

## **ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ (аналитический обзор исследований в России)**

**В. И. Барин**

Всероссийский научно-исследовательский институт  
межотраслевой информации, Москва, Россия

*Проанализировано состояние исследований, разработок и номенклатуры промышленного выпуска отечественных лазеров средней мощности, ориентированных, прежде всего, на применение в прогрессивных термических технологиях.*

### **ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Сегодня трудно назвать сферу человеческой деятельности, в которой не использовалась бы лазерная техника. Без лазерных приборов и установок невозможно представить себе современное машиностроительное предприятие, производство изделий микроэлектроники или систему телекоммуникаций. Научно-технический уровень любой страны в значительной мере зависит от того, в какой степени в ней развиты лазерные исследования и практические приложения лазерной техники.

Российские ученые и инженеры внесли большой, во многих случаях определяющий вклад в разработку практически всех известных сегодня лазеров и лазерных технологий. Квантовая электроника, лазерная физика и техника в течение десятков лет оставались приоритетными для институтов Академии наук, а также для многих ведущих отраслевых институтов и предприятий физико-технического профиля. После распада СССР в 1991 г. подавляющее большинство лазерных научных и технических центров осталось в России, что обеспечило соответствующую преемственность научных исследований и технических разработок даже в сегодняшних трудных экономических и организационных условиях.

В России исследования по лазерной технике и технологии наиболее сосредоточены в Москве и Московской области, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Казани, Самаре и ряде других регионов. По данным российской Лазерной ассоциации [1], в стране в общей сложности насчитывается примерно 100 крупных организаций и предприятий, активно занимающихся лазерной тематикой. Из них около половины относится к Российской Академии наук и высшим учебным заведениям.

Данный аналитический обзор посвящен последним исследованиям в России по лазерным источникам средней мощности. Учитывая, что сегодня практически используемый в мире уровень мощности лазерных генераторов (в непрерывном и им-

пульсно-периодическом режиме) простирается от единиц милливатт до сотен киловатт, здесь в качестве средней мощности принимается диапазон от 50 Вт до 20 кВт, что обычно соответствует требованиям термических технологий в машиностроении и ряде других отраслей промышленности. К термическим технологиям относят те, где напрямую используют тепловые эффекты при воздействии лазерного луча на материал. Это — лазерная резка, сварка (пайка), прошивка отверстий, поверхностное упрочнение и закалка, маркировка. Наибольшее количество прикладных лазерных исследований в России сейчас проводится именно в интересах технологических лазеров (ТЛ) средней мощности.

Конверсия в лазерной промышленности началась, по- существу, с работ по созданию лазерных технологических установок для машиностроения. Проблема достаточно остро возникла в начале 80-х годов. Многочисленные технологические опыты и первые попытки внедрения убедили производителей, что лазерная обработка материалов весьма перспективна. Но не было отечественных лазеров, пригодных для надежной непрерывной работы в условиях, например, тракторного завода. К сожалению, ведомственная разобщенность и несогласованные действия руководства ведущих отраслей промышленности СССР не позволили выработать единую рациональную программу по созданию необходимых для отечественного народного хозяйства лазерных установок на базе одного или нескольких производственных коллективов, уже обладающих достаточным опытом и научно-техническим заделом в указанной области [1]. В итоге было принято решение о создании центра по производству технологических лазеров для машиностроения в... Академии наук. В Московском регионе был сформирован практически с «нуля» новый академический научно-исследовательский институт, а на его базе через несколько лет создан межотраслевой научно-технический комплекс «Технологические лазеры». В настоящее время он преобразован в Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам Академии наук РАН. Как и следовало ожидать, эти новые структуры не смогли в запланированные сжатые сроки создать и развернуть производство надежных лазерных технологических установок. В результате, не дождавшись требуемого объема поставок лазеров в обещанной номенклатуре и стремясь выполнить свои планы по внедрению новой техники, ведущие отрасли промышленности начали разрабатывать свои собственные мощные лазерные технологические комплексы, которые часто создавались в единичных образцах или на уровне серии в несколько экземпляров. Это, конечно, отрицательно сказалось на экономической эффективности и темпах внедрения лазерных технологий.

Начавшаяся в последние годы ускоренная конверсия лазерной промышленности встретила с теми же трудностями, что и в других отраслях — острым недостатком финансирования на перепрофилирование производства и переобучение персонала, нехваткой грамотных менеджеров и специалистов по маркетингу, отсутствием налоговых льгот и другими. Особенно пагубно сказывается обвальное падение производства в высокотехнологичных и наукоемких отраслях, в частности, в сфере машиностроения, уменьшая тем самым базу для воспроизводства и развития мощных лазерных технологических установок.

Несмотря на все трудности, в России пока сохранен высокий уровень исследований в области лазерной физики, техники и технологии, в том числе и применительно к перспективным лазерным источникам средней мощности, а целый ряд разработанных и выпускаемых лазерных технологических установок по своим техническим параметрам вполне конкурентоспособны и на мировом уровне. Продолжается совершенствование их характеристик на базе последних научных достижений, разрабатываются принципиально новые типы лазерных установок средней мощности, в том числе в статусе инвестиционных проектов, подразумевающих привлечение и зарубежного финансирования.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИИ

Дальнейшее развитие лазерной техники связано, с одной стороны, с усовершенствованием созданных типов лазеров, а с другой — с созданием и развитием новых типов технологических лазеров.

Усовершенствование созданных типов технологических лазеров (твердотельных с оптической накачкой, газовых  $\text{CO}_2$ -лазеров) происходит по следующим направлениям:

- повышение средней мощности лазеров;
- улучшение угловой расходимости и стабильности излучения;
- повышение экономичности, надежности и ресурса лазеров;
- создание оптических систем формирования, позволяющих иметь любое нужное пространственное распределение излучения;
- создание адаптивных автоматизированных систем управления в реальном масштабе времени в соответствии с требованиями оптимального хода технологического процесса лазерной обработки.

В ближайшие годы ожидается включение новых типов генераторов в состав технологических лазеров средней мощности:

- газодинамических  $\text{CO}_2$ -лазеров;
- газоразрядных  $\text{CO}$ -лазеров;
- химических кислородно-йодных лазеров;
- твердотельных лазеров на традиционных и новых кристаллах со средней мощностью более 1 кВт;
- импульсно-периодических эксимерных газоразрядных лазеров (длина волны излучения 0,16—0,3 мкм, средняя мощность более 1 кВт) и, возможно, некоторых других.

Предполагается дальнейшее увеличение выпуска технологических лазеров и роботизированных лазерно-технологических комплексов, улучшение их конструкции и характеристик, снижение стоимости лазерной технологии за счет применения прогрессивных компоновочных решений, новых материалов с высоким ресурсом работы, новых методов накачки, использования автоматизации лазерных установок с применением принципов адаптивного управления.

В данном обзоре основное внимание уделено совершенствованию непрерывных и импульсно-периодических лазерных источников как таковых. Вопросы фокусировки и распространения излучения вне лазерного объема, в том числе и связанные с ними проблемы адаптивной оптики, предполагается осветить в отдельном аналитическом обзоре. То же самое относится и к вопросам создания и использования аппаратуры контроля характеристик лазерного излучения и автоматизации управления лазерных установок. Отдельной самостоятельной темы аналитических исследований заслуживает, конечно, и весь огромный объем работ по высокоэнергетичным импульсным лазерам ( $Q = 0,1—10$  кДж).

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Освоенные и разрабатываемые в настоящее время лазерные источники средней мощности наиболее эффективны в инфракрасном (ИК) диапазоне волн (1—11 мкм), хотя в перспективе им могут составить достойную конкуренцию и эксимерные лазеры с излучением в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне волн (0,16—0,4 мкм). Пока наиболее распространенным типом мощного генератора излучения остаются длинноволновые (10,6 мкм) газоразрядные  $\text{CO}_2$ -лазеры с непрерывным

или импульсно-периодическим режимом работы. Направления последних исследований по совершенствованию их параметров рассмотрены ниже.

## Совершенствование $\text{CO}_2$ -лазеров

### Самофильтрующий неустойчивый резонатор

Эффективность и качество обработки материалов с применением  $\text{CO}_2$ -лазеров мощностью несколько киловатт существенно повышаются, когда излучение имеет высокое качество, что означает способность пучка фокусироваться в компактное пятно малых размеров. Такие пучки, близкие к гауссовым, генерируются обычно в лазерах с устойчивыми резонаторами. Мощность генерации ограничена при этом малым объемом низшей моды. Большой модовый объем при высоком качестве пучка обеспечивается неустойчивым резонатором с полупрозрачным выходным зеркалом. Однако для ослабления вредных дифракционных потерь приходится специальным образом формировать структуру зеркала или делать увеличение резонатора близким к единице, что повышает его чувствительность к абберациям. Полупрозрачное зеркало, как и в устойчивом резонаторе, искажает мощный пучок вследствие термооптического эффекта и является менее надежным, чем обычно используемое в неустойчивом резонаторе полностью отражающее зеркало.

В работе [2] Института лазерной физики (Новосибирск) продемонстрирована возможность применения самофильтрующего неустойчивого резонатора в непрерывном  $\text{CO}_2$ -лазере мощностью 3 кВт для генерации излучения, близкого по качеству к излучению низшей моды устойчивого резонатора. Самофильтрующий неустойчивый резонатор имеет больший объем низшей моды, чем устойчивый резонатор такой же длины. Кроме того, в неустойчивом резонаторе осуществляется дифракционный вывод излучения и используются только полностью отражающие зеркала.

В экспериментальной установке, созданной на базе серийного лазера ЛОК-3М [3], активная среда возбуждается самостоятельным разрядом постоянного тока в двух разрядных промежутках в общем газовом потоке. Направления газового потока, электрического тока и оси резонатора взаимно перпендикулярны.

Вместо штатного многопроходного выпукло-вогнутого неустойчивого резонатора используется неустойчивый конфокальный резонатор из вогнутых сферических зеркал с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$  ( $f_1 > f_2$ ), в общей фокальной плоскости которых расположено кольцевое выходное зеркало с отверстием связи радиусом

$$a = (0,61 \lambda f_2)^{1/2},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения.

Радиус отверстия при этом равен радиусу первого минимума дифракционного распределения интенсивности, формируемого в фокальной плоскости зеркалом 2. Через отверстие в сторону зеркала 1 проходит только центральная часть пучка, соответствующая пятну Эйри дифракционной картины. Кольцевое зеркало-диафрагма и зеркало 2 образуют пространственный фильтр, сглаживающий профиль пучка. Общая длина резонатора равна

$$L = f_1 + f_2.$$

Радиусы кривизны зеркал 1 и 2 равны соответственно 14,2 и 3,15 м, что дает  $L = 8,68$  м,  $a = 3,3$  мм. В усилительном плече между зеркалом 1 и кольцевым выходным зеркалом луч совершает в активной среде по три прохода в каждом разрядном промежутке.

Окно для вывода излучения из разрядной камеры сделано из непросветленного KCl, зеркала резонатора — из Si.

Рассмотренный подход позволил генерировать пучок с расходимостью, всего в 1,5 раза превышающей асимптотический угол расходимости гауссова пучка с таким же диаметром в перетяжке. Плотность мощности в дальней зоне выросла почти в 7 раз, при этом КПД (порядка 7 %) почти не уменьшился.

Численно проанализировано влияние отклонения параметров резонатора от заданных значений на дифракционные потери и характеристики пучка. Показано, что если отклонения не превышают нескольких процентов, соответствующие изменения дифракционных потерь и качества пучка малы и вполне приемлемы.

Данные результаты в значительной степени базируются на ранее проведенных экспериментах [4, 8] в Институте теоретической и прикладной механики (Новосибирск) применительно к CO<sub>2</sub>-лазеру мощностью 1 кВт. Качественно выводы и рекомендации работ [2, 4] совпали. Следовательно, применение самофильтрующего неустойчивого резонатора позволяет получать в непрерывном режиме весьма мощный пучок высокого оптического качества, используя в резонаторе только отражающие зеркала и простые выходные окна с относительно малой лучевой нагрузкой (благодаря большому диаметру выходного пучка).

Самофильтрующие неустойчивые резонаторы прежде использовались только в импульсных лазерах для генерации пучков с большой яркостью [8]. Высокое усиление активной среды в импульсных лазерах позволяет использовать достаточно большое увеличение резонатора, при котором заведомо обеспечивается высокое качество выходного пучка без ухудшения энергетической эффективности. Поэтому подтверждение аналогичных возможностей таких резонаторов в непрерывных проточных газоразрядных лазерах, которые можно отнести к лазерам с умеренным усилением, является, конечно, новым и крупным достижением отечественной лазерной техники, не имеющим, видимо, пока аналогов за рубежом.

Полученные результаты с самофильтрующим резонатором дали толчок целой серии работ в Институте теоретической и прикладной механики по созданию мощных лазерных установок с уникальными параметрами, которые впервые были доложены на Международной конференции "Laser Optics '93" ("Оптика лазеров '93"; 21—25 июня 1993 года, Санкт-Петербург).

