Повышение качества излучения мощных индустриальных лазеров.

В.В.Васильцов, В.С.Голубев, М.Г.Галушкин, В.Я.Панченко, В.П.Якунин.
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

Предисловие

Лазеры отличаются от других источников излучения светового спектрального диапазона высокой пространственной направленностью лазерных пучков и очень узким частотным спектром. Высокая пространственная и спектральная яркость излучения обеспечивают широкие возможности для применения лазеров в научных, технологических и медицинских целях. Поэтому проблеме повышения качества излучения, которое характеризует его направленность, с самого начала развития лазерной физики и техники уделяется особенно большое внимание. В области индустриальных лазеров эти задачи имеют значительные особенности, связанные с их функциональным назначением, и остаются постоянно актуальными. Качество излучения во многом определяет уровень совершенства и конкурентную способность разрабатываемых мощных индустриальных лазеров.

По этой теме в ИПЛИТ РАН , начиная со времени его основания, проведён значительный объём экспериментальных и теоретических исследований, в процессе которых было решено множество физико-технических задач лазерной оптики, в том числе нелинейные, что позволило создать эффективные оптические системы формирования излучения мощных индустриальных лазеров с высоким качеством излучения. В результате, по этому показателю, созданные в нашем институте мощные индустриальные CO_2 лазеры с поперечной прокачкой ТЛ-1,5, ТЛ-3, ТЛ-5 и диффузные

волноводные CO_2 лазеры серии TL-1200 соответствуют самым высоким зарубежным достижениям в этой области.

Разработанные принципы и методы решения проблемы повышения качества излучения мощных индустриальных лазеров создают основу для дальнейшего развития этого направления исследований.

Данная тематика ведётся в ИПЛИТ РАН под научным руководством академика РАН В.Я.Панченко и профессора, д.ф.-м.н. В.С.Голубева. Ответственными исполнителями являются к.ф.-м.н. М.Г.Галушкин, к.ф.-м.н. В.П.Якунин и профессор ,д.ф.-м.н. В.В.Васильцов (качество излучения мощных диффузионных волноводных CO_2 лазеров). В разработке темы принимал участие профессор д.ф.-м.н. П.В.Короленко - (физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова). В проведении экспериментов по определению коэффициента турбулентной диффузии новым дистанционным методом участвовали: профессор, д.ф.-м.н. А.А.Ионин и к.ф.-м.н. А.А.Котков (физический институт РАН им. П.Н.Лебедева.). Экспериментальные инмерения параметров турбулентности и их статистическую обработку проводили сотрудники ИПЛИТ РАН к.ф.-м.н. Ю.М.Завлов и к.ф.-м.н.Р.В.Гришаев.

Аннотация.

Качество излучения является одним из важнейших параметров индустриальных лазеров, от которого во многом зависит производительность и точность лазерных технологических операций. Поэтому проблеме повышения качества излучения мощных индустриальных CO_2 лазеров постоянно уделяется большое внимание в ИПЛИТ РАН. В основу решения этой проблемы был положен комплексный подход, учитывающий все основные физические и технические факторы, влияющие на качество излучения, и их взаимосвязь с другими важными параметрами индустриальных лазеров.

В ИПЛИТ РАН выполнен большой объём теоретических и экспериментальных исследований физико-технических процессов формирования излучения высокого качества в мощных индустриальных лазерах. Работы проводились с целью повышения качества излучения современных индустриальных лазеров и согласования его параметров с конкретными условиями различных технологических операций.

Основные приоритетные результаты ИПЛИТ РАН по исследованию проблемы качества излучения мощных индустриальных лазеров состоят в следующем:

- Определены основные, включая и нелинейные, источники аберраций волнового фронта в мощных непрерывных CO_2 лазерах.

- Используя принцип пространственного согласования оптических и газодинамических систем, разработаны схемы оптических резонаторов, обеспечивающие высокое качество излучения мощных CO_2 лазеров с поперечной прокачкой и секционированными электродами газоразрядной камерой (ГРК) постоянного тока.

- Достигнуто предельно высокое качество излучения (M^2 ; 1) мощных индустриальных CO_2 лазеров с диффузионым охлаждением.

- Проведено математическое моделирование процессов формирования излучения в резонаторах индустриальных лазеров .

- Теоретически показано, что в мощных твёрдотельных дисковых лазерах с диодной накачкой фактором, ограничивающим качество излучения, является термодеформации активного элемента , вызывающие его изгиб, а в волоконных лазерах ограничения на качество

излучения связаны, главным образом, с его многоканальностью.

Публикации.

Опубликовано свыше 30 статей и докладов в научно-технических журналах и сборниках: сборники трудов и монографии ИПЛИТ РАН, «Известия РАН. Серия физическая», «Квантовая электроника», «Оптика и спектроскопия», «Теплофизика высоких температур», «Оптический журнал», «Journal of Russian Laser Research», «Proceedings SPIE», «Proceedings of LTL»(Bulgaria).

Основные публикации

Progress in Research and Development of High-Power Industrial CO_2 lasers.

Vladislav Ya. Panchenko, Vladimir S. Golubev,
Editors, Proceedings of SPIE Vol.4165 (2000).

