокусировки излучения мощных моноимпульсных лазеров во многом также определяется амплитудно-фазовым распределением поля на выходных апертурах этих лазеров. При этом определяющее влияние на пространственные параметры лазерного пучка оказывает такая фазовая характеристика, как форма волнового фронта излучения. Описание распределения амплитуды излучения по поперечному сечению лазерного пучка не вызывает принципиальных затруднений и осуществляется фоторегистрацией с последующим фотометрированием снимка. Измерение распределения фазы излучения в мощных импульсных инфракрасных лазерах всегда сопряжено с определенными трудностями.

В работе [24] Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (Арзамас-16, Нижегородская обл.) приведены результаты применения метода Гартмана для исследования формы волнового фронта излучения йодных лазеров "Искра-4" и "Искра-5" (длина волны 1,315 мкм), используемых в составе установок по лазерному термоядерному синтезу.

В методе Гартмана, базирующемся на законах геометрической оптики, апертура исследуемого волнового фронта разбивается на отдельные субапертуры экраном с круглыми отверстиями — диафрагмой Гартмана. Вне фокуса оптической системы устанавливается фотопленка, на которую экспонируется система пятен — снимок Гартмана, или гартманограмма. Положение пятен на снимке для идеального волнового фронта можно вычислить. Разность между измеренными и вычисленными положениями пятен дает систему поперечных аберраций. Ее интегрирование позволяет получить систему волновых аберраций, т. е. восстановить истинную форму волнового фронта. В методе принимаются допущения о гладкости контролируемого волнового фронта и о хаотичности турбулентности атмосферы.

Для реализации метода Гартмана была изготовлена и аттестована диафрагма диаметром 280 мм с отверстиями в узлах квадратной сетки. Такое расположение обеспечивает равномерное распределение точек по апертуре и упрощает алгоритм восстановления волнового фронта. Диаметр отверстий равнялся 7 мм, расстояние между отверстиями 14 мм. Создан пакет программ для математической обработки снимков.

В экспериментах для регистрации гартманограммы использовалась небольшая часть энергии лазерного импульса, прошедшая через частично

пропускающее зеркало, которое является элементом оптической системы и располагается в месте излома оптической оси.

Определенная таким образом максимальная деформация волнового фронта составила соответственно 2,9 и 4,3 мкм для вышеупомянутых лазеров с выходными апертурами 420 и 700 мм. Наблюдалось хорошее соответствие пространственных характеристик лазерного излучения, измеренных методом Гартмана, методом фокального пятна и интерферометром бокового сдвига.

Полученные данные и регистрация распределения интенсивности излучения на выходной апертуре лазера дают возможность с помощью математического аппарата Фурье рассчитать пространственное распределение интенсивности излучения в области постановки мишени и оценить его соответствие решаемым задачам. Наличие инструмента для измерения фазовой характеристики излучения позволяет целенаправленно осуществлять ее оптимизацию.

### **Исследования и разработка электромеханических элементов и систем адаптивной оптики**

Адаптивная оптика по своему характеру требует комплексных исследований и разработок, чтобы претендовать на внедрение в конкретные лазерные системы. Примером такого комплексного и самосогласованного изучения проблемы являются работы Института общей физики РАН (Москва), которые велись под руководством академика А. М. Прохорова начиная с 1978 г. [25—31]. За это время были проведены теоретические исследования, разработана технология изготовления, созданы и экспериментально исследованы следующие узлы и элементы адаптивных систем:

- магнитострикционный актюатор пружинного типа;
- макет адаптивного охлаждаемого зеркала с пористой системой охлаждения для лазерных систем высокой и средней мощности;
- макет оптомеханического сканера на основе магнитострикционных актюаторов;
- линейный шаговый двигатель перемещений;
- оптомеханическое сканирующее устройство, предназначенное для двухкоординатного углового позиционирования оптических элементов;
- система автоматизированного контроля формы оптических поверхностей и волновых фронтов для промышленного контроля, научных исследований и использования в адаптивных системах;
- эффективные алгоритмы компенсации фазовых искажений поля на базе разложений по ортогональным полиномам.

Отличительная черта этих работ — решительный отказ от пьезокерамических приводов в пользу исследования и разработка альтернативного типа актюаторов, основанных на использовании эффекта Видемана в магнитострикционных материалах. К достоинствам данных актюаторов следует отнести большой диапазон смещений, отсутствие старения, простоту изготовления (механическая обработка) и возможность масштабирования в широких пределах.

Принцип действия магнитострикционных актюаторов пружинного типа основан на преобразовании крутильных деформаций, возбуждаемых в витке спирали магнитным полем, в линейные перемещения.

В Институте общей физики РАН подробно исследованы свойства этих актюаторов, не имеющих аналогов. Они позволяют развивать знакопеременные перемещения до 200 мкм при характерном размере (длине) 100 мм под действием магнитного поля до 1000 А/м. Поскольку характерная величина плотности обмотки катушки, создающей магнитное поле, порядка

1000 витков на 1 м, то управляющие токи не превосходят 1—2 А. При этом эффективная полоса частот управляющих сигналов простирается до 700 Гц.

Механическая жесткость актюатора на уровне 10 Н/м.

Совокупность приведенных физико-механических свойств актюаторов полностью удовлетворяет многообразию их приложений в задачах адаптивной оптики. Проведенные теоретические исследования эффекта Видемана стали основой сформированной аналитической модели пружинного актюатора, позволяющей прогнозировать или рассчитывать его конструкцию в интересах обеспечения заданных рабочих характеристик.

Лазерное адаптивное зеркало состоит из плоской гибкой отражающей пластины толщиной 9 мм и диаметром 160 мм, световой диаметр составляет 90 мм. В пластине размещены пористый теплообменник и коллекторы звода—вывода хладагента. Конструкция теплообменника обеспечивает высокую равномерность тепло- и массопереноса по площади отражающей поверхности. Форма поверхности контролируется 19 магнитострикционными актюаторами пружинного типа длиной 100 мм и диаметром 10 мм, каждый из которых управляется током с амплитудой до 2 А. В свободном состоянии актюаторы развивают перемещения около 15 мкм. Актюаторы с одной стороны закреплены на базовой пластине, а с другой — прикреплены к гибкой отражающей пластине в узлах гексагональной сетки, чем обеспечивается возможность динамического управления формой отражающей поверхности. К базовой пластине актюаторы присоединены через микрометрические винты, что позволяет задавать нужную статическую форму зеркала.

Это зеркало может быть использовано в оптических трактах мощных лазерных комплексов непрерывного действия, причем способно выдерживать лучевые нагрузки плотностью до 30 кВт/см<sup>2</sup> при собственных термодформациях не более 1 мкм. В то же время оно способно отслеживать на зеркальной поверхности формы основные аберрации низших порядков с точностью не хуже 0,05 мкм

Разработанный эффективный оптико-механический сканер на основе тех же актюаторов представляет собой автономную систему и предназначен для прецизионного углового позиционирования крупногабаритных зеркал в режиме реального времени. Сканер может работать в двух режимах: в режиме сканирования и в режиме стабилизации положения оптической оси.

В состав сканера входят исполнительный элемент, двухконтурная система управления и стабилизированные источники питания актюаторов и системы управления. Техническая характеристика сканера следующая:

постоянная времени, с .....	0,01
диапазон наклонов, угл. мин .....	8
точность, угл. с .....	0,1
диаметр зеркала, мм .....	300
диапазон рабочих частот, Гц .....	0—100
масса зеркала, кг .....	10

Данный сканер был испытан в 1991 г. в астрономическом солнечном телескопе Пулковской обсерватории при стабилизации положения изображения поверхности Солнца. Его применение при фотосъемке поверхности Солнца в режиме длинных экспозиций позволило повысить контраст изображения в два раза.

Кроме того, его можно использовать практически во всех типах систем адаптивной оптики для коррекции наклонов волнового фронта.

Линейный шаговый двигатель микроперемещений выполнен на основе магнестрикционных актюаторов пружинного типа и предназначен для прецизионного позиционирования объектов. Простая технология изготовления таких актюаторов позволяет создавать широкую номенклатуру линейных шаговых двигателей, перекрывающую практически весь мыслимый диапазон систем точного позиционирования — по массе позиционируемых объектов, интервалу и точности перемещения. Данные двигатели могут быть использованы в микроэлектронике, точном машиностроении, оптике, электронной микроскопии и в других областях.