В докладе [5] сообщалось о создании мощного перестраиваемого одночастотного непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера с накачкой самостоятельным разрядом в поперечном потоке газа. В лазере использован дисперсионный самофильтрующий неустойчивый резонатор, в котором эшелетт размещен в плече обратной связи. Это позволило получить излучение, близкое к TEM<sub>00</sub>-моду устойчивого резонатора с расходимостью 0,8 мрад (по уровню 0,86). Перестройка излучения лазера осуществлялась в колебательно-вращательных полосах 9,4 и 10,4 мкм (всего около 70 линий) с максимальной мощностью 2,5 кВт на линии 10P20. Ряд конструкторских решений и технических мер (специальная конструкция резонатора, вибрационная развязка резонатора от корпуса лазера и другие) позволил осуществить одночастотный режим генерации без существенного снижения мощности. В первых экспериментах ширина спектра генерации в этом режиме не превышала 4 МГц при времени усреднения > 1 с. Исследован вклад в интегральную ширину спектра вибраций корпуса лазера (частоты до 40 Гц), центробежного вентилятора (90 Гц) и колебаний элементов резонатора (до 1 кГц). Показана возможность сужения спектральной ширины линии генерации мощного CO<sub>2</sub>-лазера за счет применения как пассивных, так и активных методов стабилизации частоты лазерного излучения.

В докладе [6] представлен мощный быстроперестраиваемый CO<sub>2</sub>-лазер с задаваемой спектрально-временной последовательностью генерации. В лазере наряду с самофильтрующим неустойчивым резонатором применена оптическая схема внут-

рирезонаторной пространственной селекции линий. Оптическая схема управления спектрально-временными характеристиками излучения обеспечивает полное пространственное разрешение соседних линий генерации при сохранении дифракционных свойств резонатора.

Перестройка линии производится в любой заданной последовательности за время 1 мкс в пределах спектра генерации, насчитывающей 70 линий в R- и P-ветвях колебательно-вращательных полос 9,4 и 10,4 мкм, причем комбинации и длительность необходимых линий произвольные. В непрерывном режиме с линейной поляризацией излучения мощность лазера составляет 0,3—2,3 кВт в зависимости от линии генерации, при полном угле расходимости 0,8 мрад и диаметре пучка 30 мм (все по уровню 0,86).

На любой выбранной линии осуществляется импульсно-периодический режим модулированной добротности с 10—15-кратным превышением пиковой мощности над непрерывной и длительностью мощности на полувысоте 0,7 мкс. Частота следования импульсов регулируется в пределах 1—10 кГц, а средняя мощность составляет 0,7—0,8 от непрерывной (при частоте 3 кГц).

Остается добавить, что эта установка создана на основе уже упоминавшегося непрерывного электроразрядного CO<sub>2</sub>-лазера с поперечным потоком серии ЛОК-3М.

Результаты работ [5, 6], несомненно, представляют чрезвычайный интерес для интенсивных технологий лазерной химии и разделения изотопов.

В докладе [7] приведены первые результаты исследования CO<sub>2</sub>-лазера с модулированной добротностью, импульсно-периодический режим которого характеризуется средней мощностью 2 кВт и пиковой — до 500 кВт (при мощности генерации в непрерывном режиме 3 кВт).

Применение трехзеркальной оптической схемы плеча обратной связи самофильтрующего неустойчивого резонатора [4] с созданием и исправлением астигматизма наклонных пучков позволило получить две взаимно перпендикулярные перетяжки пучка обратной связи размерами 2х0,15 мм при мощности излучения в плече обратной связи на уровне 10 % мощности генерации (коэффициент увеличения неустойчивого резонатора равен 4,5). Таким образом удалось избежать оптического разряда на поверхности модулятора, который ограничивает импульсную мощность лазера.

Модуляция добротности резонатора осуществлялась вращающимся медным диском с прорезями, расположенными в плоскости перетяжки. Линейная скорость прорезей (до 150 м/с) обеспечивает включение добротности резонатора за время, сравнимое со временем генерации. Проведены исследования в диапазоне частот следования импульсов 1—50 кГц. Длительность импульса модулированной добротности (по полувысоте) составляет 0,5 мкс при пиковой мощности до 500 кВт (на частотах < 5 кГц) и средней мощности до 2 кВт (на частотах > 3 кГц). Полный угол расходимости 1 мрад (по уровню 0,86). При начальном диаметре пучка 30 мм пиковая интенсивность излучения в фокусе линзы была около 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> на частотах 5—50 кГц, что позволило впервые зажечь стационарный импульсно-периодический разряд в сверхзвуковой струе аргона атмосферного давления.

#### *Аподизированные и регулируемые зеркала*

В докладе [9] Научно-исследовательского центра по технологическим лазерам, представленном на конференции "Оптика лазеров'93", показано, что характеристики мощных технологических лазеров с поперечной прокачкой могут быть существенно улучшены путем применения специальных схем оптических резонаторов. Перспективно использование резонаторов с аподизированными зеркалами, в част-

ности, с зеркалами со сглаженным краем или с гауссовым и супергауссовым профилем коэффициента отражения.

Теоретический анализ применения гауссова выходного зеркала в устойчивом резонаторе показывает, что можно добиться надежного выделения нулевой поперечной моды в режиме с большими дифракционными потерями. При достаточно малом размере отражающего пятна такой резонатор эквивалентен неустойчивому с пространственной фильтрацией излучения, реализованному в [2, 4].

На лазере "Лантан-3М" был реализован резонатор такого типа и получена генерация близкого к гауссову пучка мощностью до 2 кВт с электрооптическим КПД, равным 8 %. Относительно низкий КПД обусловлен малым объемом моды по сравнению с объемом активной среды и небольшим (вдвое) превышением уровня накачки над пороговым.

Почти двухкратного увеличения КПД при некотором снижении качества пучка удалось достичь с помощью неустойчивого резонатора с увеличением 1,75. Профиль коэффициента отражения выходного зеркала выбран супергауссовым с  $n = 4$ . При диаметре выходного пучка 45 мм получена энергетическая расходимость не хуже 0,5 мрад в диапазоне мощности до 5 кВт в непревынном режиме.

В работе [10] для улучшения оптического качества луча типового технологического лазера использовались зеркала со ступенчатым коэффициентом отражения.

Технологические лазеры типа "Хебр" широко используются в промышленности для сварки, резки и обработки металлов. Их недостаток — многомодовость режима работы. Одним из возможных путей перевода лазера в одномодовый режим является использование неустойчивого конфокального резонатора и выходных зеркал с переменным по радиусу коэффициентом отражения.

Для формирования фронта выходного излучения лазера типа "Хебр" с выходной мощностью до 1 кВт использовался неустойчивый конфокальный резонатор, сформированный "глухим" зеркалом с радиусом кривизны 30 м и выходным зеркалом кривизны 23 м. Выходное зеркало представляло собой систему, состоящую из центральной области с коэффициентом отражения 0,8 и периферии с коэффициентом отражения менее 0,002. Площади центральной и периферийной областей выбирались из тех соображений, чтобы среднее по площади значение коэффициента отражения равнялось 0,3, т. е. таким же, как у первоначального зеркала лазера. Фазы выходного излучения через центральную и периферийную части совпадали с точностью до  $2\pi + 0,1$ . Для этого в центральной области зеркала изготовлялся слой, обеспечивающий компенсацию фазы проходящего излучения. Согласования фаз отраженного от разных областей не требовалось, так как отражение от периферийной области было близко к нулю. При изготовлении просветляющих и отражающих покрытий применялись пленки  $PbF_2$  и  $ZnSe$ . Для уменьшения поглощения в зеркалах нами использовалась технология напыления, обеспечивающая снижение поглощения на границах пленок [11]. Изготовленные таким образом покрытия могли длительное время работать при нагрузках свыше 1 кВт/см<sup>2</sup>.

Описанное выше зеркало переводило режим работы лазера из многомодового в одномодовый, при этом выходная мощность составляла 0,9 от выходной мощности в многомодовом режиме. Расходимость лазерного излучения не превышала 1,5 дифракционного угла, что увеличивало плотность мощности в фокусе линзы в 4—6 раз. Это позволило лазеру с выходной мощностью 800 Вт разрезать алюминиевые листы с неподготовленной поверхностью толщиной 1,5 мм.

В Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам исследованы характеристики генерации излучения  $CO_2$ -лазера с резонатором, имеющим в своем составе выходное зеркало с управляемой прозрачностью [12]. Зеркало представляет собой интерферометр Фабри-Перо (ИФП) из плоскопараллельных зеркал с воздушным промежутком порядка  $\lambda = 10,6$  мкм. Зеркала выполнены из селенида цин-

ка и просветлены с внешней стороны (внутренние поверхности не имеют покрытий). Изменение базы ИФП в пределах  $\lambda/4$  осуществлялось с помощью пьезопакетов, жестко связанных с одним из зеркал. При этом коэффициент отражения мог изменяться от 0 до 50 %.

В этих экспериментах использовался серийный  $\text{CO}_2$ -лазер с непрерывной накачкой, генерирующий излучение мощностью 35 Вт со штатным выходным зеркалом. Применение ИФП в качестве выходного зеркала позволило реализовать модуляцию добротности резонатора и получить импульсно-периодический режим работы лазера в диапазоне частот  $f = 0-5$  кГц. Получены следующие параметры работы лазера:

при  $f > 1$  кГц средняя мощность сохранялась и была равна 35 Вт;  
глубина модуляции мощности во всем диапазоне частот — 100 %;  
превышение пиковой мощности над уровнем средней — 2,5 раза;  
длительность импульсов изменялась в пределах 0,1—10 мс.

Такой лазер может найти широкое применение, например, для гравировки и маркировки стекла и т. п.

Модельные эксперименты с лазером малой мощности показывают возможность использования ИФП в мощных лазерах. Изготовлен экспериментальный образец зеркала с переменной прозрачностью для получения импульсно-периодического режима работы  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывной накачкой мощностью до 1,5 кВт.

Экспериментально также реализован метод управления и стабилизации мощности излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, прошедшей через установленный вне резонатора лазера ИФП. Величина требуемой мощности задавалась изменением опорного напряжения в цепи обратной связи. Нестабильность мощности прошедшего излучения составила не менее 1 % за время изменения 10 мин, тогда как нестабильность мощности падающего излучения превышала 10 %.

### Волноводные $\text{CO}_2$ -лазеры

Непрерывные  $\text{CO}_2$ -лазеры с поперечным высокочастотным разрядом обладают рядом достоинств, благодаря которым этот класс приборов находит все более широкое применение. К ним прежде всего относятся высокие усиление, КПД и удельная (с единицы длины разрядного канала и объема среды) мощность излучения, а также низкое напряжение горения разряда.

В Научно-производственном объединении "Плазма" (г. Рязань) создан образец компактного отпаянного металлокерамического  $\text{CO}_2$ -лазера с высокочастотной накачкой для медицинских и технологических применений [13]. Мощность лазера 30 Вт. Конструкция лазера основана на использовании разрядной структуры щелевого типа и гибридного неустойчиво-волноводного резонатора с распространением излучения как в свободном пространстве, так и в волноводе.

Фактически это первое сообщение о разработке отечественного волноводного лазера, пригодного для промышленного выпуска. Конструкция лазера отличается высокой надежностью. Все соединения металл — металл, керамика — металл осуществляются пайкой и сваркой. Лазер содержит стабилизатор газового состава, обеспечивающий эффективную регенерацию  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ , в результате чего концентрация  $\text{CO}_2$  поддерживается постоянной. Разрядная структура образована двумя идентичными электродами, установленными параллельно друг другу, и представляет собой щель, не ограниченную боковыми стенками, что обеспечивает конвективный обмен газа между резервным и активным объемами.

Частота возбуждающего поля составляет 81,36 МГц, мощность высокочастотного поля, вкладываемая в разрядный канал, достигает 350 Вт.

Оптический резонатор образован двумя цилиндрическими или сферическими зеркалами с радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$  (выпуклое и вогнутое соответственно), размещенными конфокально, так что

$$R_1 + R_2 = 2L,$$

где  $L$  — длина резонатора.

К преимуществам таких резонаторов относятся большой объем активной среды, участвующей в генерации (до 80 %) при малых габаритных размерах излучателя, и возможность одномодовой генерации на основной гибридной моде, представляющей собой сочетание низшей моды планарного волновода и низшей моды неустойчивого резонатора. Эта гибридная мода, как показывают теоретические оценки, имеет минимальные потери за проход резонатора и подавляет генерацию на других модах, чем и обеспечивается высокая степень селекции резонатора.

Специальные расчеты показывают, что на базе предложенной конструкции могут быть созданы малогабаритные лазеры мощностью 50 и 100 Вт с одномодовым коллимированным пучком излучения, если увеличить вкладываемую высокочастотную мощность соответственно до 500 и 1000 Вт.

#### *Газодинамические CO<sub>2</sub>-лазеры*

Повышение выходной мощности и получение высоких удельных характеристик газодинамических CO<sub>2</sub>-лазеров второго поколения требуют организации эффективного съема колебательной энергии с больших объемов быстро движущейся активной среды, что приводит к необходимости разработки и применения широкоапертурных неустойчивых резонаторов с числами Френеля  $N_F = 200—300$ .

В Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (Московская область) теоретически исследовано влияние косых скачков уплотнения и внутрипоглощающих зон на характеристики излучения подобного мощного лазера [14]. Конкретно, в трехмерном случае численно решена задача о распределении комплексной амплитуды электромагнитного поля в объеме активного широкоапертурного неустойчивого резонатора при числах Френеля порядка 200.