Современные лазерно-информационные и лазерные технологии:// Сборник трудов ИПЛИТ РАН. Под ред. В.Я Панченко и В.С Голубева – М.: Интерконтакт наука . 2005. -304 с. – ISBN 5902063-12-4

Лазерные технологии обработки металлов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я Панченко.- М.: ФИЗМАТЛИТ.2008-704 с.- ISBN 978-5-9221-1023-5
Часть III, гл. 15. Качество излучения индустриальных лазеров.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития и промышленного использования лазерной макрообработки материалов (резка, сварка, перфорация отверстий, объёмный синтез деталей и др.) во многом зависит от решения проблемы повышения качества излучения мощных индустриальных лазеров. Важной особенностью этой задачи для таких лазеров состоит в её комплексности, т.е. повышение качества излучения не может осуществляться за счёт снижения других параметров лазера: ресурса работы, КПД, мощности, управляемости, габаритов и стоимости. Эти условия накладывают значительные ограничения на выбор способов формирования излучения и вызывают необходимость использования принципа пространственного согласования оптической и газоразрядных систем.

С увеличением мощности лазеров становятся всё более сложными условия для достижения высокого качества излучения, потому что возрастают тепловые и лучевые нагрузки на оптические элементы и активные среды, а также предъявляются всё большие требования к системе термостабилизации. Поэтому качество излучения рассматривается с учётом мощности лазерного пучка. Например, для CO_2 лазеров малой мощности (до нескольких сот ватт) получить качественное излучение значительно легче, чем для лазеров среднего диапазона мощности (до нескольких киловатт) и тем более чем для лазеров высокой мощности (свыше3-4 кВт.).

Аналогичная ситуация имеет место и для других лазеров, в частности твёрдотельных. В последнее время, благодаря развитию полупроводниковых лазеров и расширению типов активных элементов, а также технологии волоконной оптики, разработаны мощные твёрдотельные лазеры с диодной накачкой. При равной с CO_2 лазерами мощности они обеспечивают плотность мощности при фокусировке в область воздействия, достаточно высокую для обработки материалов (резки,

сварки и др.). К таким лазерам относятся дисковые и волоконные с диодной накачкой.

Состояние проблемы качества излучения мощных лазеров.

Повышение качества излучения мощных лазеров является одной из основных задач лазерной физики и лазерной техники. Её решение тесным образом связано с мощностью и особенностями каждого типа лазеров. Индустриальные лазеры представляют собой отдельный широкий класс лазеров, отличающихся, прежде всего, большим ресурсом работы в промышленных условиях. По этим причинам проблема качества излучения этих лазеров имеет большую специфику. С одной стороны при её решении учитываются все современные достижения лазерной оптики и оптической технологии, а с другой – обязательно принимаются во внимание необходимость выполнения общих требований к параметрам индустриальных лазеров. В виду особой важности качества излучения для технологических операций, этому вопросу уделяется большое внимание с самого начала разработок индустриальных лазеров. Однако, по той же причине ведущие зарубежные компании и фирмы, при финансовой поддержке которых ведутся фундаментальные научные исследования проблемы качества излучения в научных учреждениях, стараются ограничивать публикации полученных результатов с целью повышения коммерческой конкуренции своей продукции.

К основным результатам фундаментальных исследований авторского коллектива ИПЛИТ РАН, являющиеся существенным вкладом в решение проблемы повышения качества мощных индустриальных лазеров, относятся следующие:

1.. Определены и изучены основные источники аберраций волнового фронта в оптических элементах и активных средах мощных индустриальных лазеров.

2. Разработаны оптические схемы формирования излучения с высоким качеством, близким к предельному ($(M^2\ ;\ 1)$, для мощных CO_2 лазеров (3-4 кВт) с поперечной прокачкой газа и секционированноё ГРК постоянного тока.

3. Осуществлена одномодовая генерация волноводных CO_2 лазеров с диффузионным охлаждением мощностью до 1 кВт.

4.. Проведены экспериментальные исследования на уровне киловаттной мощности метода генерации на одной высокой моде устойчивого резонатора с внешним фазовым корректором.

5. Экспериментально и теоретически исследованы нелинейные эффекты, влияющие на пространственные и энергетические параметры индустриальных CO_2 лазеров с поперечной прокачкой.

Расширенное изложение этих результатов содержится в следующих трёх разделах:

ИСТОЧНИКИ АБЕРРАЦИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В МОЩНЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ЛАЗЕРАХ.

Основными физическими факторами, влияющими на качество генерируемого лазерного излучения являются селектирующие свойства резонаторов и оптические аберрации волнового фронта, возникающие в оптических элементах и в активных средах. Основные типы оптических резонаторов и их свойства довольно подробно изучены и они широко известны (см. например

монографию Ю.А.Ананьева « Оптические резонаторы и лазерные пучки» М.Наука 1990.
Источники аберраций волнового фронта и степень их влияния на качество излучения зависят от конкретного типа лазеров и их мощности. Поэтому исследования этих вопросов остаются постоянно актуальными пока продолжается совершенствование индустриальных лазеров и увеличивается их мощность. Основной причиной аберраций в таких лазерах является тепловыделение, которое приводит к термодеформациям оптических элементов (зеркал), а в активных средах создаёт тепловые оптические неоднородности. При этом большую роль играют величины коэффициентов поглощения отражающих зеркал и объёмного поглощения прозрачного оптического материала (в основном ZnSe) выходного зеркала и выходного окна.
Основной целью исследования источников аберраций волнового фронта является ослабление их влияния на качество лазерного излучения, что достигается повышением эффективности работы систем термостабилизации и использованием оптических элементов с высокими параметрами, которые позволяют получать современные оптические технологии нанесения отражающих покрытий и производства прозрачных материалов на длине волны излучения CO_2 лазеров.
Однако в практически важных случаях , особенно при высоких мощностях уровень аберраций волнового фронта может превышать допустимые пределы. В таких, довольно типичных для мощных индустриальных лазеров, случаях параметры оптической системы формирования излучения выбираются с учётом источников аберраций таким образом, чтобы полностью или частично скомпенсировать их действие. Как характерные примеры, следует отметить образование термического оптического клина в активной среде мощных CO_2 лазеров с поперечной прокачкой газа или возникновение термической рассеивающей линзы в мощных (около 1 кВт) диффузионных CO_2 лазерах с