В созданном линейном двигателе реализован пошаговый режим работы с периодическим удлинением и сокращением приводов, на концах которых установлены фиксаторы. Последние периодически, синхронно с удлинением актюатора, захватывают вал с жестко закрепленным объектом и обеспечивают его линейное перемещение. Интервал возможных перемещений при этом ограничен только длиной вала. Для обеспечения линейности перемещения и получения требуемых точностных характеристик каждый из приводов охвачен специальной обратной связью, датчики которой встроены в конструкцию двигателя. Ниже приведены параметры базового двигателя, предназначенного для использования позиционирования элементов крупногабаритного телескопа:

развиваемое усилие, Н .....	100
диапазон перемещений, мм .....	250
точность позиционирования, мкм .....	0,01
скорость перемещения, мм/с .....	30
габаритные размеры, мм .....	80x200

В Институте общей физики РАН также разработан, изготовлен и испытан образец автоматизированного 19-канального датчика Гартмана. Быстродействие этой системы составляет не менее 100 Гц. Формы волновых фронтов, полученные посредством данного датчика, при разложении по системе полиномов Цернике практически полностью совпадают с аналогичными данными, полученными интерферометрическим методом в параллельном канале.

По техническим характеристикам указанный датчик волнового фронта соответствует системным требованиям адаптивной оптики при реализации метода фазового сопряжения. Алгоритм фазового сопряжения, по мнению авторов работ [25—31], однозначно предпочтительнее по сравнению с поисковыми алгоритмами (типа апертурного зондирования), поскольку обеспечивает более высокое быстродействие.

В работе [32] Научно-производственного объединения "Луч" изложен опыт создания больших адаптивных зеркал с пьезокерамическими актюаторами для коррекции волнового фронта лазерного излучения. Управляемая апертура таких зеркал достигает 300—400 мм, число приводов 61, амплитуда перемещения оптической поверхности 20 мкм, частота первого резонанса 200 Гц. Рассмотрены различные теоретические и практические аспекты создания адаптивных зеркал со сплошной поверхностью. В конструкции таких зеркал предусмотрены система термостабилизации оптической поверхности и различные термомеханические развязки.

Результаты исследований и отработки отдельных элементов рассматриваемых зеркал (пьезоэлектрического привода, систем крепления и юстировок, оптического блока, систем охлаждения) позволяют создавать адаптивные зеркала с наперед заданными характеристиками.

Созданная оптико-электронная аппаратура позволяет проводить исследования и испытания зеркал в различных режимах: статическом, динамическом, в режиме управления оптической поверхностью, при имитации воздействия излучения на поверхность, в составе адаптивных оптических систем фазового сопряжения и апертурного зондирования.

Результаты комплексных испытаний зеркал подтверждают их работоспособность.

В Научно-производственном объединении "Композит" (Калининград, Московская обл.) выполнен цикл исследований и разработок по созданию охлаждаемых биморфных адаптивных зеркал для мощных лазерных систем [33—34]. Биморфные зеркала наиболее эффективны при компенсации крупномасштабных возмущений волнового фронта, они вносят основной вклад в увеличение расходимости излучения по мере роста мощности генератора.

Разработанные зеркала ориентированы на применение в лазерных установках мощностью до 15 кВт.

Диаметр зеркал 76 мм, высота 9,5 мм, толщина охлаждаемой зеркальной пластины 1,5 мм. В конструкции используется система охлаждения "вафельного" типа. Исходная форма оптической поверхности — плоская, максимальное управляющее напряжение 300 В.

Адаптивные зеркала данной конструкции были выполнены в двух модификациях: из меди и молибдена. В медном биморфном зеркале для управления оптической поверхностью используются две пьезокерамические пластины: верхняя (диаметром 50 мм, толщиной 1 мм, марка пьезокерамики ЦТСНВ-1) и нижняя (диаметром 45 мм, толщиной 0,3 мм, марка пьезокерамики ЦТС-19). При этом на нижней пластине выполнена система из 17 секционированных управляющих электродов. С учетом верхней пластины и общего электрода (корпус) число управляющих электродов медного зеркала составляет 19, световой диаметр медного зеркала 50 мм.

В молибденовом адаптивном зеркале используется одна пьезокерамическая пластина диаметром 50 мм и толщиной 1 мм, на которой также сформировано 18 управляющих электродов (с учетом корпуса). Отражающая поверхность молибденового зеркала выполнена в виде выступа высотой 0,2—0,3 мм, световой диаметр зеркала 47,7 мм

Термические деформации рассматриваемых зеркал исследовались путем компьютерного моделирования и экспериментально, причем существенно лучшие характеристики имеет молибденовое зеркало. Аналогичными путями исследовались функции отклика. Высокое качество математического моделирования и адекватность принятой модели подтверждаются полным совпадением расчетных и "чистых" экспериментальных функций отклика. Частотные характеристики зеркал позволяют их использовать при частотах управляющих сигналов, по крайней мере, до 1 кГц.

Эффективность компенсации искажений волнового фронта с помощью таких зеркал была оценена в ходе численных экспериментов на базе уже известных функций отклика. Оказалось, что данные биморфные зеркала наиболее хорошо устраняют осесимметричные искажения волнового фронта, следовательно, их применение для компенсации дефокусировки и сферической аберрации весьма эффективно. Предложены пути модернизации конструкции зеркал с целью их эффективного использования и для компенсации аберраций типа комы и астигматизма.

На основе накопленного опыта по созданию адаптивных биморфных зеркал для лазерных систем выдвинуто и обосновано предложение по разработке по мозаичной технологии крупногабаритного биморфного адаптивного главного зеркала для астрономического телескопа. Его внешний диаметр

составляет 3,3 м, и для управления им в зависимости от компенсируемой аберрации необходимо от 12 до 36 каналов. Данный проект не имеет аналогов. Достаточно сказать, что на сегодняшний день существует в мире лишь один проект [35] адаптивного телескопа с биморфным зеркалом, осуществляемый Гавайским университетом. Размер деформируемого зеркала не превышает 30 мм (при диаметре главного зеркала 3,6 м).

Возвращаясь к лазерным биморфным адаптивным зеркалам, отметим, что впервые их работоспособность в составе адаптивной системы была продемонстрирована еще в работах [38] Московского государственного университета. В этих исследованиях излучение маломощного лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм) фокусировалось через произвольно искажающую среду в узкое отверстие диаметром 40 мкм. Адаптивная система имела 15 каналов управления: 2 канала принадлежали зеркалу — корректору наклонов, а остальные 13 — модальному корректору в виде гибкого зеркала на основе биморфного пьезоэлемента. Настройка осуществлялась методом апертурного зондирования с использованием специального градиентного алгоритма. Время, затрачиваемое на одну итерацию по 15 степеням свободы, составляло 0,2 с, что говорит о невысоком быстродействии системы, связанном, в первую очередь, с несовершенством компьютерного обеспечения. Тем не менее, система за 5—10 с компенсировала любые искусственно вносимые искажения в волновой фронт (величиной до  $5\lambda$ ) и позволила в 20 раз увеличить мощность излучения, прошедшего через малую диафрагму.

Наибольший интерес представляет демонстрация действенности адаптивной системы в реальном времени в составе мощной лазерной установки.

В работе [39] Научно-исследовательского центра "Радуга" (Радужный, Владимирская обл.) представлены результаты изучения функционирования линейной адаптивной оптической системы на стенде с импульсно-периодическим  $\text{CO}_2$ -лазером со средней мощностью около 100 кВт. Адаптивная система состоит из 25-элементного анализатора волнового фронта гартмановского типа, специализированного микропроцессора, гибкого охлаждаемого зеркала с семью приводами управления (для компенсации сферичности), управляемого плоского охлаждаемого зеркала (для компенсации наклонов фазового фронта). Для определения возможной точности компенсации этих искажений в указанных контурах коррекции проводились измерения искажений волнового фронта мощного лазера в ряде частотных пусков при рабочей апертуре излучения 200 мм, причем регистрировались входные и скорректированные величины наклонов по двум выбранным угловым координатам, а также аналогичные данные по стрелке прогиба (сферы).

Входные величины искажений фронта вырабатывались средствами адаптивной оптики в процессе выполнения обычных процедур измерения гартмановским датчиком и восстановления волнового фронта в микропроцессоре по заданному алгоритму. Скорректированные величины измерялись независимо от средств адаптивной оптики с помощью дополнительных датчиков наклона волнового (фазового) фронта и сферичности в течение пуска.

Эксперименты показали, что адаптивный контур обеспечивает компенсацию возмущений типа наклона волнового фронта (изменяющегося в пределах от 0 до  $5 \cdot 10^{-4}$  рад.) с точностью порядка 2—3 %. Временной ход сигнала с дополнительного датчика сферичности не показывает заметных изменений радиуса кривизны гибкого зеркала, что связано с изначально малой величиной сферической составляющей измеряемого волнового фронта. Однако вспомогательные интерференционные измерения формы

поверхности гибкого зеркала показали, что оно обрабатывает заданные возмущения сферы.