Проблема состоит в том, что во избежание порчи рабочих поверхностей зеркала резонатора удаляют от сверхзвукового потока активной среды, поэтому между потоком активной среды и отражающими поверхностями зеркал внутри неустойчивого резонатора застойные поглощающие зоны ("карманы"), заполненные газовой смесью того же состава, что и активная среда. Термодинамические параметры газа в карманах близки к равновесным. После соплового блока течение колебательно-возбужденной газовой смеси продолжается в плоскопараллельном или слегка расширяющемся канале. Вследствие незначительных изломов газодинамического тракта, вызванных стыковкой соплового блока с этим каналом, активную среду в области резонатора пересекают два косых скачка уплотнения, отходящих от верхней и нижней кромок соплового блока. В совокупности поглощающие зоны и косые скачки уплотнения заметно искажают картину распределения комплексной амплитуды поля в объеме резонатора. Ввиду значительной стоимости натурального экспериментирования вопросы численного моделирования влияния этого эффекта на характеристики выходного излучения приобретают большую актуальность.

В основу численного интегрирования параксиального волнового уравнения положен метод приближенного вычисления двумерного интеграла Кирхгофа по специально разработанным квадратурным формулам повышенного порядка точности. Для описания кинетики колебательной релаксации применялась достаточно полная трехтемпературная модель совместно с уравнениями неравновесной газовой динамики в струйном приближении.

Основной результат полученных многочисленных теоретических зависимостей сводится к тому, что влияние деформаций активной среды выражается в систематическом превышении дифракционного предела угловой расходимости в среднем в 4—5 раз.

В работе [15] Института атомной энергии создана экспериментальная установка, обеспечивающая возможность получения высокого удельного энергоудельного (порядка 70 Дж/г) и развита математическая модель, достаточно точно учитывающая основные физические процессы в газодинамическом лазере со смешением и позволяющая обоснованно прогнозировать его характеристики в различных режимах.

Последние предложения по созданию мощных технологических газодинамических  $\text{CO}_2$ -лазеров отражены ниже.

### Разработка в России мощных $\text{CO}$ -лазеров

Газоразрядные  $\text{CO}$ -лазеры с длиной волны 5—6 мкм обладают рядом специфических свойств, выделяющих их среди других мощных лазеров ИК-диапазона. Их отличают высокий КПД генерации (30—50 %) и удельный энергоудельный, в 2—2,5 раза превышающий энергоудельный, характерный для  $\text{CO}_2$ -лазеров. По сравнению с последними  $\text{CO}$ -лазеры имеют в 2 раза меньший дифракционный предел угловой расходимости излучения, меньшее проявление самовоздействия излучения в активной среде, а оптические материалы, прозрачные в области спектра 5—6 мкм, характеризуются большей лучевой и механической прочностью. Наконец, излучение  $\text{CO}$ -лазера более эффективно (в 2—3 раза) взаимодействует с конструкционными материалами и тканью человеческого организма. Тем не менее, сложности работы с токсичным и взрывоопасным газом  $\text{CO}$ , а также необходимость криогенного охлаждения активной среды для обеспечения высокого КПД долгое время сдерживали широкое применение  $\text{CO}$ -лазеров мощностью более 50 Вт. Только буквально в последние годы начался, своего рода, бум по разработке мощных  $\text{CO}$ -лазеров киловаттного и более уровня для использования в термических технологиях.

Исследования  $\text{CO}$ -лазеров в России были начаты в конце 60-х гг. в Физическом институте Российской Академии наук (ФИ РАН) (Москва), который и сейчас сохранил роль научного лидера в этой области, привлекающего для практической разработки конкретных направлений ведущие отраслевые предприятия [16].

### Непрерывные отпаянные $\text{CO}$ -лазеры

Инициированные в Физическом институте и продолженные в Научно-производственном объединении "Исток" (Московская область) физические исследования привели к созданию гаммы промышленных непрерывных отпаянных  $\text{CO}$ -лазеров умеренной мощности [17]. Крупнейшим из них является "Кассета-4М" мощностью 75 Вт. Сейчас исследования отпаянных  $\text{CO}$ -лазеров и лазерных систем на их базе сосредоточены в основном в НПО "Исток". Показано, в частности, что уменьшение температуры жидкости, охлаждающей стенки лазерной кюветы, от 27 до 1 °C приводит к двукратному увеличению мощности генерации и росту КПД от 8,5 до 18 %.

Один из способов увеличения мощности отпаянных  $\text{CO}$ -лазеров — использование многопроходных схем и многолучевых конструкций [18].

В многопроходных отпаянных  $\text{CO}$ -лазерах, лазерные трубки которых расположены в одном и том же резонаторе, суммарная длина активной среды достигает 5 м. В трехтрубчатом  $\text{CO}$ -лазере с активной длиной 3,75 м, действующем на газовой смеси состава  $\text{Xe}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3,8:21,7$  при давлении до 2 кПа, получена мощность излучения 105 Вт. Максимальный КПД достигал 15—17 %. После 5—6 ч работы мощность излучения падает, появляется генерация на длине волны  $\text{CO}_2$ -лазе-

ра 10,6 мкм. Различные методы очистки (тренировка лазера с графитовым катодом, применение силикагеля и пятиоксида фосфора в рабочем объеме лазера) позволяют увеличить время работы отпаянного СО-лазера до 100 ч.

В многолучевом СО-лазере излучение, выходящее из 30 трубок длиной 1 м и диаметром 2 см, суммируется с помощью телескопа. При этом общий диаметр пучка уменьшается от 20 до 4 см (длина лазера 1,5 м, диаметр 22 см). Мощность излучения многолучевого лазера с водяным охлаждением составляет 310 Вт (в аналогичном СО<sub>2</sub>-лазере — 1,1 кВт). Плотность мощности излучения, сфокусированного на обрабатываемом объекте, достигает 10 кВт/см<sup>2</sup>.

Еще один перспективный тип отпаянного СО-лазера — волноводный СО-лазер с термоэлектрическим способом охлаждения активной среды. Однако в настоящее время эти лазеры, исследуемые в Московском инженерно-физическом институте [19], существенно уступают по мощности рассмотренным выше.

### *Непрерывные СО-лазеры с продольным возбуждением и продольной прокачкой*

Охлаждение активной среды до температуры жидкого азота и применение скоростной прокачки газа позволяют значительно увеличить мощность генерации и КПД СО-лазера низкого давления. В Санкт-Петербургском государственном университете в результате экспериментальных исследований получена мощность генерации 900 Вт [20] в охлаждаемом жидким азотом СО-лазере с активной длиной 2 м. Лазерная кювета состоит из двух половин, включенных параллельно току разряда и газовому потоку, максимальный ток разряда составляет 120 мА. Применяются газовые смеси с кислородом He — СО — N<sub>2</sub> — O<sub>2</sub> и He — СО — O<sub>2</sub> при давлениях до 25 мм рт. ст. Расход газа в эксперименте менялся в пределах 0,1—13 л/с, скорость потока — в пределах 10—300 м/с. Максимальный КПД генерации 45 % был достигнут при расходе газа 0,4—1 л/с. Мощность излучения в этом случае составляла 300 Вт.

### *Электроионизационные СО-лазеры*

Существенно, более чем на порядок, увеличения мощности можно достичь, если перейти к электроионизационному методу накачки сжатых газов, предложенному и реализованному первоначально для накачки СО<sub>2</sub>-лазеров в ФИ РАН академиком Н. Г. Басовым с сотрудниками [21] еще в 1971 г. В том же году ими было предложено использовать этот метод для возбуждения СО-лазеров [22].

Первый непрерывный электроионизационный СО-лазер был создан в совместных работах ФИ РАН и Специального конструкторского бюро по лазерной технике и технологии (Екатеринбург) [23] еще в 1982 г. Этот лазер, являющийся модернизацией электроионизационного СО<sub>2</sub>-лазера, действует как на моноокиси, так и на двуокиси углерода с мощностью генерации 10 кВт.

Лазер состоит из электроразрядной камеры, водяного теплообменника, вентилятора, электронной пушки с катодом и управляющей сеткой, а также криогенного теплообменника, в который подается жидкий азот из специальной цистерны. Ток электронного пучка регулируется управляющей сеткой. Наибольшая плотность тока электронного пучка составляет 10 мкА/см<sup>2</sup>, напряжение на электронной пушке 180—200 кВ. Максимальный КПД достигает 37 % при удельном энергосъеме 113 Дж/г для лазерной смеси состава СО:N<sub>2</sub>:He = 1:9:10, при давлении 50 мм рт. ст., скорости прокачки 24 м/с и температуре лазерного газа на входе в активный объем 100 К. С повышением температуры КПД лазера снижается, а при T = 170—190 К генерация исчезает совсем. Дальнейшее повышение температуры

приводит к появлению генерации на длине волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера 10,6 мкм, что связано с сублимацией  $\text{CO}_2$ , образующемся в разряде и ранее вымерзавшего в криогенном теплообменнике. В настоящее время на этом  $\text{CO}$ -лазере выполняются эксперименты по лазерной технологии.

### *Импульсно-периодический электроионизационный $\text{CO}$ -лазер*

При создании в ФИ РАН и НПО "Астрофизика" (Москва) импульсно-периодического  $\text{CO}$ -лазера [24] использована схема охлаждения при помощи теплообменника, в котором газ охлаждался до температуры 120 К. Эксперименты выполнялись на установке открытого цикла (с выбросом отработанного газа) при постоянном расходе лазерной смеси. Применялись лазерные смеси состава  $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:9$  с плотностью 1,1 и 0,4 Амага. Ионизация осуществлялась импульсно-периодическим электронным пучком при плотности тока за фольгой 7 мА/см<sup>2</sup>, напряжение на катоде пушки равнялось 220 кВ, длительность импульсов разряда составляла ~75 мкс, частота повторения импульсов накачки 120 Гц.

Резонатор лазера был образован глухим медным зеркалом с радиусом кривизны 12 м и диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 80 %. Длительность работы лазера достигала 10 с. При плотности 0,4 Амага удельный энерговыход 320 Дж/(л·Амага) и удельный энергосъем 45 Дж/(л·Амага) остаются постоянными при частотах вплоть до 110 Гц, соответствуя КПД порядка 14 %. Увеличение частоты до 120 Гц приводит к резкому снижению энерговыхода до примерно 250 Дж/(л·Амага) и, как следствие, к резкому уменьшению энергосъема и КПД. При плотности лазерной смеси 1,1 Амага те же эффекты возникают при частотах, больших 15 Гц.

Абсолютная средняя мощность  $\text{CO}$ -лазера составляла 10 кВт. Импульсы генерации имели типичную для импульсных  $\text{CO}$ -лазеров форму, причем их длительность по уровню 0,1 составляла 0,5 мс.

Снижение энергии  $\text{CO}$ -лазера с ростом частоты посылок связано с тем, что реализуется режим, при котором разогретая предыдущим импульсом накачки "пробка" газа не успевает удалиться из разрядной области к приходу последующего импульса накачки. Возникающие в потоке газа неоднородности плотности и температуры газа, а возможно, и остаточная колебательная населенность молекул  $\text{CO}$  приводят к снижению границы устойчивости разряда. Различие в предельных частотах при разных плотностях смеси обусловлено, скорее всего, различием в размерах "пробки" газа, определяемых удельным количеством тепла, выделенного в единице объема движущегося возбужденного газа.

### *Нетрадиционные методы охлаждения активной среды $\text{CO}$ -лазеров*

Известно, что  $\text{CO}$ -лазеры эффективно действуют только при низких (порядка 100 К) температурах активной среды. Для охлаждения газа в мощных лазерах чаще всего используют теплообменники с жидким азотом. В работах [16, 47] ФИ РАН описан иной способ охлаждения — инъекция лазерной смеси в жидкой фазе. Сжиженные компоненты лазерной смеси ( $\text{CO} - \text{N}_2$ ,  $\text{CO} - \text{N}_2 - \text{Ar}$ ) в виде мелкодисперсных частиц инжeksiруются в поток рабочей среды перед активным объемом и охлаждают газ до необходимых температур за счет теплоты испарения. При достаточно малом размере впрыскиваемых частиц удается решить две технически сложные задачи: понизить без теплообменника абсолютную температуру газового потока до 100 К и произвести быструю газификацию жидкофазной смеси. Представляется, что этот метод охлаждения будет все более предпочтителен по мере нарастания мощности  $\text{CO}$ -лазеров.

Другой нетрадиционный метод охлаждения рабочего газа основан на его адиабатическом расширении через сверхзвуковое сопло. Начальные исследования этого направления для квазинепрерывного режима генерации излучения проведены также в ФИ РАН [48].

Еще один метод, предложенный в 1980 г. в ФИ РАН, использует холодильную машину в составе турбокомпрессора и турбодетандера, непосредственно включенную в замкнутый газодинамический контур СО-лазера [49, 51]. Отсутствие в то время подходящего отечественного промышленного оборудования (для сравнительно низких давлений газа порядка 20 кПа) не позволило реализовать высказанную идею. Только сейчас в рамках российской части проекта EU113 ("СО-Евролазер") Европейской программы "Эврика" [16, 49, 50] сооружается импульсно-периодический СО-лазер на среднюю мощность 5—10 кВт, имеющий специально разработанный детандерно-компрессорный холодильник в своем замкнутом газодинамическом контуре.

### *Электрогазодинамический СО-лазер*

В Балтийском Государственном техническом университете предложена совершенно новая и оригинальная концепция электрогазодинамического СО-лазера [25]. Здесь наработка лазерной смеси осуществляется непосредственно в процессе работы лазера за счет сгорания химического топлива; излучающие молекулы возбуждаются с помощью высокочастотного (ВЧ) разряда в сверхзвуковом потоке рабочей смеси.