открытым устойчивым резонатором, а также образование самонаведённой фокусирующей термической линзы в выходном полупрозрачном зеркале устойчивого резонатора и выходном окне индустриальных CO_2 лазерах с мощностью свыше 1 кВт.
Такие аберрации приводят, в основном, к изменению сферичности волнового фронта выходного лазерного излучения, что в свою очередь ведёт к изменению заглубления фокальной плоскости в зоне технологического воздействия. Таким образом, нелинейные, (зависящие от интенсивности излучения аберрации), непосредственно оказывают влияние на один из технологических параметров и тем самым, от них зависит эффективность самой технологической операции.

В отдельных случаях как источник случайных мелкомасштабных аберраций волнового фронта проявляет себя турбулентность потока лазерной смеси. Это может иметь место в CO_2 лазерах очень высокой мощности (свыше нескольких десятков кВт) и при повышенном давлении рабочей смеси.

В исследованиях, выполненных в ИПЛИТ РАН, основное внимание уделялось изучению нелинейных тепловых источников аберраций волнового фронта и моделированию создаваемых ими искажений волнового фронта.

В результате впервые теоретически были получены и экспериментально измерены параметры нелинейного оптического клина, возникающего вследствие эффекта светоиндуцированного тепловыделения в активной среде непрерывного CO_2 лазера с поперечной прокачкой газа. Эксперименты проводились на индустриальных лазерах типа ТЛ-1,5 и ТЛ-5 , разработанных в ИПЛИТ РАН. На рис.1 показано измеренные угловые смещения лазерного пучка, вызываемые тепловым оптическим клином, а на рис.2 представлен вычисленный график измерения

температуры вдоль газового потока в зоне лазерного излучения.

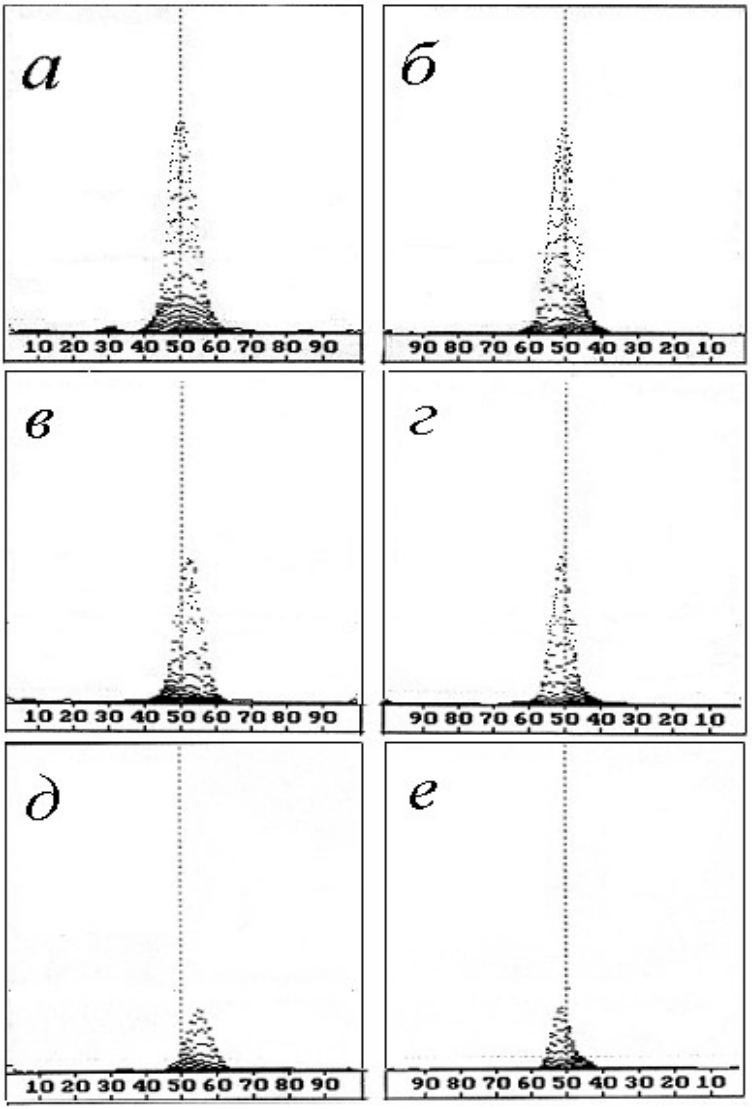


Рис. 1. Профили распределения интенсивности выходного пучка в фокальной плоскости линзы, наблюдаемые на экране приёмника «МАС-1»

$a, б$ - $Ip = 15A$; $в, г$ - $Ip = 9A$; $д, е$ - $Ip = 6A$; $а, в, д$ - профили в направлении потока; $б, г, е$ - профили поперёк потока. Цифры по горизонтали – величина смещения пучка (одно деление – 0,02 мм.).