Данная работа представляет, к сожалению, один из немногих примеров демонстрации возможностей адаптивных средств по компенсации аберраций низкого порядка в реальных условиях мощного лазерного стенда. Гораздо активнее адаптивная оптика входит в состав крупногабаритных астрономических телескопов. В работе [40] Научно-производственного объединения "Астрофизика" обсуждается концепция создания Большого астрономического телескопа России, который будет иметь составное главное зеркало общим диаметром 10 м и использовать средства адаптивной оптики. Здесь рабочим будет инфракрасный диапазон. В видимом диапазоне Россия уже обладает крупнейшим в мире телескопом диаметром 6 м. В отчете Российской Академии наук [41] сообщается о начале его модернизаций на базе адаптивной оптики, что позволит ему иметь эффективное угловое разрешение выше, чем у известного американского космического телескопа "Хаббла" (The Hubble Space Telescope) стоимостью 8 млрд. дол.

#### **Обращение волнового фронта на основе динамических нелинейных явлений**

Потребности в настоящее время технологических применений способствуют интенсивному росту мощности промышленных твердотельных лазерных установок. Однако возникающие многочисленные нелинейные явления в активном элементе лазера существенно ухудшают параметры выходного пучка, снижая тем самым общую эффективность и качество ряда технологических операций. Применительно к импульсным и импульсно-периодическим лазерам проблема может быть радикально решена привлечением принципов ОВФ на пути реализации схем "генератор — усилитель с ОВФ-зеркалом".

В работе [42] Института общей физики РАН продемонстрирован импульсно-периодический неодимовый лазер на ортоалюминате иттрия с пластинчатым усилителем, имеющий при частоте повторения импульсов до 5 Гц энергию каждого импульса 3 Дж в пучке с близкой к дифракционной расходимостью. Решающим было использование ВРМБ-зеркала, обращающего волновой фронт излучения после первого прохода усилителя. В качестве ВРМБ-активных сред использовались  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{TiCl}_4$ , фреон. Коэффициент отражения ВРМБ-зеркала составлял 0,6—0,7. После отражения от ВРМБ-зеркала излучение на обратном проходе через систему благодаря использованию вентиля Фарадея и кварцевого вращателя плоскости поляризации отражалось от поляризатора и выводилось наружу мимо задающего генератора.

В качестве активного элемента задающего генератора использовался стержень длиной 100 мм и диаметром 4 мм, размещенный в стандартном квантроне. Модуляция добротности осуществлялась с помощью пассивного затвора на основе кристалла  $\text{LiF} : \text{F}_2^-$  с начальным пропусканием 0,25. Для эффективной селекции моды  $\text{TEM}_{00}$  в резонатор вводилась диафрагма диаметром 1,5 мм. Излучение задающего генератора с энергией 4 мДж и длительностью по полувысоте 17 нс расширялось в телескопе до диаметра 9 мм и после некоторых дополнительных преобразований поступало в усилитель.

При необходимости частота может быть повышена до 15 Гц, определяемая порогом термооптического разрушения активного элемента. По мнению

авторов, предложенная схема построения является оптимальной для лазеров с приведенными выходными характеристиками.

В работах [43, 73] Государственного оптического института проведено исследование обращения волнового фронта в лазерном усилителе на фосфатном стекле с выходной апертурой 12 см. Продемонстрировано ОВФ в многокаскадном лазерном усилителе на неодимовом стекле с усилением слабого сигнала  $10^4$  и энергией на выходе до 450 Дж при длительности импульса 30 нс.

В качестве механизма ОВФ использовалось ВРМБ сфокусированной накачки (с энергией до 4 Дж) в ацетоне,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{D}_2\text{O}$  и неодимовом стекле.

Коэффициент отражения от ВРМБ-зеркала по энергии 0,2—0,5. Применение такого зеркала обеспечило высокое качество обращенного пучка и эффективное использование запасенной в неодимовом усилителе энергии. Достигнута яркость обращенного излучения, усредненная по дифракционному углу, выше  $2 \cdot 10^{17}$  Вт/(см<sup>2</sup>-стерадиан).

В Научно-исследовательском институте комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (Сосновый Бор, Ленинградская обл.), входящем во Всероссийский научный центр "Государственный оптический институт", проведено исследование точности управления диаграммой направленности лазера на неодимовом стекле с ОВФ-излучения при использовании внутрирезонаторного пространственно-временного модулятора света [78].

Для ряда технологических примесей лазеров требуется эффективно управлять диаграммой направленности лазерного излучения, в частности, быстро переключать направления лазерного пучка. При небольших угловых перемещениях направления, не превышающих нескольких градусов, наиболее эффективным способом управления может оказаться метод внутрирезонаторного управления направлением лазерного излучения с помощью пространственно-временных модуляторов света [44], сопряженных с ОВФ-усилителем.

Основные достоинства такого метода управления излучением — возможность осуществления высоких скоростей переключения направления пучков с большим диаметром, связанная с отсутствием инерционных оптико-механических выходных устройств, которые используются в традиционных способах управления лазерным пучком, и возможность автоматизации технологических процессов.

В описываемой работе направленность излучения лазерного усилителя с ОВФ-зеркалом задавалась путем использования в задающем генераторе светуправляемого пространственно-временного модулятора типа "ПРОМ" на основе силиката висмута с соответствующим устройством электронного управления. В проведенных экспериментах для управления работой модулятора использовалось моноимпульсное излучение второй гармоники неодимового лазера с плотностью энергии записывающего излучения 1 мДж/см<sup>2</sup>.

В конечном итоге, энергия управляемого по направлению выходного пучка неодимового усилителя с ОВФ достигала 20—150 Дж и ограничивалась в основном лучевой прочностью элементов схемы развязки и предусилителя. Показано, что точность управления направлением излучения составляет не хуже 0,3 дифракционной расходимости пучка при времени отклика модулятора на управляющий сигнал 500 мкс. Многократное ОВФ-излучение не вызывает ухода направления пучка диаметром 100 мм выше 0,1 дифракционного угла.

Значительный интерес к ОВФ-излучению  $\text{CO}_2$ -лазера при четырехволновом смещении (ЧВС) обусловлен беспороговым характером процесса и воз-

возможностью отражения с усилением. К настоящему времени ОВФ-излучение  $\text{CO}_2$ -лазера реализовано при ЧВС в резонансно-поглощающих газах, полупроводниках, тонких слоях поглощающих жидкостей и жидких кристаллах. Расширение диапазона выходных характеристик ОВФ и повышение эффективности отражения пробной волны с высоким качеством обращения неразрывно связаны с поиском и исследованием новых нелинейных сред.

С этой точки зрения представляется перспективным анализ ОВФ-излучения  $\text{CO}_2$ -лазера при ЧВС в сжиженных инертных газах, содержащих малые добавки резонансно-поглощающих молекул. Подобные исследования были недавно проведены в Институте общей физики РАН [45].

Основная исходная посылка сводилась к следующему.

В такой среде пространственно-периодическая поправка к показателю преломления может сформироваться в результате поглощения активной молекулой резонансного кванта и последующей термализации возбуждения. В условиях низкой теплопроводности, свойственной сжиженным инертным газам, выделение энергии в процессе VT-релаксации приведет к сильному локальному перегреву жидкости вблизи молекулы и, следовательно, к высокому контрасту наведенной решетки показателя преломления. К достоинствам предлагаемой схемы ОВФ следует также отнести высокий порог оптического пробоя сжиженных инертных газов (около  $400 \text{ Дж/см}^2$ ), сравнительно высокие температуры сжижения и др.

Конкретно, исследовалось ОВФ в сжиженном криптоне при добавлении небольшого количества  $\text{SF}_6$ . Эксперименты подтвердили высокую эффективность предложенной схемы ОВФ-излучения  $\text{CO}_2$ -лазера. На длинноволновом крыле линии поглощения  $\text{SF}_6$  при плотности энергии накачки  $2 \text{ Дж/см}^2$  получен коэффициент отражения по интенсивности порядка 300 %. Эксперименты проводились в основном при концентрации  $\text{SF}_6$  на оптимальном уровне  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

В работе [46] Института прикладной физики (Нижний Новгород) экспериментально отработана схема узкополосного адаптивного многопроходного усилителя с ОВФ-зеркалами на ЧВС. При накачке таких ОВФ-зеркал излучением двух независимых задающих генераторов реализован трехпроходный  $\text{CO}_2$ -усилитель с двумя четырехволновыми зеркалами на основе тепловой нелинейности в жидкости  $\text{CCl}_4$  с полным усилением  $2 \cdot 10^{11}$ . Экспериментально реализованы двух- и четырехпроходный режимы работы с коэффициентами усиления соответственно  $1,5 \cdot 10^7$  и  $5 \cdot 10^9$ .