В процессе горения химического топлива образуется многокомпонентная смесь, содержащая продукты полного и неполного сгорания. Применение специальных фильтров приводит к значительному снижению вредных примесей. Вместе с этим выбор времени пребывания смеси в зоне электрического разряда таким, чтобы не успели пройти процессы VT-релаксации, приводит к незначительному влиянию релаксантов на выходную мощность [26].

Высокая эффективность электрического разряда обеспечивается охлаждением продуктов сгорания в соплах с подмешиванием буферного газа (воздуха) и процессом неравновесной термической ионизации, возникающей в потоке после сверхзвуковых сопел. При этом основная часть подводимой энергии электрического поля поступает в колебательные уровни молекул СО, а остальные компоненты рабочей среды являются буферным газом, если объемная доля молекул азота не превышает 90 %, а кислорода — объемную долю молекул СО в смеси [27].

Проведенные исследования ВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке в широком диапазоне скоростей ( $M = 0-6$ ) позволили определить условия, при которых зона разряда не сносится газовым потоком, а возникновение градиентов температур и плотностей незначительно. Был получен однородный стабильный разряд в сверхзвуковом потоке при вкладе  $30 \text{ Вт/см}^3$ , что позволило приступить к созданию модельной установки СО-лазера с ВЧ-разрядом.

Разработана модель расчета такого лазера, что позволяет определять энергетические, временные и спектральные параметры лазера, оптимизировать конструкцию и режимы работы.

На основании проведенных расчетов впервые спроектирована и создана модельная установка СО-лазера на продуктах сгорания, на которой получена генерация в непрерывном режиме. Модельная установка содержит газогенератор, сопловый блок, газоразрядную камеру, систему выхлопа, ВЧ-генератор ( $f = 1,76 \text{ МГц}$ ), а также системы подачи воздуха, измерения, управления и охлаждения.

Мощность генерации в модельной установке (12 Вт) более чем на порядок превышает таковую для химического и газодинамического СО-лазера с аналогичными размерами и расходами.

На базе проведенных работ сформулированы возможности создания мобильного, автономного и экологически чистого СО-лазера мощностью в десятки и сотни киловатт. Примерное техническое решение состоит в следующем. Лазер изготавливается с использованием типовой электрической установки с газотурбинным приводом. Продукты сгорания и воздух отбираются из камеры сгорания и компрессора газотурбинной установки. Отбор продуктов сгорания достигает 10 % от общего расхода (~20 кг/с). Вал газотурбинного привода кинематически связан с валом электрогенератора, подключенного к ВЧ-генератору и газоразрядной камере. Продукты выхлопа лазера, содержащие СО, подаются на вход компрессора, а затем дожигаются в камере сгорания и выбрасываются в атмосферу без СО. Такое формирование потоков делает лазер экологически безопасным и облегчает работу диффузора.

Предлагаемое техническое решение лазера позволяет создавать передвижные технологические комплексы с размещением лазера на автомобиле или железнодорожной платформе.

Устройство не имеет аналогов, обладает авторской новизной и защищено патентом [28].

Для развития указанного направления важное значение имеет последняя работа по обобщенному масштабированию таких лазеров [29]. В ней рассматриваются СО-лазеры с высокочастотным разрядом в сверхзвуковом потоке продуктов сгорания, обеспечивающем возможность эффективной работы без использования электронной пушки и непрерывной наработки большого количества СО-смеси. Теоретический анализ на основе совместного решения системы уравнений кинетики релаксационных процессов и газовой динамики не дает явных параметрических зависимостей для основных величин, характеризующих СО-лазер, однако можно сделать приемлемые допущения, позволяющие использовать общие законы подобия для масштабирования СО-лазера непрерывного действия с разрядом в высокоскоростном потоке смеси СО с одноатомными газами. Для обобщения результатов такого масштабирования на СО-смесь, нарабатываемую в процессе горения химического топлива, используются результаты расчетов баланса энергии электронов в разряде на продуктах сгорания. Определив долю электрического поля, поступающую на колебательные уровни молекул СО, для расчета основных параметров электрогазодинамического СО-лазера на продуктах сгорания можно воспользоваться законами подобия, полученными для непрерывных СО-лазеров с возбуждением высокоскоростного потока смеси СО с одноатомными газами электрическим разрядом.

Таким образом, фактически открыто новое научное направление в лазерной физике — электрогазодинамические СО-лазеры на продуктах сгорания. Однако здесь еще не получено больших мощностей излучения в экспериментальных установках, и это, видимо, обоснованно вызывает у ряда специалистов сомнения в правомочности распространения результатов, характерных для установок с мощностью порядка 10 Вт, на установки с мощностью десятки и сотни киловатт. Для большей надежности прогнозов нужна экспериментальная установка хотя бы на уровне 1 кВт.

Можно надеяться, что это — вопрос времени и финансовых инвестиций, поскольку само появление указанного направления инициировано проблемами создания мощных, но дешевых и экологически чистых лазерных источников.

#### *Химический СО-лазер*

Химическим СО-лазерам непрерывного действия с активной средой, создаваемой в зоне химической реакции сероуглеродного пламени, посвящено много теоретических и экспериментальных работ, в том числе и в российских исследованиях. Эксперименты [30—32], проводившиеся в Институте проблем механики (Москва), показали, что лазеры с дозвуковой скоростью прокачки реакционной смеси облада-

ют небольшими коэффициентами усиления на колебательно-вращательных переходах молекулы  $\text{CO}$ , и для повышения эффективности их работы приходится создавать весьма протяженные активные среды. Путем стабилизации сероуглеродного пламени на плоских горелках (общая длина 3 м) удалось достичь выходной мощности излучения около 100 Вт при удельном энергопотреблении 35—40 Дж/г. Однако лазерам этого типа свойственны недостатки, обусловленные малым размером активной среды вдоль потока газа и возможностью стабилизации зоны химической реакции в объеме оптического резонатора лишь при малых скоростях газового потока.

В работе [31] для дальнейшего исследования предложены способы интенсификации реакции окисления сероуглерода, в том числе описана модернизированная конструкция горелки со стабилизацией горения в системе струй.

На базе этих идей проведены эксперименты [32, 33] с целью резкого увеличения мощности генерации за счет существенного повышения скорости потока реакционной смеси через резонатор.

В вакуумной камере были размещены две горелки с шириной проточной части 3 см, длина каждой из них вдоль оси резонатора составляла 1 м. Работа лазера происходила при длинах оптического резонатора 2,84 и 3,64 м. В большинстве экспериментов использовались зеркала диаметром 4 и 6 см, имевшие многослойные диэлектрические покрытия на прозрачных в области 5—5,7 мкм подложках (флюорит, селенид цинка). Пропускание различных зеркал в области излучения лазера менялось в пределах 2—6 %, радиусы кривизны зеркал составляли 5 м. В экспериментах регистрировалась суммарная мощность излучения, выводимая через оба зеркала. Как в более ранних работах, исходная смесь реагентов содержала сероуглерод, закись азота и кислород в отношении 1:3:18.

Диапазон изменения суммарного массового расхода смеси составлял 4—25 г/с. Верхнее значение расхода лимитировалось давлением в системе подачи сероуглерода. При максимальном давлении паров  $\text{CS}_2$  в термостатируемой бачке 2 атм гидродинамическое сопротивление магистрали обеспечивало расход через одну горелку сероуглерода в 1—1,1 г/с.

Проведенные эксперименты показали, что в исследованном диапазоне расходов рабочей смеси критические режимы не наблюдаются, и зависимость мощности лазерного излучения от расхода близка к линейной. При работе с двумя горелками общей длиной 2 м достигнутая мощность лазера в 730 Вт является на сегодняшний день наивысшей в мире для химических  $\text{CO}$ -лазеров непрерывного действия.

Полученные данные позволяют рассчитывать на дальнейшее повышение мощности лазерного излучения при увеличении объемной скорости откачки продуктов горения и соответствующем росте расхода смеси при сохранении длины активной среды в пределах 1—2 м.

### Химический кислородно-йодный лазер

Химический кислородно-йодный лазер — эффективный и мощный источник излучения в ближней ИК-области (1,33 мкм), представляющий интерес для технологических применений. Его достоинства связаны, в частности, с отсутствием потребления электроэнергии, использованием дешевых рабочих компонентов: воды, кислорода, щелочи, молекулярного йода, эффективностью собственно лазерных процессов.

Еще в 1982 г. было сообщено о создании в России превосходного для того времени кислородно-йодного лазера [33], имеющего съем энергии излучения до 300 Дж/г с единицы массы всех используемых компонент. При давлении в лазерном объеме 13,3 кПа, скорости потока реагирующих компонент 100 м/с был по-

лучен сьем мощности излучения  $1,6 \text{ кВт/см}^2$  с единицы площади поперечного сечения потока.

Основной энергетический узел кислородно-йодного лазера — генератор синглетного кислорода, обычно образующийся в химическом реакторе пропусканием хлора через щелочно-водный раствор перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Совершенствование генератора синглетного кислорода предопределяет весь прогресс кислородно-йодных лазеров.

В Самарском филиале ФИ РАН разработан компактный кислород-йодный лазер с струйным генератором синглетного кислорода без специального охлаждения стенок его корпуса [34, 35]. Мощность лазера достигла 150 Вт, что пока отражает уровень отечественных достижений в этой области.

Тело струйного генератора синглетного кислорода выполнено из капралона с толщиной стенок 25 мм, баки для приготовления и приема раствора объемом 7 л — из нержавеющей стали с внешней охлаждаемой рубашкой. Температура раствора в баках поддерживалась на уровне  $-10^\circ\text{C}$ . Поперечное сечение реакционной зоны струйного генератора синглетного кислорода — прямоугольник  $95 \times 15$  мм. Орошение реакционной зоны осуществлялось через перфорированную решетку с отверстиями диаметром 0,5 мм. Хлор подавался в реакционную зону через встроенные по всей длине стенок генератора синглетного кислорода перфорированные тефлоновые трубки. Место выхода газа из генератора синглетного кислорода расположено выше (на 6 см) места ввода хлора.

Для регулирования объемной откачки в реакционной зоне использовался щелевой дроссель с управляемым зазором. Резонатор лазера длиной 85 см образован зеркалами с радиусом кривизны 5 м и пропусканием 0,9 и 1,6 %. Инжектор йода, выполненный в виде "граблей", располагался на 26 мм выше оптической оси резонатора. Рабочий раствор готовили из 3,6 л перекиси водорода концентрацией 30 % и 1,2 л раствора щелочи КОН. Непосредственно перед пуском раствора в генератор синглетного кислорода последний вакуумировался с целью дегазации. Раствор подавали в генератор синглетного кислорода под действием атмосферного давления, расход составлял 450 мл/с.

Максимальная выходная мощность 150 Вт получена при давлении на выходе генератора синглетного кислорода 25 мм рт. ст. и скорости объемной откачки 15 л/с. При этом на поперечном сечении генератора синглетного кислорода была достигнута удельная мощность 10 Вт/см, что превышает наилучшие известные результаты по барботажным генераторам синглетного кислорода.

Приведенные результаты демонстрируют возможность использования струйных генераторов синглетного кислорода без охлаждаемого корпуса в мощных кислородно-йодных лазерах без ловушки паров воды. При этом существенно упрощается компоновка элементов конструкции, увеличивается активная длина лазера. Все это позволяет работать при меньших концентрациях йода и в условиях лучшего смешения, что должно привести к улучшению удельных энергетических характеристик лазера.

Как видно, работы в России по кислородно-йодным лазерам пока еще не вышли из стадии лабораторных исследований.

### Химические HF-лазеры

HF-лазеры сегодня — наиболее известные и мощные химические лазеры. Однако в технологических целях их применение пока ограничивается из-за сложности работы с требуемыми фторсодержащими компонентами рабочей смеси. Можно ожидать, что накопление эксплуатационного опыта и постоянное повышение тех-

нических параметров этих лазеров будут способствовать их более широкому применению.

В Государственном институте прикладной химии (Санкт-Петербург) проведены исследования рабочих характеристик сверхзвукового непрерывного химического HF-лазера с трехструйным сопловым блоком [36].

Главная задача соплового блока непрерывного химического HF-лазера состоит в такой организации процесса смещения струй окислительного газа (содержащего атомы фтора и вторичного горючего — водорода), которая обеспечивает высокую энергетическую эффективность его работы, приемлемое оптическое качество потока в полости резонатора и максимальную протяженность зоны генерации.

Наиболее эффективный путь увеличения протяженности зоны генерации связан с дополнительным разбавлением потока окислительного газа введением в него химически и кинетически неактивных молекул, например, с помощью трехструйного соплового блока.

Предполагается оригинальная конструкция трехструйного блока, включая сверхзвуковые щелевые сопла для подачи окислительного газа и гелия и инжектор для подачи водорода, выполненный в виде набора перфорированных трубок, соединенных с опорными клиновидными элементами, которые расположены в плоскостях симметрии сопел подачи гелия. Наличие прослоек гелия препятствует иницированию реакции накачки и позволяет осуществить контролируемый сдвиг начала зоны горения от среза сопел вниз по потоку, что приводит к увеличению протяженности зоны генерации и более равномерному распределению интенсивности излучения по ее длине, а вынос инжектора водорода из плоскости среза соплового блока дает возможность снизить шаг смещения по сравнению с известными конфигурациями трехструйных блоков и тем самым создать условия для роста энергетических характеристик лазера.