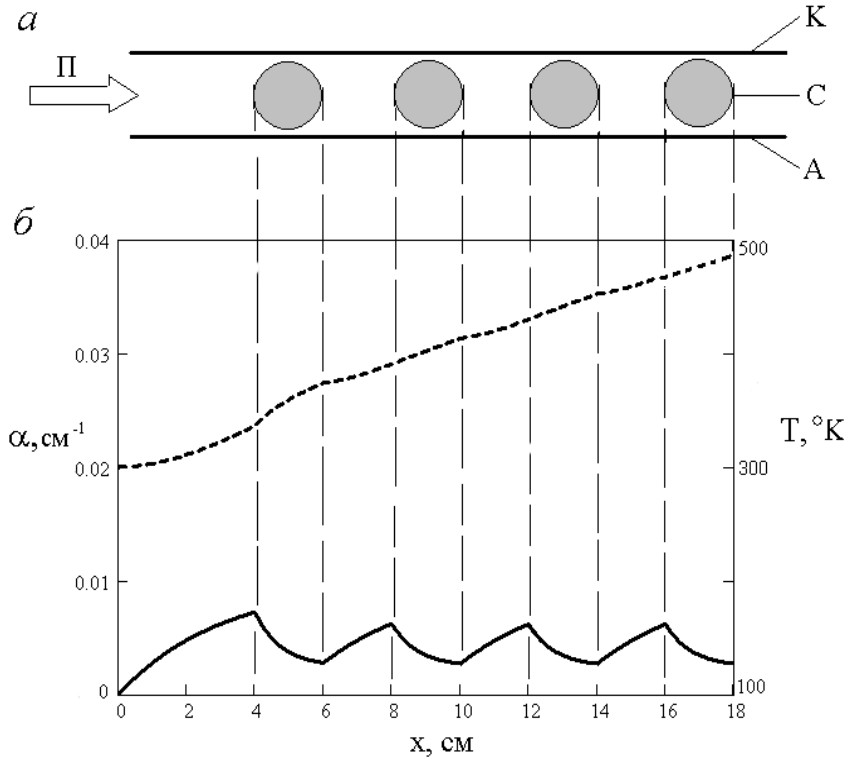


Рис. 2. Расположение лазерных пучков (*а*) и ход изменения температуры Т (пунктир) и насыщенного коэффициента усиления α (непрерывная линия) (*б*) в активной зоне резонатора. П – поток рабочей смеси, А – анод, К – катод, С – эффективное сечение пучка.

Теоретически и экспериментально было показано, что тепловой газовый оптический клин в активной среде непрерывного CO_2 лазера вызывает не только угловое отклонение лазерного пучка, но и способен увеличивать потери излучения на пространственных селекторах (диафрагмах), что в свою очередь ведёт к снижению мощности генерируемого пучка. В итоге была проведена оптимизация параметров индустриальных CO_2 лазеров серии ТЛ-1,5, ТЛ-2,5, ТЛ-5, позволившая минимизировать влияние термического оптического клина в активных средах этих лазеров на выходные параметры лазерного пучка.

Разработана теоретическая модель нелинейной рефракции гауссова пучка в выходном зеркале одномодового устойчивого резонатора и в выходном окне непрерывных CO_2 лазерах.

Полученная модель позволяет определить фокусное расстояние самонаведённой фокусирующей термической линзы и описывает его зависимость от мощности и ширины лазерного пучка, а также от коэффициента поглощения излучения на длине волны $\lambda = 10,6 мкм$ отражающего покрытия полупрозрачного зеркала резонатора и материалов зеркала и выходного окна. На базе этих данных уточнены требования к оптическим параметрам полупрозрачных зеркал и выходных окон с учётом технических возможностей современных систем термостабилизации этих оптических элементов. В итоге осуществлена оптимизация внешнего оптического тракта с учётом самонаведённой сферичности волнового фронта для заданного уровня мощности лазерного пучка, что позволяет существенно повысить эффективность технологических операций. При этом полученные

теоретические результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными измерениями, проведёнными на мощных индустриальных CO_2 лазерах, разработанных в ИПЛИТ РАН (ТЛ-3)

Определён аналитический метод вычисления оптической силы термической рассеивающей линзы в газоразрядной трубке мощного (около 1 кВт) диффузионного CO_2 лазера с открытым устойчивым резонатором, что позволило существенно упростить выбор параметров резонатора и их согласование с оптическими неоднородностями активной среды, которые в данном случае являются составными элементами резонатора. Полученная модель позволяет оптимизировать и, тем самым, повысить мощность гауссова пучка в условиях, когда селектирующие потери зависят от мощности излучения и концентрации компонент рабочей смеси (CO_2, N_2, He) вследствие зависимости от этих параметров фокусного расстояния (($Fм$ 40 для одной газоразрядной трубки) самообразующейся термической газовой линзы.

В теоретических работах ИПЛИТ РАН получили дальнейшее развитие методы численного и аналитического моделирования термодеформации отражающих, полупрозрачных зеркал и прозрачных окон. На основе этих моделей определены необходимые параметры оптических элементов и требования к системе термостабилизации, при выполнении которых термодеформации указанных оптических элементов непрерывных CO_2 лазеров находятся в допустимых пределах при заданной мощности и поперечных размерах лазерного пучка.

Рассмотрены и проанализированы предельные параметры качества излучения мощных твёрдотельных дисковых и волоконных лазеров. Показано, что в мощных дисковых лазерах качество излучения по параметру M^2 ограничивается термодеформациями активного элемента, возникающихе из-за продольной неоднородности температуры и вызывающих его изгиб.
Отмечено, что в мощных волоконных лазерах (свыше 1 кВт) предельное значение параметра качества M^2 определяется многоканальностью излучения, которое имеет место вследствии ограниченности мощности одномодового излучателя, из-за возникающих нелинейных эффектов, понижающих КПД генерации (вынужденное рамановское рассеяние и двухфотонное поглощение).