Оригинальная работа [47] была выполнена в Физическом институте им. П. Н. Лебедева, где в качестве нелинейного элемента ОВФ-зеркала на ЧВС впервые была использована активная среда молекулярных  $\text{CO}_2$ - и  $\text{CO}$ -лазеров. Здесь линейно поляризованное пробное излучение лазера направлялось в собственную внутрирезонаторную инвертированную среду. Отраженное назад от активной среды излучение регистрировалось как в ближней, так и в дальней зонах. Коэффициент ОВФ отражения по энергии достигал в условиях экспериментов 2 % для  $\text{CO}_2$ -лазера и 0,2 % — для  $\text{CO}$ -лазера.

#### **Псевдообращение волнового фронта статическими линейными ретрорефлекторными зеркалами**

Исследование особенностей формирования диаграммы направленности лазерного излучения в резонаторах со статическими ретрорефлекторными зеркалами в последнее время привлекает все большее внимание. Это связа-

но с тем, что использование ретрозеркала в качестве одного из отражателей резонатора может привести к компенсации оптических неоднородностей активной среды и вследствие этого увеличить яркость лазерного излучения. Привлекательными в этом подходе являются беспороговость и линейность процессов в ретрозеркале, а также широкий допустимый спектральный диапазон, определяемый только характеристиками прозрачности используемого материала.

Данному вопросу посвящен цикл работ [48—51] Государственного научного центра — Научно-производственного объединения “Астрофизика”.

В отличие от обращения волнового фронта методами нелинейной оптики подобную же задачу в некотором приближении можно решить, используя классические оптические элементы, такие, как уголковые отражатели, трипельпризмы, прямоугольные призмы и призмы Дове, линзы с плоским зеркалом в их фокусе (устройство типа “кошачий глаз”). Плоский фронт волны такие элементы ретроотражают практически идеально (без учета дифракции). Произвольный фронт волны может быть ретроотражен (обращен) мозаикой из таких элементов, если размер элемента меньше характерного размера возмущения волнового фронта, другими словами, если фронт волны можно аппроксимировать кусочно-плоским фронтом. Из-за естественной некогерентности взаимного расположения малых ретрорефлекторных элементов отдельные участки обращенного фронта будут в этом случае нефазированы и эффективная расходимость интегрального обращенного фронта будет не меньше дифракционной от отдельного элемента (а не всей мозаики). В этом смысле применяемого к таким мозаичным ретрозеркалам термина “псевдообращение” волнового фронта.

В вышеупомянутых работах использовались зеркала из набора (мозаики) большого числа (от 7 до 500) трипельпризм полного внутреннего отражения из кварца. Наименьший характерный поперечный размер был 5—10 мм. Точность изготовления угла при вершине призм не хуже 1—2 угл. с. Призмы собирались в единый блок без склейки с помощью специальной оправы.

В проведенных экспериментах осуществлена компенсация динамических и оптических неоднородностей активной среды неодимового и йодного лазеров, а также их оптического тракта с уменьшением расходимости излучения в 5—10 раз; реализованы внутррезонаторное управление лучом и формирование сложных диаграмм направленности заданной конфигурации; осуществлено самонаведение излучения на зеркальную мишень с угловым размером 30 мкрад [48].

Теоретически и экспериментально показано, что расходимость излучения высокоэнергетического неодимового лазера с ретрозеркалом вследствие автофазировки его элементов может быть значительно снижена по сравнению с дифракционным пределом на одном элементе ретрозеркала. В данном случае автофазировка облегчалась достаточно широкой линией люминесценции активного элемента ( $\delta\lambda/\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ ) [50—51]. Наблюдаемые здесь явления качественно совпадают с процессами фазировки набора лазеров.

### Методы фазирования наборов лазеров

Одним из очевидных способов увеличения энергии лазерного излучения является суммирование излучения отдельных генераторов. Однако для эффективной фокусировки общего излучения необходимо обеспечить пространственно-временную когерентность его компонентов, другими словами, осуществить фазирование набора лазеров. Это далеко не тривиальная зада-

но с тем, что использование ретрозеркала в качестве одного из отражателей резонатора может привести к компенсации оптических неоднородностей активной среды и вследствие этого увеличить яркость лазерного излучения. Привлекательными в этом подходе являются беспороговость и линейность процессов в ретрозеркале, а также широкий допустимый спектральный диапазон, определяемый только характеристиками прозрачности используемого материала.

Данному вопросу посвящен цикл работ [48—51] Государственного научного центра — Научно-производственного объединения “Астрофизика”.

В отличие от обращения волнового фронта методами нелинейной оптики подобную же задачу в некотором приближении можно решить, используя классические оптические элементы, такие, как уголковые отражатели, трипельпризмы, прямоугольные призмы и призмы Дове, линзы с плоским зеркалом в их фокусе (устройство типа “кошачий глаз”). Плоский фронт волны такие элементы ретроотражают практически идеально (без учета дифракции). Произвольный фронт волны может быть ретроотражен (обращен) мозаикой из таких элементов, если размер элемента меньше характерного размера возмущения волнового фронта, другими словами, если фронт волны можно аппроксимировать кусочно-плоским фронтом. Из-за естественной некогерентности взаимного расположения малых ретрорефлекторных элементов отдельные участки обращенного фронта будут в этом случае несфазированы и эффективная расходимость интегрального обращенного фронта будет не меньше дифракционной от отдельного элемента (а не всей мозаики). В этом смысл применяемого к таким мозаичным ретрозеркалам термина “псевдообращение” волнового фронта.

В вышеупомянутых работах использовались зеркала из набора (мозаики) большого числа (от 7 до 500) трипельпризм полного внутреннего отражения из кварца. Наименьший характерный поперечный лучу размер был 5—10 мм. Точность изготовления угла при вершине призм не хуже 1—2 угл. с. Призмы собирались в единый блок без склейки с помощью специальной оправы.

В проведенных экспериментах осуществлена компенсация динамических и оптических неоднородностей активной среды неодимового и йодного лазеров, а также их оптического тракта с уменьшением расходимости излучения в 5—10 раз; реализованы внутрирезонаторное управление лучом и формирование сложных диаграмм направленности заданной конфигурации; осуществлено самонаведение излучения на зеркальную мишень с угловым размером 30 мкрад [48].

Теоретически и экспериментально показано, что расходимость излучения высокоэнергетического неодимового лазера с ретрозеркалом вследствие автофазировки его элементов может быть значительно снижена по сравнению с дифракционным пределом на одном элементе ретрозеркала. В данном случае автофазировка облегчалась достаточно широкой линией люминесценции активного элемента ( $\delta\lambda/\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ ) [50—51]. Наблюдаемые здесь явления качественно совпадают с процессами фазировки набора лазеров.

### Методы фазирования наборов лазеров

Одним из очевидных способов увеличения энергии лазерного излучения является суммирование излучения отдельных генераторов. Однако для эффективной фокусировки общего излучения необходимо обеспечить пространственно-временную когерентность его компонентов, другими словами, осуществить фазирование набора лазеров. Это далеко не тривиальная зада-

ча, которая в общем виде пока далека от практического решения и обсуждается больше в концептуальном плане или в модельных экспериментах.

Методы фазирования наборов лазеров сводятся к организации обмена излучением между идентичными лазерами, входящими в набор [52—56]. Использование согласованных амплитудных дифракционных решеток для этой цели имеет определенные преимущества перед другими способами. Однако системы лазеров, сфазированных с помощью амплитудных дифракционных решеток, имеют неустранимый недостаток — высокую чувствительность к неизбежной неидентичности лазеров, входящих в набор.

В только что появившейся работе [57] сотрудников Государственного оптического института теоретически обосновывается принципиально другой путь фазирования набора лазеров с использованием фазовой согласованной решетки в сопряженном резонаторе. Каждый элемент этой решетки — линза с фокусным расстоянием  $f$ . Период ее равен  $d_2 = F/d_1$ , где  $d_1$  — период решетки лазеров;  $F$  — фокус линз резонатора. Фазовая решетка помещается в фурье-плоскости сопряженного резонатора.