Предложенный сопловой блок с размером выходного сечения  $250 \times 30$  мм<sup>2</sup> прошел всестороннюю экспериментальную проверку в составе стендового образца сверхзвукового HF-лазера автономного типа, в результате которой определены его рабочие характеристики:

начало зоны генерации сместилось на 15 мм от среза, а ее протяженность увеличилась в 1,4—1,7 раза (в зависимости от количества гелия) с одновременным улучшением равномерности распределения интенсивности излучения по длине (по сравнению с двухструйным аналогом);

по мере разбавления активной среды гелием наблюдалось понижение ее поступательной температуры, сопровождавшееся ростом энергетических характеристик лазера, благодаря чему при переходе к трехструйному блоку удалось не только снизить, но даже поднять в 1,20—1,35 раза уровни выходной и удельной мощностей излучения (до 8,8 кВт и 225 (Вт·с)/г соответственно);

значение интегрального критерия оптической однородности активной среды — числа Штреля по сравнению с двухструйным аналогом оказалось выше примерно на 30 % и составило 0,97.

Таким образом, предложенная конструкция трехструйного соплового блока обеспечила реализацию всех преимуществ режима работы с дополнительным разбавлением.

В этом же институте для оценки возможности генерации излучения непрерывным химическим лазером (НХЛ) в коротковолновой области спектра на длине волны  $\lambda \sim 1,3$  мкм проведена серия стендовых испытаний [37].

В качестве объекта исследования использовали стендовый образец сверхзвукового автономного HF-НХЛ традиционного типа, предназначенный для генерации

излучения на длине волны  $\lambda \sim 2,7$  мкм, с протяженностью активной среды вдоль оси оптического резонатора 700 мм.

Перевод лазера на режим работы в области обертоновых переходов молекул HF(V) осуществляется с помощью метода спектральной дискриминации, предполагающего применение оптического резонатора, обеспечивающего высокие значения коэффициента обратной связи в области генерации обертонового лазера и низкие его значения в области генерации лазера традиционного типа. Практически эта задача решалась путем применения резонаторной оптики со специально подобранными многослойными дискриминирующими диэлектрическими покрытиями и четырехзеркальной схемы оптического резонатора, позволившей значительно снизить коэффициент отражения от одного из плеч резонатора за счет искусственного введения дополнительных потерь посредством многократного отражения на дополнительных оптических элементах.

В результате выполненных исследований получена генерация на длине волны  $\lambda \sim 1,3$  мкм с уровнем выходной мощности 100 Вт, что соответствует эффективности генерации на обертоне (отношению выходной мощности на обертоне к выходной мощности на основной частоте при одинаковых условиях работы) 1%, т. е. практически реализован непрерывный химический лазер на обертоновых колебаниях, позволяющий достичь целый ряд новых эффектов:

вдвое снизить дифракционный предел расходимости излучения (пропорционально  $\lambda^{-1}$ ;

при равной выходной мощности и апертуре поднять яркость в дальней зоне примерно в четыре раза (пропорционально  $\lambda^{-2}$ );

резко улучшить прохождение излучения через атмосферу;

повысить нагревательную способность излучения за счет роста эффективного коэффициента поглощения материалов при уменьшении длины волны;

перейти к использованию более дешевой оптики на основе оптического стекла вместо дорогостоящей оптики на кристаллической или солевой основе.

Близкими по характеру процессов к HF-лазерам являются химические DF-лазеры. В случае импульсного или импульсно-периодического режима в обоих типах лазеров возможен переход на цепные химические реакции образования инвертированных состояний излучающих молекул. Однако представляет интерес выяснить и причины определенных наблюдающихся различий для обоих типов лазеров. В работе [38] Государственного института прикладной химии сопоставлены их энергетические характеристики.

В процессе реакции  $\text{H}_2(\text{D}_2) + \text{F}_2$  на возбуждение колебательно-вращательных уровней молекул HF и DF затрачивается близкая по значению энергия химического воздействия. Однако известные энергетические характеристики DF-лазера в 2—2,5 раза ниже, чем у HF-лазера.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование импульсных химических HF- и DF-лазеров с ламповым фотоиницированием с целью определения пределов преобразования химической энергии в энергию когерентного излучения.

В результате исследований получены рекордные для ламповой системы инициирования энергетические характеристики импульсных химических HF- и DF-лазеров (общая энергия излучения  $\sim 2$  кДж, удельный энергосъем  $\sim 50$  Дж/л, технический КПД  $\sim 40\%$ ). Определены условия достижения предельных, близких по значению к HF-лазеру, энергетических характеристик для DF-лазера: высокое превышение ненасыщенного коэффициента усиления над пороговым ( $\sim 100$ ) и низкие энергетические внутрирезонаторные потери. На основе математической модели проведена оценка влияния пространственно-временной неоднородности HF(DF)-

активной среды на энергетические характеристики излучения импульсных химических HF- и DF-лазеров.

Расчеты показывают, что одна из причин более низких энергетических характеристик DF-лазера по сравнению с HF-лазером связана с необходимостью увеличения добротности резонатора. Это приводит к росту времени жизни фотона в резонаторе и дополнительным энергетическим потерям в рабочей среде лазера. Применение каскадной схемы "задающий генератор — усилитель" для достижения предельных энергетических характеристик мощных DF-лазеров более предпочтительно.

Нецепные химические HF-лазеры (ХЛ) представляют собой достаточно простые и удобные источники мощного ИК-излучения в области длин волн  $\lambda = 2,6—3,1$  мкм и весьма перспективны для применения в различных областях науки и техники. Поэтому достаточно актуальным представляется исследование возможности управления спектром излучения такого лазера:

В работе [39] исследована возможность пространственно-частотной селекции излучения мощного импульсного нецепного химического HF-лазера. В условиях сравнительно медленной колебательной релаксации и быстрого установления вращательного равновесия возможно всю энергию ХЛ, распределенную достаточно равномерно по всему спектральному интервалу, посредством внутрирезонаторной частотной селекции сосредоточить в одной или нескольких колебательно-вращательных линиях каждого колебательного перехода.

В данной работе исследовалось спектральное распределение мощного HF-ХЛ в зависимости от наличия селективных внутрирезонаторных потерь и спектральных характеристик резонатора. Использовался ХЛ с короткоимпульсным ( $t \sim 10$  нс) разрядным иницированием, работавший на смесях  $SF_6: N_2 = 10:1$ . ( $P_s = 100$  торр) с энергией генерации  $E_G = 300$  мДж (активный объем  $\sim 200$  см<sup>3</sup>). Селективные потери вносились наполнением внутрирезонаторной кюветы (ВРК) длиной 50 см различными газами, обладающими набором узких линий поглощения в данной ИК-области.

Одним из наиболее эффективных поглотителей излучения HF-ХЛ являются молекулы  $CO_2$ . При напуске в ВРК 715 торр  $CO_2$  излучение ХЛ практически концентрируется в пяти линиях, причем интенсивности трех из них —  $P_1(4)$ ,  $P_2(7)$  и  $P_2(8)$  становятся в  $\sim 12, 2$  и  $2,7$  раза соответственно выше, чем в отсутствие  $CO_2$ . Интересно, что при внесении потерь энергия ХЛ в полосе 2—1 возрастает на  $\sim 20\%$  без уменьшения полной  $E_G$ .

Применение селективного резонатора в сочетании с внутрирезонаторной поглощающей кюветой привело к эффективной пространственной селекции излучения ХЛ. Ввиду больших коэффициентов усиления лазера, выходящее через то или иное зеркало резонатора лазерное излучение оказывается чувствительным к потерям, находящимся в соответствующей стороне от лазерной кюветы.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики был разработан и создан импульсно-периодический DF-лазер с неселективным резонатором и электроразрядным иницированием нецепной химической реакции в смеси  $SF_6-D_2-He$  при общем давлении 0,2 атм [40]. Частота посылок доходила до 50 Гц. Каждый импульс излучения имел энергию порядка 150 мДж, что является большой величиной для такого типа лазеров.

Впервые на базе нелинейных явлений в оптически прозрачных кристаллах была реализована генерация второй гармоники излучения DF-лазера для всех сильных линий. Использовались монокристаллы  $ZnGeP_2$  длиной 10,1 и 13,6 мм. Внутренняя эффективность преобразования (удвоения) частоты излучения в этих кристаллах составляла 7,6 и 11,8 % соответственно. Все это существенно расширяет области возможных применений таких лазеров в научных прикладных задачах.

## Экимерные лазеры

Повышение средней мощности излучения и надежности импульсно-периодических эксимерных лазеров позволит существенно расширить область их применений. Направлены усилия на достижение киловаттного уровня выходной мощности эксимерных электроразрядных лазеров.

Одним из наиболее очевидных путей является всемерное повышение частоты посылок импульсов генерации, что требует оптимизации схем предыонизации активной среды и модернизации основного разрядного контура.

Своеобразным эталоном технического совершенства является ХеСl-лазер фирмы "Lambda Physik" (Германия), имеющий мощность выходного излучения на уровне 500 Вт при частоте повторения импульсов 300 Гц.

В России исследования по эксимерным лазерам занимают также ведущие позиции по мировому рейтингу. Так, еще в 1990 г. в Институте атомной энергии (Москва) совместно с Институтом сильноточной электроники (г. Томск) создан эксимерный ХеСl-лазер (длина волны 0,308 мкм) мощностью порядка 600 Вт [41].

Система питания этого лазера сконструирована на базе четырех тиратронов и магнитного ключа. Требование большого ресурса работы элементов схемы накачки обусловило использование коммерческих тиратронов ТГИ-2500/50, каждый из которых коммутирует отдельный LC-контур. В конденсаторах может запасаться энергия до 1 кДж; время вклада этой энергии в разряд 200 нс; частота следования импульсов — до 350 Гц. В качестве дросселя сжатия использовался сердечник из аморфного железа. Корпус магнитного сердечника охлаждался водой. Для перевода магнитного сердечника в ненасыщенное состояние после прохождения очередного разрядного импульса применялась импульсная система размагничивания. Кроме того, для уменьшения потерь коммутируемой энергии в тиратронах в их анодные цепи вводились защитные дроссели, набранные из ферритовых колец.

В отличие от большинства публикаций, посвященных созданию лазеров с энергией генерации свыше 1 Дж, где используется рентгеновская предыонизация, в данном случае предыонизация осуществлялась УФ-излучением от разряда по поверхности диэлектрика. Металлическая (обратная) подложка диэлектрика охлаждалась водой. Электродная система состояла из высоковольтного перфорированного (с прозрачностью 40 %) и заземленного сплошного электродов. Разрядный объем лазера составлял 1,4 л.

На газовой смеси  $\text{HCl:Xe:Ne} = 1:5:1000$  при полном давлении 4 атм и зарядном напряжении 44 кВ (что соответствует энергозапасу в конденсаторах около 320 Дж) получена генерация в каждом импульсе 3 Дж. Фронт нарастания тока 120 нс, длительность токового импульса 200 нс, генерация излучения начинается на максимуме тока и продолжается 60 нс.

Средняя мощность излучения возрастает линейно до частоты посылок порядка 200 Гц. Более медленный рост средней мощности происходит до частоты 300 Гц, при которой достигнут максимальный уровень мощности — 650 Вт.

При использовании плоскопараллельного резонатора расходимость излучения составляла 2—5 мрад. После внедрения выносного неустойчивого конфокального резонатора с увеличением  $M = 6$  расходимость уменьшилась до 0,1 мрад при потере мощности на 35—40 %.

Дальнейшему росту средней мощности препятствовала как недостаточная скорость продува газовой смеси через разрядный промежуток ( $< 20$  м/с), так и возникающие и не успевающие затухать акустические возмущения газовой среды от предыдущих разрядных импульсов.

Установлено, что ресурс электротехнических элементов схемы накачки превышает  $10^7$  импульсов.

Вплоть до сегодняшнего дня это наиболее мощный отечественный эксимерный лазер с импульсно-периодическим режимом работы.

### Твердотельные лазерные установки

Исследования по твердотельным лазерам в основном ориентированы на совершенствование их оптических резонаторов и разработку новых материалов для активных элементов.

Применительно к мощным технологическим установкам на базе твердотельных Nd—YAG-лазеров наиболее эффективны те мероприятия, которые приводят к резкому уменьшению расходимости излучения при сохранении высокого уровня выходной мощности. Однако это является далеко не простой задачей. Результаты многочисленных экспериментов с устойчивыми резонаторами, обычно используемыми в твердотельных непрерывных лазерах, показали, что их модернизация в условиях сильной наведенной тепловой неоднородности активной среды не позволяет обеспечить малую расходимость выходного излучения при высоком уровне мощности.

В Государственном оптическом институте (Санкт-Петербург) предложена и исследована схема неустойчивого резонатора для Nd—YAG-лазера, включающего два активных элемента с сильной наведенной тепловой линзовостью [42]. Эксперименты проводились на базе серийно выпускаемого лазера ЛИТ-100 с номинальной мощностью 200 Вт.

По сравнению со штатным резонатором, обычно применяемым в этом лазере, мощность излучения снизилась на 20 %, зато осевая сила света возросла более чем в 30 раз. При этом расходимость выходного пучка всего в 2 раза превышала дифракционный предел, снизившись с 10,0 мрад до 1,6 мрад по уровню 0,86 мощности.

Примененный неустойчивый резонатор образован двумя полностью отражающими плоскими зеркалами и расположенным между ними (и вне активных элементов) выводным зеркалом с отверстием. Выполнение условия самоизображения отверстия позволяет практически без потерь мощности пропустить через него пучок, распространяющийся со стороны активного элемента. При необходимости отражающей поверхности выводного зеркала придается кривизна, компенсирующая сферичность падающей на нее волны.