В ИПЛИТ РАН были проведены исследования структуры турбулентности газового потока лазерной смеси с учётом пространственной неоднородности температуры, тепловыделения в разряде и светоиндуцированного (нелинейного) тепловыделения. Показано, что неоднородность температуры вызывает изобарические турбулентные флуктуации плотности газа, которые могут превышать адиабатические. В свою очередь, внутреннее тепловыделение может оказывать влияние на величину изобарических флуктуаций плотности и влиять на структуру турбулентности, т.е. на вид зависимости между величиной флуктуаций плотности и их пространственным масштабом. Полученные результаты имеют непосредственное отношение к мелкомасштабным случайным оптическим неоднородностям активной среды CO_2 лазеров с прокачкой газа. Они имеют особое значение для режимов работы этих лазеров на предельных энерговкладах, близких к границам устойчивости разряда, и для CO_2 лазеров очень высокой мощности (свыше нескольких десятков кВт), когда турбулентность начинает

проявлять себя как фактор, влияющий на оптическую однородность активной среды, вызывая случайные мелкомасштабные аберрации волнового фронта.

СОГЛАСОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ МОЩНЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ CO_2 ЛАЗЕРОВ.

Для достижения высокого качества излучения при сохранении КПД лазера и его мощности необходимо обеспечивать близкий к единице коэффициент заполнения одномодовым пучком пространственной области активной среды. С этой целью, в зависимости от типа индустриальных лазеров и их мощности используются разные оптические резонаторы: устойчивые, волноводные, неустойчивые, устойчиво-неустойчивые и самофильтрующие неустойчивые.

При достигнутых предельных удельных энерговкладах в разрядах различных типов для повышения мощности лазеров обычно увеличивают объём активной области и , прежде всего, её длину. В этих условиях задача пространственного согласования одномодового оптического резонатора и ГРК усложняется значительно.

С целью повышения качества излучения разрабатываемых в ИПЛИТ РАН мощных индустриальных лазеров был выполнен цикл экспериментальных и теоретических работ, направленных на развитие оптических систем формирования лазерного излучения.

Для повышения качества излучения индустриальных CO_2 лазеров с поперечной прокачкой и мощностью 5 кВт (ТЛ-5) был применён устойчиво-неучтойчивый резонатор. При этом плоскость устойчивого резонатора выбрана параллельной газовому потоку, а перпендикулярно ему и плоскости электродов находится плоскость телескопического резонатора. Такой вариант использования устойчиво-неустойчивого резонатора

обеспечивает высокий КПД заполнения активной области одномодовым излучением при эффективном энергосъёме. Кроме того, в этом резонаторе удаётся избежать кольцевой структуры пучка, свойственной обычному телескопическому резонатору, и выходной пучок имеет сечение прямоугольной формы.

На основе современных достижений в оптической технологии нанесения отражающих покрытий был разработан и экспериментально исследован на индустриальном CO_2 лазере ТЛ-3 телескопический резонатор с полупрозрачным выходным зеркалом, которое имеет переменный по радиальной координате коэффициент отражения. Таким способом удаётся существенно ослабить влияние на распределение интенсивности излучения в фокальной области кольцевой структуры выходного пучка. Благодаря этому повышается качество выходного излучения.

На уровне килловаттной мощности индустриального CO_2 лазера ТЛ-1,5 реализован и исследован способ улучшения качества формируемого в устойчивом резонаторе лазерного пучка и его согласования с профилем усиления активной среды, основанной на селективном возбуждении в резонаторе определённой моды высокого порядка и последующего преобразования её поля с помощью специального корректора в пучок с синфазными световыми колебаниями. На рис. 3 показана схема оптического резонатора и конфигурации селектирующих масок. В результате достигнуто трёхкратное уменьшение угловой расходимости по сравнению с расходимостью многомодового пучка.

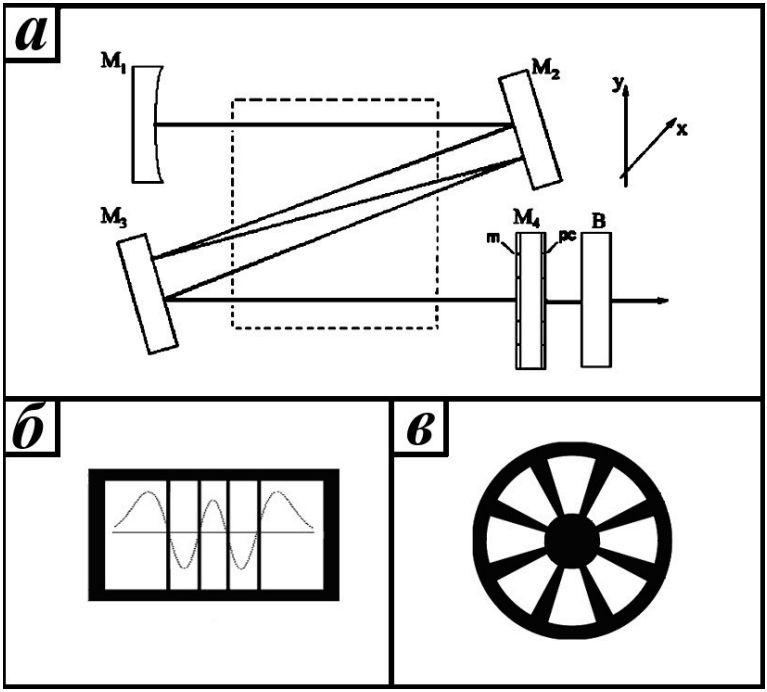
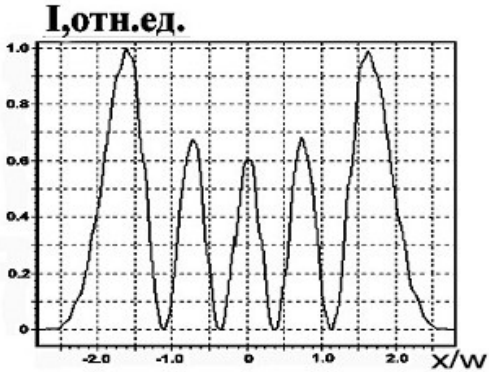
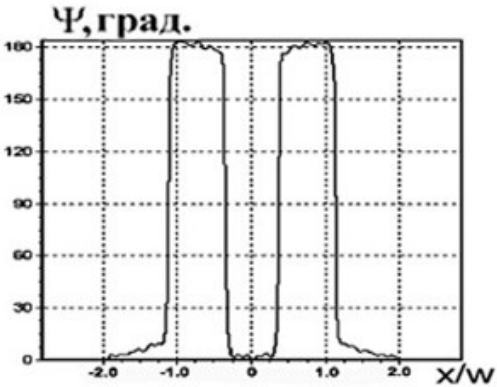