Анализ показывает, что предложенный метод оптической связи с использованием фазовых согласованных решеток позволяет создать суперрезонатор, имеющий преимущества, характерные для неустойчивых резонаторов: несопоставимо меньшую, чем у плоских резонаторов, чувствительность к возмущениям, более равномерное распределение амплитуды супермоды по отдельным лазерам и более удобную в ряде случаев возможность дифракционного вывода излучения.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

##### Тепловая дефокусировка мощного луча

В работе [58] сотрудников Научно-исследовательского центра "Радуга" (Радужный, Владимирская обл.) представлены результаты комплексных экспериментальных исследований по формированию и транспортировке излучения мощного импульсно-периодического  $\text{CO}_2$ -лазера через оптический тракт и по горизонтальной атмосферной трассе длиной 500 м. Излучение лазера мощностью около 100 кВт с угловой расходимостью  $(3-6) \cdot 10^{-4}$  радиан, что составляет 2—3 дифракционных предела, направляется по горизонтальному газонаполненному лучеводу (длиной 40 м) в формирующую телескопическую систему с 18-элементным составным главным зеркалом 1,8 м и увеличением 5,6. Далее, пройдя горизонтальный приземный участок трассы, оно фокусировалось в плоскости измерительной системы, определяющей параметры лазерного пучка в дальней зоне.

Волновой фронт излучения мощного  $\text{CO}_2$ -лазера претерпевал искажения вследствие собственной угловой расходимости, аббераций оптического тракта, включая телескоп, за счет термодеструкций оптики, а также нелинейного теплового "самодействия" излучения в атмосфере и турбулентности атмосферы.

Измерительный комплекс состоял из аппаратуры, определяющей энергетические и пространственно-энергетические характеристики, а также колебания оси диаграммы направленности излучения вблизи лазера и на расстоянии 500 м.

Эксперименты показали, что прокачка лучевода азотом, охлаждение металлооптики, работа адаптивной системы телескопа обеспечили эффективную доставку мощного излучения на измерительную площадку с угловой

расходимостью  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  радиан, что близко к дифракционному пределу одной субапертуры составного нефазированного телескопа. Зафиксированный видеофильм отражал изменения структуры пятна в дальней зоне в каждом импульсе излучения на измерительной площадке в конце трассы в зависимости от угловой расходимости излучения лазера и состояния оптического тракта.

Экспериментальные исследования распространения мощного непрерывного или импульсно-периодического излучения в атмосфере довольно трудоемки и, как правило, имеют уникальный характер. Поэтому теоретические исследования этого процесса обычно гораздо представительнее и шире охватывают этот важный вопрос. Поэтому отметим некоторые интересные работы подобного плана за последние годы.

В работе [59] Института атомной энергии исследовано самовоздействие пучков света при распространении в слабо поглощающих средах. Получено аналитическое решение для тепловой самофокусировки светового пучка с параболическим распределением интенсивности. С помощью теоремы Эренфеста выведено выражение для смещения пучка света в движущейся среде при произвольной зависимости скорости среды от координаты вдоль пучка.

В работе [60] Института радиотехники и электроники, посвященной вопросу теплового самовоздействия сильнофокусированных лазерных пучков в атмосфере, численно исследовано распространение непрерывного лазерного пучка (с длиной волны 10,6 мкм) на атмосферных трассах, протяженность которых много меньше дифракционной длины:

$$L_d = k r^2,$$

где  $k$  — волновое число;  $r$  — начальный радиус пучка.

В этом случае обусловленная фокусировкой перетяжка пучка должна быть выражена сильно, площадь фокального пятна много меньше площади излучающей апертуры (сильная фокусировка) и можно ожидать значительного увеличения интенсивности излучения в фокусе. Заметим, что большинство предыдущих работ исходило из противоположной посылки, т. е. когда фокусное расстояние больше дифракционной длины и, по меньшей мере, дифракционная расходимость препятствует достижению особо высоких интенсивностей в фокусе.

Для выбранной схемы, соответствующей большинству реальных приложений, определены условия, при которых тепловые искажения сильнофокусированного пучка не препятствуют созданию высокой интенсивности в его фокальной плоскости. На основе выбора соотношения между начальным радиусом пучка и фокусным расстоянием предложен способ оптимизации, позволяющий существенно повысить концентрацию мощности лазерного излучения в точке приема и уменьшить отклонение пучка на трассе.

Традиционно вопросы распространения лазерного излучения в атмосфере занимают важное место в исследованиях Института оптики атмосферы (г. Томск). В работе [61] рассмотрена фокусировка мощного лазерного пучка при тепловом самовоздействии в движущейся среде. На основе численного моделирования изучены особенности самовоздействия мощного лазерного излучения при распространении в атмосфере в условиях флуктуаций скорости ветра. Анализировались случаи флуктуаций скорости движения среды, продольных и поперечных направлению среднего потока. Методом статистических испытаний оценены средняя интенсивность и дисперсия флуктуаций интенсивности в фокальной плоскости излучателя. Показано, что

флуктуации скорости ветра заметно ослабляют нелинейную рефракцию и тепловое расплывание фокусированных пучков.

В статье [62] автора из Государственного технического университета (С.-Петербург) рассмотрена оптическая турбулентность нового типа, обусловленная филаментацией вертикального лазерного пучка при тепловой самодефокусировке в газах и жидкостях. Показано, что светоиндуцированное конвективное течение вдоль луча выделяет оптимальный масштаб самодефокусировки и оптимальный (нелинейный) радиус когерентности излучения. При этом достигается минимальная расходимость пучка и формируется гранулярная, флуктуирующая структура излучения. Оптическая турбулентность предшествует гидродинамической турбулентной конвекции и не связана с конвективными неустойчивостями или конвективными структурами в жидкости. Проводится сопоставление полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

В теоретической работе [63] сотрудников Института механики Московского государственного университета анализируется влияние различных механизмов на изменение показателя преломления при поглощении излучения с длиной волны 2,8 мкм атмосферным водяным паром. Получены условия, при выполнении которых влиянием изменения поляризуемости среды вследствие возбуждения молекулярных колебаний  $H_2O$  при одновременном изменении плотности среды можно при вычислении показателя преломления пренебрегать. Показана возможность образования фокусирующей тепловой линзы в канале луча.

В работах [1, 64] представителя Опытного-конструкторского бюро "Гранат" (Москва) рассмотрена в дифракционном и геометрооптическом приближении проблема передачи мощного лазерного излучения через турбулентную атмосферу на удаленные движущиеся объекты типа космических аппаратов.

Как известно, одной из проблем, затрудняющих передачу энергии в космос через атмосферу, является искажение волнового фронта излучения из-за атмосферной турбулентности. Для преодоления возникающих затруднений предлагается использовать адаптивную оптику, позволяющую компенсировать искажения волны и концентрировать излучение на приемном устройстве спутника. При этом обычно осуществляются анализ волны, испущенной космическим лазером-маяком, обращение волнового фронта и возврат усиленной волны на спутник, т. е. реализуется известный метод фазового сопряжения.

При использовании такой схемы, однако, возникает угловая абберация, в результате которой возвращаемый луч отстает от принимающего объекта (для геостационарного спутника это отставание может достигать 700 м). В работе [1] предложено дополнить обычную схему обращения волнового фронта поворотом луча, учитывающим угловую абберацию. При этом может ухудшиться качество восстановления волнового фронта, поскольку обратный луч смещается относительно направления прихода. Только при условии малости этого смещения по сравнению с радиусом когерентности волны можно рассчитывать на эффективную передачу энергии.

В указанных работах методом геометрической оптики, а затем и методом плавных возмущений (методом Рытова), являющимся существенно дифракционным приближением, получены выражения для корреляционной функции фазы и уровня излучения, соответствующие предложенной схеме. Найдены параметры, при которых угловая абберация еще не препятствует эффективной передаче в космос энергии (скорее всего, лазеров на свободных электронах), а также определена область применимости метода геометрической оптики в рассмотренной задаче.

Результаты экспериментальной регистрации чрезвычайно интересного эффекта — кинетического охлаждения атмосферы в поле луча мощного импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера изложены в работе [65]. Дело в том, что при распространении излучения этого лазера в атмосфере происходит резонансное поглощение на переходе  $10^0\text{—}00^1$  молекул углекислого газа. Нарушенное равновесие нижнего уровня перехода  $10^0$  восстанавливается за счет поступательных степеней свободы, что и приводит к кинетическому охлаждению воздуха. Однако одновременно воздух нагревается за счет практически мгновенной термализации энергии, поглощаемой парами воды. Баланс этих процессов определяет конечный результат.

До проведения описываемой работы все экспериментальные наблюдения кинетического охлаждения осуществлялись в лабораторных условиях в сухих смесях  $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—O}_2$  при концентрациях  $\text{CO}_2$ , значительно превышающих атмосферную.