Расстояния между зеркалами и активными элементами рассчитываются с учетом фокусного расстояния ожидаемой тепловой линзы в каждом активном элементе, которые, как правило, одинаковые.

Описанный подход и полученные результаты не имеют аналогов в мире и на сегодняшний день это, видимо, наиболее эффективный (при относительной простоте) метод радикального улучшения качества излучения мощных непрерывных твердотельных лазеров.

Во многих прикладных и научных задачах необходимо наличие достаточно мощных импульсно-периодических лазерных источников в диапазоне 1—2 мкм. Пока никакой кристалл не может конкурировать в области 1,06 мкм с YAG:Nd, который может генерировать и в области 1,3—1,45 мкм, конечно, с гораздо меньшей эффективностью. В последние годы достигнут значительный прогресс в разработке лазеров двухмикронного диапазона, использующих активные среды, в которых рабочими являются ионы гольмия  $\text{Ho}^{3+}$ . Однако трехуровневая рабочая схема лазерного процесса не позволяет добиться здесь большой энергетической эффективности.

В работе [43] Института общей физики (Москва) создан лазер на основе гадолиний-галлиевого граната  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , соактивированного ионами  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Nd}^{3+}$ . Лазер генерирует на длине волны 1,423 мкм с эффективностью более 1 %. При

ламповой накачке получена энергия импульса излучения 2,3 Дж в режиме свободной генерации. На частоте следования импульсов 13 Гц достигнута средняя выходная мощность лазера 21,6 Вт.

Показано, что в области длин волн 1,4 мкм генерация на вышеуказанном кристалле может быть реализована проще и с большей эффективностью, чем в кристалле YAG:Nd. Одновременно достигнутые параметры генерации позволяют рассматривать лазеры на основе гадолиний-галлиевого граната в качестве альтернативного источника излучения для двухмикронных гольмиевых лазеров, широко применяемых в медицине.

В этом же институте впервые в режиме модулированной добротности были исследованы генерационные свойства кристаллов кальций-ниобий-галлиевых и кальций-литий-ниобий-галлиевых гранатов, содержащих неодим [44].

На длине волны 1,06 мкм абсолютный КПД составил 0,49 %, на длине 1,33 мкм — 0,36 %, что соизмеримо с КПД лазера на YAG:Nd, излучающего на той же длине волны.

В работе [45] Института общей физики совместно с Государственным оптическим институтом проведены сравнительные исследования гольмиевых лазеров на базе иттрий-алюминиевых и скандиевых гранатах в импульсно-периодическом режиме. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при относительно низких уровнях возбуждения активной среды (40—50 Дж в импульсе) более предпочтительным для достижения высокой частоты повторения импульсов генерации является кристалл YAG. Однако путем принятия некоторых специальных мер (оптимизация спектра накачки, конфигурации резонатора и состава активной среды, термостатирование теплоносителя при повышенной температуре и так далее) частотный диапазон лазера на скандиевых гранатах может быть существенно расширен.

Надо отметить, что повышение эффективности твердотельных лазеров, в частности, неодимовых лазеров с неселективной накачкой, является одной из актуальнейших задач квантовой электроники. Частные решения этой задачи возможны на пути оптимизации резонаторов, осветительных систем и источников накачки, однако решение проблемы в целом невозможно без создания новых активных сред, обладающих эффективным поглощением в спектральном диапазоне излучения источников накачки. Высокие коэффициенты поглощения могут быть достигнуты как кардинальным увеличением концентраций рабочих частиц (при условии слабого концентрационного тушения люминесценции), так и применением эффекта сенсбилизации люминесценции.

В работе [46] Научно-производственного объединения "Астрофизика" предпринята попытка создания нового активного лазерного материала, позволяющего реализовать на практике указанные выше требования. Действительно, одна из характерных особенностей полученного впервые соединения — скадобарата лантана  $\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$  — состоит в том, что в нем допустимо введение активных ионов  $\text{Nd}^{3+}$  вплоть до 100 % без сколько-нибудь существенного концентрационного тушения люминесценции.

Монокристаллы скадобарата лантана достаточно технологичны в изготовлении, обладают высокой химической, механической и лазерной стойкостью. Проведенный цикл сравнительных генерационных испытаний показал, что лазеры на этом кристалле в 2 и 6 раз эффективнее, чем на скандиевом и иттрий-алюминиевом гранате соответственно.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности нового лазерного материала для создания высокоэффективных и малогабаритных низкопороговых лазеров.

## ОПЕРАТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ: КОММЕРЧЕСКИ ДОСТУПНЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И ИНВЕСТИЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

В данном разделе приведены данные о разработанных в 80-х гг. для промышленного применения лазерных технологических установках.

Научной базой для их создания послужили исследования до рубежа примерно 1985 г.

Поскольку с ростом мощности генерации обычно усложняются и инженерные проблемы реализации лазерной установки, то для наиболее яркой демонстрации современного отечественного научно-технического уровня в лазерной области выбраны для конкретного рассмотрения относительно мощные промышленные технологические установки, а именно, для твердотельных лазеров начиная с 100 Вт, а для газоразрядных  $\text{CO}_2$ -лазеров — с уровня более 1 кВт. Необходимо отметить, что эти установки, являясь весьма сложным видом аппаратуры, сами часто представляют объект исследований в интересах оптимизации их работы и формирования предложений по их модернизации.

Накопленный научно-технический задел совместно с последними исследованиями в области лазеров средней мощности создают базу для дальнейшего прогресса в области технологических лазеров. Реализация отдельных предложений, нацеленных на разработку установок, часто с уникальными параметрами, требует значительных производственных и финансовых затрат. Поэтому им целесообразно придавать статус инвестиционных проектов, аккумулирующих средства и силы из различных источников. Некоторые такие проекты отражены ниже.

### Промышленные $\text{CO}_2$ -лазеры

#### *Непрерывные $\text{CO}_2$ -лазеры с медленной прокачкой*

Характерным примером технологического  $\text{CO}_2$ -лазера с медленной прокачкой является установка "Иглан-3" [52], которая состоит из четырех основных систем: газовой системы, лазерной головки, системы охлаждения, системы электропитания и стабилизации разряда.

Лазерная головка включает в себя два одинаковых пакета из 37 газоразрядных стеклянных трубок с внутренним диаметром 1 см, толщиной стенки 1 мм и активной длиной 180 см. Трубки уложены параллельно в заранее отъюстированные сепараторы. Каждая из трубок состоит из двух секций длиной по 90 см, разделенных диэлектрической вставкой, исключающей пробой между катодами секций при отсутствии разряда в одной из них.

Накачка рабочей среды обеспечивается самостоятельным разрядом постоянного тока. Рабочее напряжение на разряде  $U = 12,6$  кВ, номинальный ток через одну разрядную трубку  $I = 18$  мА.

Резонатор лазера состоит из двух плоских зеркал. Глухое зеркало — медное охлаждаемое, выходное — плоская пластина из кристалла  $\text{ZnSe}$  с коэффициентом отражения 0,29. Резонатор работает в волноводном режиме. Число Френеля  $N_F = R^2/\lambda L = 0,6$ , где  $R$  — радиус трубки;  $L$  — длина резонатора.

Газовая система обеспечивает поддержание рабочего давления и непрерывную медленную прокачку через лазерную головку. Она состоит из двух вакуумных насосов 2НВР-5, баллонов с рабочими газами, редукторов и натекателей. Параметры рабочей смеси —  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1,8:5,5$  при давлении 2,7 кПа.

Система охлаждения собрана по двухконтурной схеме. Внутренний контур с трансформаторным маслом состоит из маслонасосов, теплообменников и охлаждает лазерную головку и блок балластных резисторов. Масло охлаждается водой, забираемой из внешнего водопровода. Потребление воды  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Источник высоковольтного питания состоит из регулируемого высоковольтного трансформатора и трехфазного выпрямителя. Положительный полюс выхода выпрямителя заземлен.

**Основные энергетические параметры лазера**

Мощность излучения, кВт:	
номинальная .....	3
максимальная .....	5
Флюктуация мощности излучения, % .....	3
Энергетическая расходимость излучения, мрад:	
по уровню 0,9 полной энергии .....	7,5
по уровню 0,5 полной энергии .....	1,5
Апертура излучения, мм .....	94
Коэффициент полезного действия, %:	
полный .....	10
электрооптический .....	14

Специально для широкого промышленного применения в Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам была разработана другая установка того же класса МТЛ-2 [53]. Ее принципиальное отличие от "Иглан-3" состоит в наличии микропроцессорной системы автоматического управления, охватывающей все подсистемы лазера и осуществляющей управление режимами работы лазера, контроль функционирования, связь с внешними устройствами, защиту и блокировку.

Блок генерации МТЛ-2 конструктивно выполнен в виде жесткого каркаса из четырех металлических штанг и двух торцевых плит. На этом каркасе монтируются направляющие, с помощью которых обеспечиваются требуемая схема протекания хладагента и крепление пакета разрядных трубок. Пакет содержит 85 трубок длиной 1700 мм каждая. Полный световой диаметр лазерного луча в плоскости выходного зеркала составляет 94 мм.

На торцах блока генерации в юстировочных устройствах установлены плоские зеркала диаметром 100 мм. Излучение лазера представляет собой набор параллельных гауссовых пучков, геометрия которого соответствует геометрии пакета трубок. Генерация в каждой из трубок в общем случае идет независимо, пучки взаимно некогерентны, следовательно, расходимость излучения лазера определяется расходимостью излучения одной трубки.

Состав рабочей смеси включает CO<sub>2</sub>, воздух и гелий.

**Основные энергетические характеристики МТЛ-2**

Режим работы .....	непрерывный
Длина волны, мкм .....	10,6
Номинальная мощность излучения, кВт .....	2
Стабильность мощности излучения, % .....	1—2
Пределы регулирования мощности, кВт .....	0,5—2,3
Энергетическая расходимость излучения, мрад .....	3
Апертура излучения, мм .....	90
Полный КПД, % .....	10

Высокая долговременная стабильность мощности излучения МТЛ-2 соответствует современному уровню требований к технологическим лазерам и обусловлена следующим комплексом активных и пассивных мер:

оптическая скамья резонатора изготовлена из инвара, юстировочные узлы имеют достаточную жесткость;

применена активная стабилизация температуры хладагента;  
использована совершенная система газонапуска и откачки с активной стабилизацией давления от микропроцессорной системы управления;  
предусмотрена активная внутренняя стабилизация силы тока разряда в источнике электропитания, дополненная стабилизацией мощности от микропроцессорной системы.

### Быстропроточные $\text{CO}_2$ -лазеры

Быстропроточные лазеры серии ЛОК с накачкой поперечным самостоятельным разрядом постоянного тока с несекционированными электродами разработаны Институтом теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской Академии наук (Новосибирск) [54]. На основе лазера ЛОК-2М производственное объединение "Сибэлектротерм" освоило промышленный выпуск лазерной технологической установки ЛН1.2НО-И1. В состав установки входят лазер, технологическая кабина, система транспортировки и фокусировки луча, источник питания, шкаф управления, выносной пульт управления, газовый шкаф.

Излучатель лазера представляет собой замкнутый контур. Рабочая смесь прокачивается двумя центробежными колесами вентилятора, закрепленными на одном валу. Теплообменник трубчато-ребристого типа расположен в цилиндрическом корпусе за разрядной камерой по потоку газа. Площадь поверхности теплообмена  $22 \text{ м}^2$ . Теплообменник рассчитан на мощность теплосъема  $30 \text{ кВт}$  при температуре газа на входе не более  $220^\circ\text{C}$  и на выходе — до  $40^\circ\text{C}$ .

Газоразрядный контур лазера является частью газового контура. На входе установлена решетка для выравнивания профиля скоростей газового потока. Расстояние между анодом и катодом  $70 \text{ мм}$ . Разряд инициируется импульсами длительностью  $8 \text{ мкс}$  и амплитудой  $3,5 \text{ кВ}$ , подаваемыми на дополнительный поджигающий электрод.

Резонатор, размещенный внутри герметичного корпуса газоразрядной камеры, конфокальный, неустойчивый, трехпроходной, увеличение  $M = 1,7$ . Излучение выводится через окно из монокристалла  $\text{KCl}$ , установленного под углом  $45^\circ$  к оси излучения.

### Основные технические характеристики лазера типа ЛОК-2М

Мощность излучения, кВт:

номинальная .....1,2

максимальная .....1,5

Диапазон регулирования мощности, кВт .....0,2—1,2

Нестабильность мощности излучения, % .....4

Длина волны, мкм .....10,6

Апертура излучения, мм .....50

Расходимость излучения по уровню 0,5 мощности, мрад .....1

Полный КПД, % .....6,5

Состав газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$  .....2:8:6

Расход газов, л/ч .....2000

Габаритные размеры, м:

излучателя .....2,3x1,2x1,8

блока питания .....3,4x0,8x1,8

Масса, кг .....2000

Другие лазеры указанной серии ЛОК имеют мощность излучения соответственно: ЛОК-3М — 2—2,5 кВт; "ЛОКОН" — 5—6 кВт.

Резонаторы этих быстропотоочных лазеров по конструкции и схеме однотипны, являются неустойчивыми конфокальными, усиление  $M = 2; 3$ . Излучение имеет шесть проходов через активную среду — по три прохода в каждом из двух разрядных промежутков.

Еще более совершенной и универсальной установкой является промышленный технологический быстропотоочный лазер ТЛ-5М. Он предназначен для применения в автоматизированных лазерных технологических комплексах для сварки и резки материалов больших толщин, а также поверхностной термообработки и наплавки. Разработан в Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам [55].