Рис. 3. Схема оптического резонатора (*а*) и конфигурации селектирующих масок (*б, в*). M_1 – “глухое” сферическое зеркало; M_2, M_3 – поворотные зеркала; M_4 – выходное плоское зеркало; m – маска; pc – фазовый компенсатор; B - выходное зеркало; пунктир на рис. *а* – активная среда; пунктир на рис. *б* – амплитуда селектируемой моды.

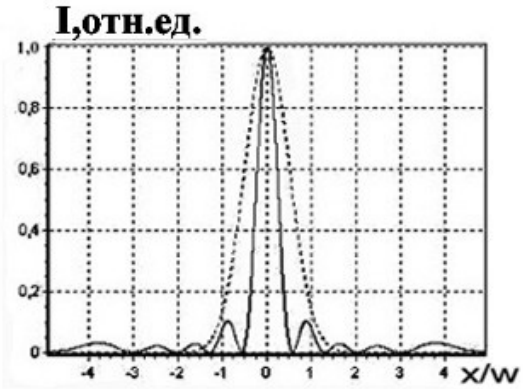
На рис.4 представлены расчётные распределения интенсивности и фазы в ближней и дальней зонах, а на рис. 5 показана измеренная структура излучения лазера с фазовым корректором.



а)

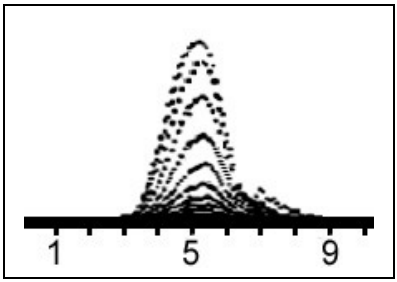


б)

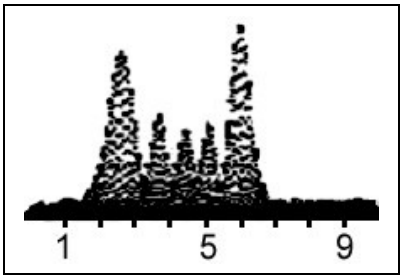


в)

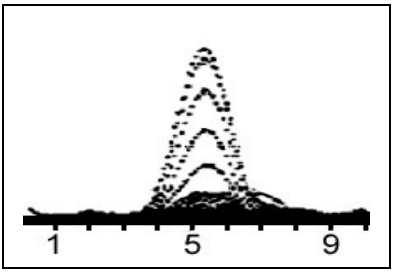
Рис. 4. Распределения интенсивности *I* (*а,в*) и фазы Ψ (*б*). *а,б* – вблизи выходного зеркала, *в* – в дальней зоне, пунктир – излучение на основной моде, w – радиус пучка основной моды в соответствующей плоскости.