В данной работе эффект впервые наблюдался в открытой атмосфере. Он регистрировался оптико-акустическим методом при различных метеоусловиях в приземном слое атмосферы. Лазер имел длительность импульса около 5 мкс, что много меньше времени пробега звука поперек пучка. Кратковременное понижение температуры в канале пучка приводит к тому, что давление в нем сначала падает, а затем в результате термализации поглощенной энергии увеличивается. Максимальный временной интервал — 0,8 мс, в течение которого изменение давления отрицательно, был зарегистрирован в эксперименте, проведенном зимой при температуре  $-5,6^\circ\text{C}$  и абсолютной влажности  $2,6\text{ г/м}^3$ .

### Оптический пробой в атмосфере

Возникновение ионизованного канала в воздухе под действием лазерного излучения возможно двумя принципиально отличающимися путями: в режиме длинной лазерной искры и в режиме многофотонной ионизации.

подавляющее число исследований ориентировано на первый вариант, и число работ в этом направлении, в основном базирующихся на лазерах инфракрасного диапазона, сегодня достаточно велико. Отметим наиболее интересные из них.

В реальных условиях оптический пробой в атмосферном воздухе инициируется на поверхности аэрозольных частиц, что и предопределяет дискретную структуру разряда. В совместной работе [66] Института общей физики и Института высоких температур экспериментально изучался протяженный оптический пробой под действием излучения импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера, импульс которого имел энергию 120 Дж при длительности 50—100 нс. Определен порог пробоя на уровне  $5\text{ Дж/см}^2$ , соответствующий наличию в воздухе частиц с размером около 1 мкм. Длина искры достигала 18 м при фокусном расстоянии 40 м. Средняя плотность плазмоидов составила  $10\text{ м}^{-1}$ .

Импульсный неодимовый лазер в условиях длиннофокусной фокусировки луча также создает дискретную лазерную искру. Однако в работе [67] Института высоких температур удалось получить сплошную искру длиной до 20 см при аксиконной фокусировке луча с длительностью импульса 40 нс. Угол при основании аксикона (в виде стеклянного конуса) в этом случае должен быть в пределах 10—23 град. Попытка удлинить искру уменьшением угла до 5 град привела к возрождению четочной структуры искры. Тем не менее, полученная сплошная оптическая искра в дальнейшем стала объектом пристального изучения, как не имевший аналогов эффект.

В работе [68] Физического института им. П. Н. Лебедева изучалось возникновение проводящего канала в воздухе под действием ультракороткого импульса (длительностью 10 пс) ультрафиолетового излучения терраваттной мощности ( $> 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>). При этом энергия лазерного импульса составляла всего 5 мДж. Показано, что в результате многофотонной ионизации возникает кратковременно существующий (примерно 100 нс) протяженный проводящий канал с концентрацией электронов до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

Возникающие здесь электроны быстро прилипают к молекулам кислорода в результате процессов тройного соударения, практически уничтожая тем самым проводимость подобного канала.

В работе [10] для поддержания проводимости в воздушном лазерно-индуцированном канале предложено компенсировать потерю электронов из-за прилипания процессами фотоотрыва электронов от отрицательных ионов кислорода O<sub>2</sub><sup>-</sup>. Проведенный анализ базируется на уникально малом электронном средстве для O<sub>2</sub><sup>-</sup> — всего 0,43 эВ. Фотоотрыв может быть осуществлен излучением эффективного неодимового лазера (с энергией кванта около 1 эВ), стартующего одновременно и распространяющегося вместе с ионизирующим ультрафиолетовым лазерным излучением. При этом баланс фотоотрыва с прилипанием достигается уже при уровне интенсивности порядка  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Такая интенсивность легко обеспечивается даже в режиме свободной генерации, длительность которой в типичных твердотельных лазерных установках составляет 100—1000 мкс. Этого времени (при устранении пиковой структуры излучения) достаточно, например, для поддержания развития практически любого электрического разряда.

## ОПЕРАТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

### Коммерчески доступные элементы и системы фокусировки мощного луча

Ведущие предприятия лазерной индустрии России, занимающиеся разработкой и промышленным выпуском мощных лазерных технологических установок, как правило, сами производят элементы и системы фокусировки мощного излучения как для собственных нужд, так и для коммерческой реализации.

Казанское опытно-конструкторское бюро "Союз" (г. Казань) специализируется в области наиболее мощных технологических СО<sub>2</sub>-лазеров (8—25 кВт). Одновременно оно готово поставлять на заказ целую гамму соответствующих оптических элементов, изготовленных по технологиям современного уровня. Ниже приведены описания и характеристики наиболее ходовых элементов этой "силовой" оптики: зеркал, коллимирующих и фокусирующих объективов [69].

Металлические зеркала используются в оптических резонаторах импульсно-периодических и непрерывных газовых лазеров инфракрасного диапазона, в оптических системах формирования, передачи и фокусировки лазерных пучков. В них предусмотрено воздушное и водяное охлаждение, а также теплоотвод по контакту с радиатором.

Метод изготовления отражающей поверхности — алмазное точение на прецизионных станках или полирование с последующим нанесением антикоррозионных, отражающих и защитно-отражающих покрытий. Это позволяет получить высокую точность геометрии и качество зеркальной

поверхности плоских, сферических и асферических отражателей. Основные технические характеристики следующие:

материал:	
рабочей поверхности .....	медь, алюминиевые сплавы
покрытия .....	золото, медь, германий, кремний, диэлектрики
тип покрытия .....	одно- или многослойное
форма рабочей поверхности .....	плоскость, сфера, параболоид, гиперболоид, эллипсоид, цилиндр
точность изготовления .....	$\lambda/60$
шероховатость поверхности, А .....	30—100
коэффициент отражения, % .....	98,5—99,5
рабочая длина волны, мкм .....	10,6
максимальная плотность мощности, кВт/см <sup>2</sup> .....	3—5
установленный ресурс, ч .....	5000
предельные габаритные размеры, мм .....	250—400

Двухпозиционный коллимирующий объектив предназначен для преобразования расходящегося выходного пучка генератора излучения в параллельный пучок и направления его на один из двух технологических постов без дополнительной юстировки. Основные технические характеристики следующие:

диаметр сколлимированного пучка, мм .....	50
диапазон углов позиционирования, град .....	50
расход хладагента, г/с .....	< 100
масса объектива, кг .....	< 30

Острофокусирующие объективы "Форс-1" и "Форс-2" предназначены для резки и сварки лазерным излучением различных конструкционных материалов большой толщины. Основные технические характеристики следующие:

апертура лазерного пучка, мм .....	60
мощность излучения, кВт .....	20
фокусное расстояние, мм .....	360 и 255
форма поверхности зеркал .....	сфера
охлаждение .....	водяное
масса, кг .....	10 и 15

Узел поворотного зеркала предназначен для отклонения лазерного луча от исходного направления и передачи его к месту проведения технологических операций. Основные технические характеристики:

угол отклонения, град .....	60 или 90
апертура луча, мм .....	30
расход хладагента, г/с .....	< 100
масса, кг .....	< 1,5

Ряд отечественных предприятий выпускает для коммерческого распространения зеркала для промышленных лазеров с непрерывным или частотно-импульсным режимом работы, с помощью излучения до 100 кВт, работающих в инфракрасной или ультрафиолетовой области. Ниже даны характеристики зеркал для излучения с длиной волны 10,6 мкм, изготавливаемых на заказ [70]:

световой размер, мм .....	200
форма оптической поверхности .....	сфера, асферика, внеосевая асферика
точность изготовления .....	$\lambda/20$
термодеформации .....	$< \lambda/30$
коэффициент отражения, % .....	99,3—99,8
материал .....	кремний

В зависимости от режима работы лазера и мощности излучения зеркала исполняются двух типов — неохлаждаемые и с внутренней системой охлаждения.

Возможна поставка типовых зеркал и зеркал, выполненных по индивидуальным заказам партиями до 50—100 шт./год.