#### Основные технические параметры лазера ТЛ-5М

Номинальная мощность излучения, кВт:	
на смесях He:N <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> .....	6
„ N <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O .....	5
„ воздух:CO <sub>2</sub> .....	5
Диапазон регулирования мощности, кВт .....	0,2—7,0
Нестабильность мощности излучения, % .....	3
Апертура излучения, мм .....	50
Расходимость излучения, мрад .....	1,5
Полный КПД, % .....	6,5
Достигнутый ресурс, ч .....	500
Габаритные размеры, м .....	3,5x2,46x3,02

Модель характеризуется следующими конструктивными и технологическими признаками:

используется самостоятельный газовый разряд постоянного тока с эквипотенциальным анодом и плоским глубокосекционированным (как поперек, так и вдоль потока газа) катодом. Это позволило обеспечить приемлемый уровень удельного объемного энерговыклада ( $2 \text{ Вт/см}^3$ ) при использовании повышенного давления молекулярной компоненты рабочей смеси, в том числе при использовании безгелиевой рабочей смеси и даже наиболее дешевой рабочей смеси — воздух:CO<sub>2</sub>;

для прокачки газовой смеси в замкнутом контуре применяется высокооборотный электрокомпрессор осевого типа специальной разработки, в конструкции которого имеется встроенный электродвигатель;

используется неустойчивый резонатор, генерирующий одномодовое излучение кольцевого поперечного сечения во всем диапазоне регулирования мощности. Это обеспечивает плотность мощности в пятне фокусировки до  $10^7 \text{ Вт/см}^2$ , что достаточно для эффективной сварки и резки материалов больших толщин;

конструкция ТЛ-5М выполнена в виде моноблока для повышения компактности, надежности, удобства в управлении.

Представляет также несомненный интерес разработанный в той же организации оригинальный лазер комбинированного действия “Лантан-3”, способный генерировать как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме. По принципу действия это быстропотоочный CO<sub>2</sub>-лазер с несамостоятельным продольным разрядом и поперечным к нему направлением оси генерируемого лазерного пучка [56].

Лазер выполнен в виде единого блока, требующего только подвода энергии и охлаждающей воды; управляется от выносного малогабаритного микропроцессорного устройства, связанного с ним оптоволоконными линиями.

Мощность излучения можно изменять от 100 Вт до максимальной за время  $\sim 1 \text{ мс}$ . С этим свойством связана возможность работы установки как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с мгновенным переключением из одного режима в другой.

Используются четыре электрода: два для основного разряда и два для предыонизации. Отсутствуют секционирование и балластирование электродов.

Установка полностью автоматизирована на базе специализированного микропроцессорного устройства управления. Возможна работа практически с любым внешним технологическим оборудованием (координатным столом, станком с числовым программным управлением, роботом и т. д.).

Возможно использование двух видов резонаторов: многомодового — для получения мощного лазерного излучения (номинальная мощность 3, максимальная — 5 кВт) и близкого к одномодовому, формирующему высококачественный луч малой апертуры (15—20 мм) и расходимости (1 мрад) мощностью до 2 кВт. Резонатор первого типа используется для лазерной сварки, термоупрочнения и тому подобно, а второго типа — для резки различных материалов.

### Быстропроточные $CO_2$ -лазеры повышенной мощности

Опытное конструкторское бюро "Союз" (г. Казань) разработало, изготавливает и поставляет наиболее мощные в России универсальные установки для лазерной обработки материалов. В каждую установку входят генератор лазерного излучения (быстропроточный газоразрядный  $CO_2$ -лазер), а также оптические устройства и системы, которые позволяют внедрить прогрессивные термические технологии: лазерную резку, сварку и поверхностную термообработку [57]. Технические характеристики генераторов лазерного излучения приведены в таблице.

Параметры	ЛСУ-5MT	ЛСУ-5MT2
Режим работы	Непрерывный	
Мощность, кВт:		
максимальная	8,0	16,0
номинальная в зоне обработки	5,0	12,0
Диапазон регулирования, кВт	0,5—8,0	1,0—16,0
Невосполнимый расход компонентов смеси при максимальной мощности, л/ч:		
гелий	150	250
азот	150	250
углекислый газ	15	25
Максимальная мощность на безгелиевой смеси, кВт	4,5	7,5
Стабильность мощности, %, не хуже	5,0	7,5
Периодичность юстировки	Один раз в квартал	
Максимальная потребляемая мощность, кВт (380/220 В)	100	180
Площадь, необходимая для размещения генератора, м <sup>2</sup>	25	30
Продолжительность рабочего непрерывного цикла, ч	8	
Установленный ресурс, ч:		
по механическим узлам	10 000	
по оптическим элементам	5000	
по узлам разрядной камеры	3000	

Генераторы лазерного излучения семейства ЛСУ, разработанные Казанским опытным конструкторским бюро "Союз" в научном содружестве с Институтом атомной энергии, имеют энергетические характеристики на уровне лучших мировых образцов лазерной техники. В то же время по надежности, стабильности характеристик и ресурсу они соответствуют авиационным газотурбинным двигателям, опыт создания которых был использован при разработке указанных установок.

В последние годы совместно с рядом предприятий оборонных отраслей промышленности разработан проект технологического лазера ЛИ20-30 с мощностью излучения 25 кВт.

### Технологические импульсно-периодические $\text{CO}_2$ -лазеры

Одним из наиболее совершенных импульсно-периодических  $\text{CO}_2$ -лазеров, специально разработанных для процессов термической обработки материалов (сварки, резки, пробивки отверстий), является лазер ИПТЛ-2 [58], созданный в Научно-исследовательском центре по технологическим лазерам.

#### Основные технические параметры ИПТЛ-2

Средняя мощность излучения, кВт	.....1,5
Частота следования импульсов, Гц, не более	.....1200
Длительность импульсов, мкс	.....5—50
Энергия в импульсе, Дж, не более	.....2 (4)
Полный КПД, %	.....5
Апертура излучения, мм	.....20
Расходимость излучения, мрад	.....2
Рабочая смесь — $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$	.....1:6:10
Давление, кПа	.....13—33

Наибольшие отличия от быстропоточных непрерывных лазеров здесь заключаются в системах накачки и электропитания.

Система накачки ИПТЛ-2 состоит из двух идентичных газоразрядных блоков, имеющих автономное импульсное электропитание. Основной конструкции разрядной камеры является анодная плита из дюралюминия с плоской рабочей поверхностью. К анодной плите через диэлектрические приставки подвешены два профилированных медных катода.

Для создания ультрафиолетовой предыонизации используются 34 автомобильные свечи, закрепленные на аноде. Ряд свечей сдвинут вниз по потоку на 40 мм от оси разряда.

Разрядные камеры позволяют возбуждать смесь в объеме  $2 \times (1 \times 0,2 \times 0,25) \text{ м}^3$ . Обе разрядные камеры объединены П-образным устойчивым резонатором.

Сочетание двух камер и резонатора позволяет получить три режима работы лазера:

- одновременное срабатывание разрядных камер;
- поочередное срабатывание разрядных камер;
- срабатывание одной разрядной камеры с некоторой задержкой относительно другой.

В первом режиме энергия в импульсе достигает 2—4 Дж при частоте следования импульсов 1—600 Гц. Во втором режиме частота следования увеличивается вдвое с соответствующим уменьшением энергии в импульсе. В третьем режиме происходит удлинение импульса излучения.

В ряде технологических процессов определяющим является способность лазерной установки обеспечивать очень высокую мощность излучения в повторяющемся

режиме при умеренной энергии импульса. Это прежде всего процессы атомно-молекулярной селективной технологии, такие как лазерный синтез и разделение изотопов. Другими словами, лазерная установка должна характеризоваться возможно малой длительностью импульса (0,01—1 мкс), высокой частотой повторения импульсов (100—1000 Гц) и достаточно заметной энергией в импульсе (1—100 Дж). Именно ТЕА-лазеры, обладающие высокой плотностью рабочей среды (практически атмосферного давления), быстрой скоростью прокачки ее и интенсивным импульсным энерговыделением, наилучшим образом соответствуют этим требованиям.

Типичным представителем ТЕА-лазера для селективных технологий является установка "Дятел" [59], разработанная в Институте атомной энергии. Лазер может устойчиво работать при давлении до 80 кПа рабочей смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ , при этом энергия импульса доходит до 10 Дж на частоте повторения 200 Гц.

Резонатор лазера — устойчивый селективный, образован медным вогнутым зеркалом ( $R = 10$  м) с коэффициентом отражения 98,5 % и дифракционной решеткой, имеющей 100 штрихов на 1 мм. Резонатор позволяет обеспечивать генерацию на любом колебательно-вращательном переходе Р- и R-ветвей 9- и 10-микронных полос в диапазоне длин волн 9,2—10,8 мкм. Расходимость излучения 0,001 мрад.

Предыонизация обеспечивается ультрафиолетовым излучением искровых разрядников, расположенных сбоку от основных электродов в нижней по потоку части газоразрядной камеры. Амплитуда тока основного разряда достигает 50 кА. Время нарастания импульса тока 100 нс, длительность 1 мкс.

Импульс излучения имеет характерную для ТЕА-лазеров форму — начальный пик длительностью около 100 нс и протяженный по времени "хвост" до 1,5 мкс. При работе на смеси газа без азота ( $\text{CO}_2:\text{He} = 1:5$ ) "хвост" в импульсе отсутствует.

### Технологические твердотельные лазеры

В Ленинградском оптико-механическом объединении (С.-Петербург) еще в начале 80-х гг. завершена разработка технологических лазеров серии ЛТН-100, которые представляют собой мощные многомодовые Nd:YAG-непрерывного действия и с непрерывной накачкой [60]. Лазер ЛТН-102 имеет две модификации: ЛТН-102А и ЛТН-102Б с мощностью излучения 125 и 30 Вт на длинах волн 1,06 и 1,32 мкм соответственно (при мощности накачки < 4,5 кВт).

При выборе схемы резонатора для многомодовых лазеров определяющим является возможность достижения максимальной выходной мощности при сохранении относительно небольшой расходимости излучения. Этому условию удовлетворяет резонатор, образованный плоскими зеркалами, расположенными на расстоянии 360 мм один от другого при длине излучателя 550 мм (для лазеров ЛТН-101 и ЛТН-102). Такой резонатор обеспечивает линейную зависимость мощности излучения во всем рабочем диапазоне мощности накачки. Увеличение мощности излучения в лазере ЛТН-103 до 250 Вт (при мощности накачки около 9 кВт) достигается за счет установки второго квантрона и удвоения длины резонатора (720 мм) при общей длине излучателя 850 мм. Квантрон представляет собой несущий корпус, выполненный из коррозионно-стойкой стали, внутри которого находятся отражатель, активный элемент и лампа накачки.

Мощные Nd:YAG-лазеры находят все большее применение благодаря своей компактности, высокой эксплуатационной надежности, хорошему качеству лазерного излучения (высокая стабильность и малый диаметр луча при относительно небольшой расходимости), меньшему по сравнению с излучением  $\text{CO}_2$ -лазеров коэффициенту отражения от металлов. Преимуществом Nd:YAG-лазеров является также тот факт, что для систем транспортировки излучения используется традиционная стеклянная или кварцевая оптика. При дальнейшем повышении уровня мощ-

ности до 500—1000 Вт лазеры серии ЛТН-100 смогут широко применяться в различных областях лазерной термической технологии. Но учитывая, что в США и Японии уже давно освоены технологические твердотельные лазерные комплексы мощностью 400—1200 Вт, приходится констатировать определенное отставание отечественных промышленных лазерных установок на базе кристаллов Nd:YAG.

### Инвестиционные проекты

#### *Автономный мобильный технологический газодинамический CO<sub>2</sub>-лазер*

Краткая техническая характеристика проекта, предлагаемого к реализации с участием иностранного капитала [61], приведена ниже.

Мощность непрерывного излучения, кВт	50—100
Угловая расходимость, рад	$3 \cdot 10^{-4}$
Диаметр светового пучка, мм	100
Расход керосина, кг/мин:	
при мощности 50 кВт	20
при мощности 100 кВт	40
Расход лазерного горючего (толуол, керосин), кг/мин:	
при мощности 50 кВт	6,7
при мощности 100 кВт	13,3
Время непрерывной работы без дозаправки баков, мин	30
Ресурс, ч	5000
Габаритные размеры, м	9x3x2,5
Масса, кг:	
при мощности 50 кВт	5200
при мощности 100 кВт	7300

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

#### Металлургическая промышленность:

резка слябов без нагартовки в месте реза;  
упрочнение рабочих поверхностей валков прокатных станов.

#### Машиностроение и железнодорожный транспорт:

точная резка деталей толщиной 50—100 мм из любых материалов;  
высококачественная сварка толстостенных деталей из различных и разнородных сплавов;  
закалка и упрочнение металлических поверхностей большой площади;  
оперативный ремонт рельсов без их демонтажа.

#### Атомная и нефтегазодобывающая промышленность:

дистанционная резка узлов отработанных ядерных реакторов подводных лодок, атомных ледоколов, атомных электростанций;  
демонтаж отработанных нефтяных вышек, эстакад, в том числе при авариях, пожарах и стихийных бедствиях;  
уничтожение нефтяных пленок на поверхности воды после аварий танкеров, нефтяных трубопроводов.