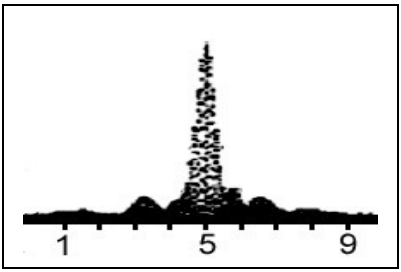
а



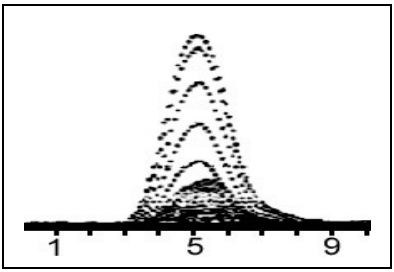
б



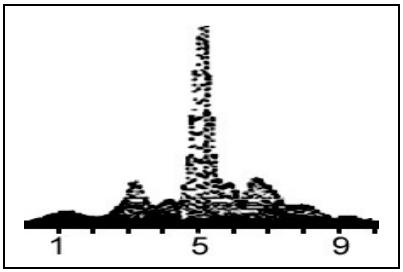
в



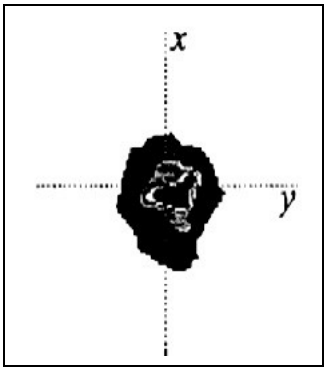
г



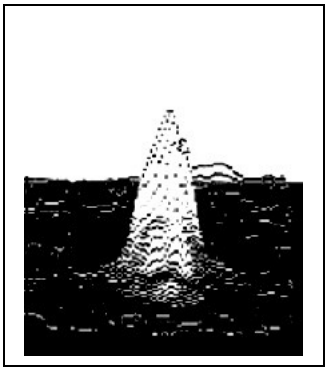
д



е



ж



з

Рис. 5. Структура излучения лазера с фазовым корректором. *а-е* – при селекции эрмито-гауссовой моды TEM_{40}; *ж,з* – при селекции лагерро-гауссовой моды TEM'_{04}. (плоскостное и объемное представления), *а,в,д* – профили интенсивности вдоль оси *у, б,г,е* – профили интенсивности вдоль оси *х, а,б* - профили пучка вблизи выходного зеркала; *в-з* – профили пучка в фокальной плоскости линзы; выходная мощность равна 700 Вт (*а-г*), 1000 Вт (*д,е*), 800 Вт (*ж,з*). Цена деления по горизонтальной оси на рис. *а-е* составляет $2 \cdot 10^{-4}$ рад.

Из анализа физической природы внутрирезонаторных аберраций, негативно влияющих на качество пучка, получено, что наиболее значительным оказывается влияние аберраций типа оптического клина, возникающего из-за использования поперечной прокачки среды и поперечного разряда.

Используя математическое модулирование в дифракционном приближении процесса формирования излучения в самофильтрующем неустойчивом резонаторе, показано, что в таком резонаторе аберрации в виде оптического клина кроме углового отклонения пучка вызывают дополнительные потери на селектирующем

отверстии, что, в свою очередь, ведёт к снижению КПД генерации. Для ослабления последствий негативного влияния оптических неоднородностей активной среды требуется повышение усиления лазерного излучения по сравнению со случаем обычного телескопического резонатора с тем же коэффициентом увеличения.

Одним из наиболее характерных достижений применения принципа пространственного согласования оптической и газоразрядной систем представляет разработка устойчивых 3Д резонаторов для мощных индустриальных лазеров с поперечной прокачкой газа типа ТЛ-1,5, ТЛ-2,5, ТЛ-3, ТЛ-5. В традиционной , сложившийся за многие годы оптической схеме этих лазеров генерируемый пучок многократно (3-5 раз) пересекает поток активной среды. При этом оптическая ось пучка находится в одной плоскости (2Д резонатор). Использование новой схемы, в которой направление распространения гауссова пучка меняется уже в трёх координатах, позволяет в полной мере осуществлять энергосъём в условиях значительной пространственной неоднородности разряда. В результате достигнута практически одномодовая генерация в лазерах указанного типа с мощностью излучения, очень близкой к той, которую они генерируют в многомодовом режиме.

В ИПЛИТ РАН были выполнены теоретические и экспериментальные работы по определению турбулентной диффузии в потоке активной среды индустриального лазера с быстрой аксиальной прокачкой и разрядом постоянного тока. Предложен и реализован новый метод измерения коэффициента турбулентной диффузии, основанный на внутрирезонаторном четырёхволновом смешении в потоке собственной активной среды, нелинейность которой обусловлена насыщением усиления. Измеряемым параметром в этом методе является коэффициент отражения сигнального

излучения, величина которого зависит известным образом от диссипации светоиндуцированных дифракционных решёток коэффициента усиления.

В указанных лазерах от величины коэффициента турбулентной диффузии существенно зависит поперечной размер области разряда постоянного тока, поэтому, данные о ней имеют большое значение для согласования оптической и газодинамических систем мощных индустриальных CO_2 лазеров с быстрой аксиальной прокачкой и разрядом постоянного тока.

КАЧЕСТВО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ CO_2 ЛАЗЕРОВ.

Диффузионные волноводные CO_2 лазеры нашли широкое применение для технологической обработки материалов и в медицине. Поэтому их развитию и совершенствованию наряду с другими типами индустриальных лазеров уделяется постоянно большое внимание в ИПЛИТ РАН.

В зависимости от оптической схемы соединения газоразрядных трубок – параллельной или последовательной получают многолучевую(многоканальную) или однолучевую (одноканальную) генерацию. В многоканальных волноводных решётках с числом трубок до 85 получены средние мощности излучения до 6 кВт, а в однолучевом варианте до 1,4 кВт. При этом удельные мощности излучения достигают 50Вт/м.

Разработанные в ИПЛИТ РАН мощные однолучевые волноводные CO_2 лазеры впервые в России стали применяться для операций на сердце при лечении ишемической болезни по новому методу – трансмиокардиальной лазерной реваскуляризации миокарда.

Эти лазеры также используются для газолазерной резки листовых металлических материалов. При средней

мощности излучения 1 кВт. Они не уступают по скорости и качеству резки CO_2 лазерам с прокачкой газа (конвективным охлаждением) средней мощности 1,5 кВт., потому что параметры пучка волноводных лазеров обеспечивают большую глубину фокусировки.

Одной из важных проблем, возникающих при создании мощных индустриальных волноводных CO_2 лазеров, генерирующих однолучевое излучение, является обеспечение одномодовой генерации в условиях длинных (десятки метров) резонаторов и протяжённой длины усиления с высоким общим усилением. Последовательный проход лазерного пучка через большое число параллельно расположенных в сборке газоразрядных трубок обеспечивается специально разработанными системами поворотных зеркал, являющимися важными оптическими элементами резонатора таких лазеров. На рис .6 показана одна из таких систем поворотных зеркал. При этом очень высокие требования предъявляются к термостабилизации элементов конструкции оптического резонатора, включая газоразрядные трубки.