На российский рынок все увереннее выходят частные и акционерные предприятия, специализирующиеся в определенных областях лазерной техники. Так, фирма "Турн" ("Turn Ltd", Калининград, Московская обл.) предлагает серию высококачественных адаптивных зеркал стоимостью порядка 10 000 дол, предназначенных для работы с излучением CO<sub>2</sub>-лазеров мощностью до 15 кВт [71, 72]. Основные технические характеристики этих адаптивных зеркал приведены ниже:

материал:	
зеркала .....	медь, молибден, инвар, кремний
отражающего покрытия .....	медь, серебро
защитное покрытие .....	сапфир, окись гафния, флюоропластик, окись циркония
диаметр световой зоны, мм .....	30—100
норма световой зоны .....	круг, эллипс, кольцо
коэффициент отражения, % .....	98,5—99,5
максимальное смещение поверхности, мкм .....	15
воспроизводимые полиномы Цернике, $Z_{ij}$ .....	$i = 1, 6, j = 1, 4$
число актюаторов .....	1—40
управляющее напряжение, В .....	$< 300$
резонансная частота, кГц .....	$> 2$
расход хладагента, л/мин .....	$< 2$
хладагент .....	вода, метанол
масса зеркала, кг .....	$< 2$

Данные зеркала предназначены для компенсации атмосферной турбулентности, теплового расплывания мощного пучка, обеспечения динамической юстировки оптической системы, исключения влияния вибраций установки, уменьшения исходной расходимости излучения и для других традиционных задач адаптивной оптики.

### Испытательные трассы, полигоны и стенды

Для обеспечения экспериментальных исследований энергетических и точностных характеристик лазерных комплексов с использованием нелинейно-оптических методов управления параметрами излучения и решения задач передачи лазерной энергии на большие расстояния еще в 1983 г. в филиале Государственного оптического института был создан лазерный стенд адаптивных систем "ЛАС" [73].

В составе стенда входят: мощная лазерная установка с ОВФ-излучением на неодимовом стекле ( $\lambda = 1,06$  мкм), с выходной апертурой 110 мм; искусственная оптическая трасса с реальной длиной 700 м, включающая прецизионные оптические системы в интересах моделирования дистанций до 100 км; лазерные посты, предназначенные для исследования и системной отработки лазеров с управляемой от компьютера диаграммой направленности излучения, а также создания методами импульсной голографии дифракционных оптических элементов для формирующих оптических систем.

Выполненный на стенде "ЛАС" цикл исследований методов обращения волнового фронта высокоэнергетических лазерных пучков, схем взаимной изоляции опорного и силового каналов позволил создать мощную многокаскадную лазерную систему на неодимовом стекле с ОВФ, излучающую в импульсе до 500 Дж [74—76]. Практически была достигнута предельная (дифракционная для выходной апертуры 100 мм) угловая расходимость, причем более 55 % энергии излучения содержалось в угловом растворе 30 микрорадиан.

Экспериментальные исследования на стенде процессов передачи оптических сигналов с применением алгоритма ОВФ-самонаведения в условиях моделирования протяженных дистанций показали, что даже в условиях сильных апертурных ограничений на ОВФ-устройстве и источнике пучка подсветки, характерных для больших дистанций, эффективность доставки энергии на приемное устройство может быть достаточно высокой (до 70—80 %), а точность воспроизведения направления, заданного источником подсвета ОВФ-зеркала — не хуже нескольких процентов от дифракционного предела (в экспериментах ошибка менее 1 микрорадиана).

Оснащение стенда разработанной уникальной элементной базой и практический опыт использования ее возможностей позволили перейти к следующему этапу исследовательских работ, включающему в себя комплексирование лазерных, формирующих, управляющих систем и их отработку в режиме совместного функционирования.

Для проведения экспериментальных исследований характеристик макетов лазерных информационных систем дальнего действия на стенде "ЛАС" осуществлены разработки методов и средств имитации реальных условий работы, учитывающих фактор дальности и апертурные ограничения, возмущающие эффекты на трассе распространения, нестационарность, разнообразие фоноцелевой обстановки.

В целях развития технических приложений созданного на стенде уникального лазерного оборудования в настоящее время разрабатывается проект создания мощного источника высококогерентного поля со стабилизированными пространственными и спектральными характеристиками и эталонным качеством волнового фронта. Такой источник может использоваться не только в задачах отработки комплексов аппаратуры, контроля и аттестации прецизионных оптических систем с применением нетрадиционных оптических элементов, но и для создания элементов таких систем — крупногабаритных (более  $1 \text{ м}^2$ ) голограммных оптических элементов.

В том же филиале Государственного оптического института (который сейчас называется Научно-исследовательским институтом комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем Всероссийского научного центра "Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова", г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., [73]) с 1982 г. функционирует исследовательский комплекс "Чибис", предназначенный как для изучения и оптимизации импульсно-периодических лазеров с очень большой средней мощностью (до 700 кВт), так и для экспериментальных работ по методам и техническим средствам формирования мощных световых потоков среднего инфракрасного диапазона спектра с максимально возможной направленностью.

В состав комплекса наряду с  $\text{CO}_2$ -лазером входит специальное испытательное поле, представляющее собой оптические скамьи длиной до 20 м, располагаемые на фундаменте, обеспечивающем виброразвязку оптических элементов от различных механических вибраций как здания, в котором располагается лазер, так и технического оборудования установки. Собственная частота вибраций фундамента составляет 3—4 Гц, их амплитуда не превышает 0,1—0,2 мкм.

Лазер и оптическое поле располагаются в непосредственной близости один от другого.

Измерение пространственных характеристик излучения в основном связано с регистрацией угловой расходимости излучения как в течение импульса генерации (5—30 мкс), так и от импульса к импульсу (частота до 200 Гц) и осуществляется с помощью матричных фотоприемников. Последние используют пироэлектрический эффект либо эффект увеличения электронов фотонами в полупроводниках и устанавливаются в "дальней зоне" регистрируемого излучения. Аппаратура информационно-измерительной системы основывается на принципах построения систем САМАС и позволяет регистрировать сигналы по 32 независимым каналам в течение 20 с работы стенда. Интервал дискредитации аналого-цифровых преобразователей 50—200 нс. Математическая обработка информации осуществляется по специально разработанным программам.

Для контроля фазовых искажений волнового фронта генерируемого излучения используется оригинальная аппаратура интерферометрического контроля, в основу которой заложена известная методика сдвиговой интерферометрии [77]. Аппаратура позволяет контролировать фазовые искажения волнового фронта в каждом лазерном импульсе на всех рабочих режимах работы лазера.

Исследовательский комплекс "Чибис" целиком находится в здании, и физическая длина трассы невелика, что ограничивает возможности изучения влияния реальных атмосферных условий на распространение лазерного излучения с очень большой средней мощностью (в сотни киловатт). Другой российский исследовательский центр "Радуга" (г. Радужный, Владимирская обл.) располагает условиями по комплексным исследованиям формирования

и транспортировки излучения мощного импульсно-периодического  $\text{CO}_2$ -лазера (до 100 кВт) на горизонтальной приземной атмосферной трассе длиной 500 м [58].

Измерительная база состоит из аппаратуры, определяющей энергетические и пространственно-энергетические характеристики, а также колебания оси диаграммы направленности излучения вблизи лазера и на расстоянии 500 м (в конце трассы). Контрольно-измерительные средства на основе интерферометра и аппаратура определения параметра Штреля по изображению точечного источника на  $\approx 10,6$  мкм позволили в уже проведенных экспериментах определить состояние всего тракта в "холодном" и "горячем" состояниях и выявить факторы, влияющие на искажения волнового фронта.

В работе [79] ряда сотрудников Научно-исследовательского института комплексных испытаний оптико-электронных приборов представлена и описана уникальная комплексная стендовая база, являющаяся основой для физического и математического моделирования процессов поглощения и рассеяния оптического излучения в атмосфере. Ядром комплекса служит классический вакуумный дифракционный спектрометр двойного прохождения ИКС-1, предназначенный для исследований в области 0,5—50 мкм с разрешением до  $0,02 \text{ см}^{-1}$ . Спектрометр снабжен многоходовыми кюветами с базой 5 и 1 м, позволяющими исследовать спектры газов при давлениях от  $10^{-2}$  до  $10^5$  Па (т. е. от атмосферного до десятиллионной доли атмосферного давления) и длинах пути 4—400 м. Были проведены экспериментальные исследования параметров спектральных линий атмосферы вблизи частот генерации основных типов лазеров, их температурная зависимость, формы контуров линий и столкновительные сдвиги центров линий.

Разработана также уникальная аппаратура для изучения взаимодействия интенсивного ультрафиолетового излучения с воздушной средой.

Ограниченные рамки обзора не позволяют детально воспроизвести все особенности постановки, проведения и результатов представленных работ по различным аспектам проблемы фокусировки и распространения мощного лазерного излучения. Но проведенный анализ подтверждает сохраняющийся высокий уровень исследований в России по указанной тематике, зачастую опережающий мировой уровень по отдельным вопросам. Эти исследования и разработки при соответствующих условиях могут стать надежной базой для еще более широкого внедрения лазерной техники в уже освоенные области и открытия совершенно новых ее приложений.