**ПРЕДЛАГАЕМОЕ ЛАЗЕРНОЕ УСТРОЙСТВО**

Характеризуется:

полной автономностью;

мобильностью;

экологической чистотой;

использованием хорошо отработанных узлов и агрегатов, применяемых в авиационной технике;

отличается от других типов мощных лазеров:

минимальными массогабаритными характеристиками;

возможностью работы в полевых условиях при отсутствии стационарных источников электропитания и специального газоснабжения.

Мировых аналогов не имеет!

**НЕОБХОДИМЫЙ ОБЪЕМ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

стоимость разработки — 8,3 млн. дол. США;

срок разработки опытного образца — 1,5 года;

окупаемость — один год от начала серийного выпуска пяти образцов в год;

рынок сбыта — промышленно-развитые страны (США, Япония, Франция, Германия).

Имеются потенциальные зарубежные инвесторы, готовые на долевое участие в финансировании проекта.

Головной разработчик — научно-производственное малое предприятие “Луга” (при научно-производственном объединении “Алмаз”).

Научный руководитель — Институт общей физики Российской академии наук.

В кооперацию входят научно-исследовательские институты и конструкторские бюро Государственного комитета по оборонным отраслям промышленности.

Контакты возможны через Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации (ВИМИ) (Москва).

*Комплекс мощных технологических лазеров*

Под научным руководством Института общей физики и на базе его научно-технического задела предлагается организовать производство нового комплекса технологических лазеров [62].

Номенклатура лазеров следующая:

импульсно-периодический  $\text{CO}_2$ -лазер ТС-30;

импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер ТС-150 (энергия импульса 200 Дж);

импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер ТС-300 (энергия импульса 300—500 Дж);

импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер ТС-100;

стабилизированный технологический непрерывный  $\text{CO}_2$ -лазер;

автономный мобильный газодинамический  $\text{CO}_2$ -лазер;

технологический лазер на твердотельном активном элементе.

Срок постановки изделий на производство составляет 12 мес.

**НЕОБХОДИМЫЙ ОБЪЕМ ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Инвестиционная стоимость проектной разработки и изготовления семи типов лазеров в количестве шести единиц в 1995 г. и 16 единиц в 1996 г. составляет ~ 8 млн. дол.

Предполагается наращивание производства в 1997—1998 гг.

**ОЖИДАЕМЫЙ ГОДОВОЙ ДОХОД И ПРИБЫЛЬ**

Предполагаемая прибыль от реализации продукции будет составлять:

в 1995 г. — 3,5 млн. дол.;

в 1996 г. — 7,5 млн. дол.

Возврат средств, затраченных на проект, произойдет ориентировочно через 18—20 мес.

Контакты возможны через Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации (ВИМИ).

### *Российская часть проекта EU113 ("СО-Евролазер")*

В настоящее время в России разрабатываются два типа мощных СО-лазеров специально для промышленного применения и отработки на них термических технологий. Работа ведется в рамках проекта EU113 ("СО-Евролазер") Европейской программы "Эврика" ("Eureka") [16, 49, 50]. Это единственный лазерный проект с российским участием во всей программе, причем он был сформирован еще до официального вступления России в состав ее стран-участниц в 1994 г. Данный факт отражает международное признание лидирующих позиций российской науки и техники в области разработки мощных СО-лазеров.

В проекте EU113 заняты также 11 британских и 5 французских организаций. Их усилия сосредоточены на разработке отпаянных СО-лазеров с высоким качеством луча и мощностью 50 Вт, а также на создании гаммы технологических СО-лазеров мощностью 1—4 кВт. Российская часть проекта предусматривает подготовку к внедрению в промышленные технологии СО-лазеров мощностью 10 кВт, в которых Россия имеет неоспоримый приоритет, по крайней мере, на европейском уровне.

С июля 1992 г. от России в проекте принимают участие:

Физический институт Российской академии наук (Москва) — осуществляет научное и организационное руководство;

Специальное конструкторское бюро по лазерной технике и технологии (Екатеринбург);

холдинговая компания "Юнона лазер" (Москва);

опытное конструкторское бюро "Радуга" (Владимирская обл.).

В обеих опытных лазерных установках, которые уже реально функционируют, используется для накачки среды несамостоятельный разряд с предыонизацией электронным пучком. Первая установка (в Екатеринбурге) может работать в непрерывном режиме на уровне мощности 10 кВт или в режиме "мягкой" импульсной модуляции (пиковая мощность 20 кВт, длительность импульса 0,5—1 мс, частота повторения импульсов 500—1000 Гц). Второй лазер (в городе Радужный Владимирской обл.), имея среднюю мощность 5—10 кВт, используется в "жестком" импульсно-периодическом режиме (пиковая мощность 0,2—1,0 МВт, энергия импульса 100 Дж, длительность импульса 0,1—0,5 мс, частота повторения 50—100 Гц). Главная особенность второй установки — применение компрессорно-детандерной холодильной машины непосредственно в замкнутом газодинамическом тракте лазера.

К исследовательским работам на этих установках по лазерным и технологическим процессам проявляет большой интерес германо-французский институт в Сент-Льюисе (at Sainte-Louise), а также французский Институт сварки (Institut de Soudure). Совместная часть работ по проекту EU113 российских, британских и французских ученых пользуется поддержкой Научного комитета НАТО (NATO Science Committee) [50].

Несмотря на определенную финансовую поддержку российской части проекта EU113 со стороны Министерства науки и технической политики Российской Федерации, ощущается острая необходимость в дополнительных инвестициях, в том числе зарубежных [49], чтобы успешно завершить к заданному сроку (1997 г.) запланированный цикл исследований и конструкторских разработок. Развитие этого

направления может в ближайшее время привести к созданию мобильных и высокоэффективных установок на базе мощных СО-лазеров для дистанционной резки толстостенных объектов типа ядерных реакторов, кораблей, танков, баллистических ракет и другой утилизируемой техники. Разработка и создание головного образца подобной установки оценивается в 1 млн. дол.

### З а к л ю ч е н и е

Приведенные материалы и их аналитическая оценка подтверждают сохранение высокого научно-технического уровня российских исследований и разработок в области лазерных источников средней мощности практически всех основных типов. В ряде конкретных направлений в последние годы получены результаты, существенно превышающие достигнутый мировой уровень. Однако в значительной степени это объясняется инерцией ранее набранного научно-технического задела. В сегодняшних трудных экономических условиях России, особенно для наукоемких производств и разработок, необходимый поступательный темп развития лазерной физики, техники и технологии в значительной степени может быть сохранен только при научной и финансовой кооперации с зарубежными партнерами.

### Литература

1. Ковш И. Б. // Конверсия в машиностроении. 1994. № 2. С. 16.
2. Иванченко А. И., Крашенинников В. В. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 7. С. 643.
3. Голов В. К., Иванченко А. И. и др. // Известия Сибирского отделения Академии наук. Сер. Техническая. 1986. № 10. С. 87.
4. Грачев Г. Н., Иванченко А. И. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 1. С. 131.
5. Грачев Г. Н., Иванченко А. И. и др. // Оптика лазеров'93, 1993: Тез. докл. Ч. 1. С. 132.
6. Грачев Г. Н., Иванченко А. И. и др. // Там же. С. 131.
7. Грачев Г. Н., Иванченко А. И., Пономаренко А. Г. // Там же. С. 130.
8. Бардаковский С. В., Блинов Н. А. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 816.
9. Генералов Н. А., Зимаков В. П. и др. Оптика лазеров'93, 1993: Тез. докл. Ч. 1. С. 277.
10. Аничищев С. Г., Котликов Е. Н., Прокашев В. Н. // Там же. С. 258.
11. Котликов Е. Н. // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. С. 838.
12. Гнедой С. А., Самаркин В. В., Якунин В. П. // Оптика лазеров'93, 1993: Тез. докл. Ч. 1. С. 159.
13. Леонтьев В. Г., Мольков С. И. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 10. С. 931.
14. Меркушенков В. Н., Чесноков В. И. // Там же. № 11. С. 1008.
15. Бунгова Т. А., Лавров А. В. и др. // Там же. 1991. Т. 18. № 12. С. 1412.
16. Ионин А. А. // Там же. 1993. Т. 20. № 2. С. 113.
17. Алейников В. С., Масычев В. И. Лазеры на окиси углерода. — М.: Радио и связь, 1990.
18. Laser Market // Коммерческий бюллетень по лазерной технике. 1992. № 2. С. 23.
19. Григорьян Г. М., Дымщиц Б. М., Ионих Ю. З. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. С. 669.
20. Басов Н. Г., Беленов Э. М. и др. // Там же. 1971. № 3. С. 121.
21. Басов Н. Г. и др. // Письма в жур. экспериментальной и теоретической физики. 1971. Т. 14. С. 545.
22. Аверин А. П., Басов Н. Г. и др. // Известия Академии наук. Сер. Физическая. 1983. № 8. С. 1519.
23. Аверин А. П., Басов Н. Г. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. С. 2357.
24. Аверин А. П., Бабаев И. К. и др. // Там же. 1990. Т. 17. С. 493.
25. Баранов И. Я. // Там же. 1994. Т. 21. № 6. С. 581.
26. Баранов Г. А., Баранов И. Я., Борейшо А. С. // Там же. 1993. Т. 20. № 3. С. 222.
27. Баранов И. Я., Гончаров В. Д., Тимощук И. В. // Там же. Т. 21. № 1. С. 111.
28. Баранов И. Я., Борейшо А. С., Воробьев К. Л., Тимощук И. В.: Пат. 2002346 Россия. Бюл. изобретений. 1993. № 39—40. С. 174.
29. Баранов И. Я. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 8. С. 739.
30. Дудкин В. А., Либрович В. Б., Рухин В. Б. // Ж. техн. физики. 1983. Т. 53. С. 1655.
31. Дудкин В. А., Рухин В. Б. // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24. № 2. С. 115.
32. Дудкин В. А., Рухин В. Б. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 9. С. 1036.
33. Виноградова Л. Г., Загидуллин М. В. и др. // Там же. 1982. Т. 9. № 6. С. 1193.
34. Загидуллин М. В., Николаев В. Д., Свистун М. И. // Там же. 1994. Т. 21. № 1. С. 23.
35. Загидуллин М. В. и др. // Там же. 1991. Т. 18. № 12. С. 1417.
36. Галаев И. И., Конкин С. В. и др. // Оптика лазеров'93, 1993: Тез. докл. Ч. 1. С. 184.
37. Конкин С. В., Кривицкий А. М. и др. // Там же. С. 200.
38. Азаров М. А., Дроздов В. А., Малышев Ю. А. // Там же. С. 196.

39. Гордон Е. Б., Матюшенко В. И. и др. // Там же. С. 195.
40. Андреев Ю. М., Великанов С. Д. и др. // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 11. С. 1110.
41. Борисов В. М., Виноходов А. Ю., Герасимов С. М. и др. // Там же. 1991. Т. 18. № 2. С. 183.
42. Горланов А. В., Димаков С. А. и др. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 76. № 4. С. 776.
43. Дорошенко М. Е., Осико В. В. и др. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 6. С. 569.
44. Воронько Ю. К., Еськов Н. А., Осико В. В. и др. // Там же. С. 574.
45. Антипенко В. М., Забазнов А. М. и др. // Там же. № 12. С. 1149.
46. Кутовой С. А., Лаптев В. В., Мацев С. Ю. // Там же. 1991. Т. 18. № 2. С. 149.
47. Глотов Е. П., Данилычев В. А., Ионин А. А. и др.: Краткие сообщения по физике / ФИАН, 1985. № 12. С. 30.
48. Ionin A. Proc. IV Intern. Congr. on Optical Science and Engng., ECO-IV, The Hague, 1991, paper 1-502-41.
49. Averin A., Erofeev E., Ionin A. Int. Symp. "High Power Lasers and Laser Applications". 5-9 April 1994. Vienne, Report № 220616; Proc. SPIE, 1994. V. 2206. P. 154.
50. Newsletter. The NATO Science Committee..., 1-st quarter 1994. Issue № 40. P. 2.
51. Басов Н. Г., Глотов Е. П. и др. // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 5. С. 1067.
52. Козлов Г. И., Кузнецов В. А. // Там же. 1985. Т. 12. № 3. С. 553.
53. Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Инженерные основы создания технологических лазеров: Кн. 2. — М.: Высш. шк., 1988.
54. Иванченко А. И., Крашенинников В. и др. Применение лазеров в народном хозяйстве: Всес. конф. — Звенигород. 17—20 мая 1985. — М.: Наука, 1986.
55. Абыльшитов Г. А., Азанчевский В. Л. и др. Применение лазеров в народном хозяйстве: Всес. конф., 1985. — М.: Наука, 1986.
56. Генералов Н. А., Зимаков В. П. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 8. С. 1549.
57. Информационный материал Казанского опытного конструкторского бюро "Союз", 1994.
58. Абыльшитов Г. А., Голубев В. С. и др. Технологические лазеры: Справочник. Т. 1. — М.: Машиностроение, 1991.
59. Велихов Е. П., Баранов В. Ю. и др. Импульсные CO<sub>2</sub>-лазеры и их применение для разделения изотопов. — М.: Наука, 1983.
60. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д., Шалаев Е. А. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. — М.: Радио и связь, 1985.
61. Информ. матер. выставки "Конверсия — городу", 1994. — М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т межотр. информ.

**A LASER SOURCE OF AVERAGE POWER**  
**( The analytical review of investigations in Russia )**

**V. I. Barinov**

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

*Investigations, development and the industrial nomenclature of native average power lasers are analysed in this review. Its are orientated on progressiv thermal technologies first of all.*