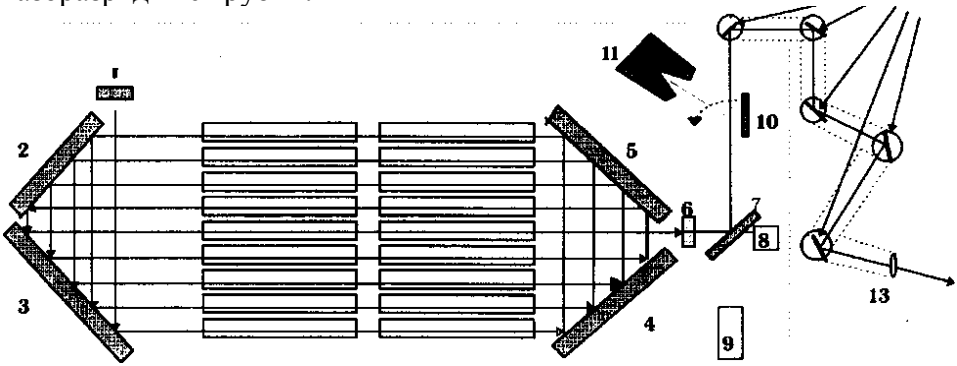


Рис.6 Оптическая схема мощного однолучевого диффузионного лазера

с внешними поворотными зеркалами.

1. – заднее глухое зеркало резонатора. 2 ,3,4,5 – отражающие поворотные зеркала резонатора,
6 - полупрозрачное выходное зеркало резонатора, 7 – поворотное зеркало выходного блока, 8 – измеритель мощности, 9 – юстировочный лазер, 10 – зеркало

э/механического затвора, 11 – конус полного поглощения, 13 – фокусирующая линза

Что касается проблемы достижения высокого качества излучения многолучевых волноводных CO_2 лазеров, то она в основном обусловлена трудностями сфазирования излучений отдельных каналов (трубок).

В результате проведения теоретических и экспериментальных работ по решению проблемы повышения качества излучения однолучевых волноводных лазеров в ИПЛИТ РАН были выработаны требования к материалу и геометрическим параметрам газоразрядных трубок и их пространственному расположению внутри резонатора, а также определена необходимая точность юстировки оптических элементов в резонаторе. Были найдены эффективные оптические схемы, обеспечивающие однолучевую генерацию, в сборке большого числа (до 30 шт.) параллельно расположенных газоразрядных трубок.

Полученные научно-технические решения позволяют минимизировать потери излучения внутри волновода и на открытых участках резонатора и, в то же время , обеспечивают необходимую пространственную селекцию одной основной моды. На рис. 7 показано, измеренное распределение интенсивности излучения в дальней зоне однолучевого волноводного лазера со средней мощностью 1200 Вт, разработанного в ИПЛИТ РАН (модель ТЛ-1200).

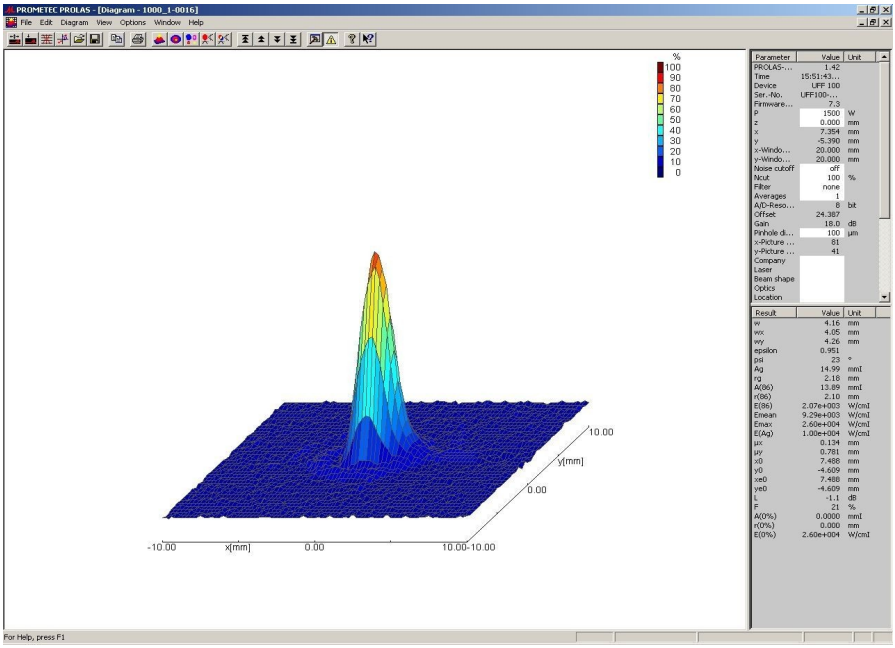


Рис7. Распределение плотности мощности излучения (модель ТЛ-1200)
Расходимость по уровню мощности 0.86 = 1.57 мрад
Расходимость по уровню мощности 0.9 = 1.67 мрад
P = 1250 Вт по уроню более 17%, P= 1380 Вт по уровню более 4%

В ИПЛИТ РАН был проведён большой объём экспериментальных и теоретических исследований методов сфазирования излучения многолучевого диффузионного CO_2 лазера. При этом основное внимание уделялось методу селекции с помощью пространственного фильтра, который располагался в фокальной плоскости и обеспечивал полное пропускание сфазированного излучения и существенно понижал добротность резонатора

для несфазированного светового поля. Показано, что возможности сфазирования зависят от числа излучающих каналов и снижаются с увеличением их количества, потому с ростом числа пучков ужесточаются требования к минимизации разности фазовых набегов в излучателях.

Поэтому в настоящее время рассматриваются и исследуются альтернативные сфазированию методы повышения качества излучения многолучевых диффузионных CO_2 лазеров высокой мощности.