## Литература

1. Барышников Ф. П. // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. № 7. С. 168.
2. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. — М.: Радио и связь, 1981.
3. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. — М.: Наука, 1990.
4. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985.
5. Тараненко В. Г., Шанин О. И. Адаптивная оптика. — М.: Радио и связь, 1990.
6. Зельдович Б. Я. и др. Обращение волнового фронта. — М.: Наука, 1985.
7. Беспалов В. И., Пасманик Г. А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. — М.: Наука, 1986.
8. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. — М.: Наука, 1974.
9. Басов Н. Г., Бойко В. А. и др. Доклады Академии наук, 1967. Т. 173. № 3. С. 538.
10. Баринов В. И., Третьякова Н. В. // Прикладная физика. 1994. № 2. С. 21.
11. Ковш И. Б. // Конверсия. 1994. № 2. С. 23.
12. Любарский С. В., Химич Ю. П. // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 76.
13. Бабаянц Г. И., Смекалин В. П. и др. // Новые промышленные технологии. 1994. № 2.

14. Алексеев С. В. и др.// Там же. С. 33.
15. Информационный бюллетень./ Государственный Научный центр Российской Федерации — Научно-производственное объединение "Астрофизика", 1994.
16. Лазеры и лазерно-оптические системы.// Науч.-техн. сб./ Государственный Научный центр Российской Федерации — Научно-производственное объединение "Астрофизика", 1994.
17. LASER MARKET: Коммерческий бюллетень, 1994. № 7. С. 1.
18. Борисов А. Н., Никитин А. С. и др.// Оптический журнал. 1994. № 2. С. 68.
19. Полетимов А. И. и др.// Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 10. С. 997.
20. Лукишова С. Г. и др.// Там же. 1994. Т. 21. № 2. С. 126.
21. Вдовин Г. В., Четкин С. А.// Там же. 1992. Т. 20. № 2. С. 167.
22. Аполлонов В. В., Вдовин Г. В. и др.// Там же. 1991. Т. 18. № 2. С. 358.
23. Бобров Б. Д., Дмитриев Е. И., Снежков Г. Ю.// Там же. 1993. Т. 20. № 7. С. 680.
24. Львов Л. В., Меркулов С. Г. и др.// Там же. 1994. Т. 21. № 11. С. 1055.
25. Аполлонов В. В., Прохоров А. М. и др.// Известия Академии наук. Сер. физическая. 1983. Т. 4. № 10. С. 2050.
26. Аполлонов В. В., Зиенко С. И. и др.// Приборы и техника эксперимента. 1989. № 3. С. 206.
27. Аполлонов В. В., Иванова Е. А., Прохоров А. М.// Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 1. С. 292.
28. Аполлонов В. В., Бородин В. И. и др.// Там же. № 11. С. 1496.
29. Аксинин В. И., Аполлонов В. В. и др.// Известия Академии наук. Сер. физическая. 1991. № 2. С. 417.
30. Аполлонов В. В., Иванова Е. А. и др.// Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 12. С. 1642.
31. Иванова Е. А. и др.// Оптика атмосферы. 1992. № 3. С. 263.
32. Федин И. И., Шанин О. И. "Оптика лазеров'93": Международ. конф. — С.-Петербург.// Тез. докл. 1993. Ч. 2. С. 417.
33. Икрамов А. В. и др.// Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 7. С. 665.
34. Икрамов А. В. и др.// Оптический журнал. 1994. № 7. С. 23.
35. Икрамов А. В. и др.// Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 2. С. 180.
36. Roddier F. OE Rep. July, 1992. № 103. P. 9.
37. Воронцов М. А., Кудряшов И. А., Шмальгаузен В. И.// Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 2. С. 231.
38. Воронцов М. А. и др.// Там же. 1984. Т. 11. № 5. С. 1247.
39. Белоусова И. М., Буканов А. В. и др. "Оптика лазеров'93": Международ. конф. — С.-Петербург.// Тез. докл. 1993. Ч. 2. С. 412.
40. Белкин Н. Д. и др.// Оптический журнал. 1994. № 3. С. 31.
41. Владимиров А. В.// Вестник Российской Академии наук. 1994. № 3. С. 31.
42. Пашинин П. П., Сидорин В. С. и др.// Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 11. С. 1316.
43. Алексеев В. Н., Дмитриев Д. И. и др.// Там же. 1994. Т. 21. № 8. С. 753.
44. Владимиров Ф. Л. и др.// Там же. 1985. Т. 12. № 11. С. 2071.
45. Алимпиев С. С., Мельников И. В. и др.// Там же. 1990. Т. 17. № 12. С. 1613.
46. Бегин А. А., Ермаков К. В. и др.// Там же. 1994. Т. 21. № 7. С. 689.
47. Афанасьев Л. А., Ионин А. А. и др.// Там же. № 6. С. 557.
48. Багдасаров З. Е., Вирник Я. З. и др.// Там же. 1981. Т. 8. № 11. С. 2397.
49. Герасимов В. Б., Захаров М. В. и др.// Там же. 1986. Т. 13. № 6. С. 1278.
50. Герасимов В. Б., Заика В. М. и др.// Там же. 1987. Т. 14. № 5. С. 912.
51. Вирник Я. З., Герасимов В. Б. и др.// Там же. № 8. С. 1638.
52. Марченко В. М., Прохоров А. М.// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1978. Т. 74. № 3. С. 872.
53. Герасимов В. Б., Заика В. М. и др.// Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 5. С. 912.
54. Голубенцев А. А. и др.// Там же. 1990. Т. 17. № 8. С. 1018.
55. Александров А. Г. и др.// Там же. № 11. С. 1462.
56. Любимов В. В., Носова Л. В.// Там же. 1991. Т. 18. № 4. С. 807.
57. Любимов В. В., Носова Л. В.// Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. № 1. С. 160.
58. Белоусова И. М., Булаев В. Д. и др. "Оптика лазеров'93": Международ. конф. — С.-Петербург.// Тез. докл. 1993. Ч. 2. С. 405.
59. Веденов А. А. и др.// Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 7. С. 1427.
60. Садовников В. П., Стрелков Г. М.// Там же. 1988. Т. 15. № 7. С. 1487.
61. Коняев П. А., Лукин В. П.// Там же. № 2. С. 341.
62. Галич Н. Е.// Там же. 1994. Т. 21. № 7. С. 670.
63. Левин В. А. и др.// Там же. 1988. Т. 15. № 7. С. 1448.
64. Барышников Ф. Ф.// Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 1. С. 87.
65. Воробьев В. В. и др.// Там же. 1989. Т. 16. № 5. С. 1052.
66. Васильяк Л. М., Ветчинин С. П. и др.// Письма в журнал технической физики. 1990. Т. 16. № 18. С. 1.
67. Коробкин В. В., Марин М. Ю. и др.// Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 5. С. 959.
68. Лосев Л. Л., Сосков В. И.// Там же. 1989. Т. 16. № 1. С. 73.
69. Информационный бюллетень Казанского опытно-конструкторского бюро "Союз", 1994.

70. Информационный листок о науч.-техн. достижении № 91-2601/ Всероссийский науч.-исслед. ин-т межотр. информ., 1991.
71. LASER MARKET// Коммерческий бюллетень. 1994. № 7. С. 13.
72. Информационный бюллетень фирмы "Tupn Ltd", 1994.
73. Резунков Ю. А., Сиразетдинов В. С. и др.// Оптический журнал. 1994. № 1. С. 84.
74. Алексеев В. И., Голубев В. В. и др.// Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 3. С. 722.
75. Голубев В. В., Сиразетдинов В. С. и др.// Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. № 4. С. 885.
76. Варламова И. А., Голубев В. В., Сиразетдинов В. С.// Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 12. С. 2539.
77. Бобров Б. Д. и др.// Оптико-механическая пром-сть. 1987. № 2. С. 44.
78. Алексеев В. И. и др.// Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 8. С. 753.
79. Осипов В. М., Роговцев П. Н.// Оптический журнал. 1994. № 1. С. 101.

*Статья поступила в редакцию 13 июня 1995 г.*

## **FOCUSING AND SPREADING OF POWERFUL LASER BEAMS (The analitical review of investigations in Russia)**

**V. I. Barinov**

The All-Russia Research Institute of Interbranch Information, Moscow, Russia

*The condition and direction of domestic researches and developments in areas of laser rays focusing and spreading are submitted in given review. The perspective focalizing elements and devices, realized on the basis of linear, nonlinear and adaptive optics achievements, were included in consideration also alongside with main physical processes, determining the efficiency of powerful rays focusing.*