

Шулятьев Виктор Борисович

**САМОФИЛЬТРУЮЩИЙ НЕУСТОЙЧИВЫЙ РЕЗОНАТОР
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ CO₂-ЛАЗЕРАХ**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики
Сибирского отделения Российской академии наук

Научные руководители:

доктор технических наук

Иванченко Анатолий Иванович

доктор физико-математических наук, профессор
Оришич Анатолий Митрофанович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Насыров Камиль Ахметович

кандидат физико-математических наук
Каралузиков Александр Иванович

Ведущая организация

Институт проблем механики РАН

Защита состоится «__» _____ 2005 г. в ____ час. ____ мин. на заседании
диссертационного совета К 003.005.01 в Институте автоматизации и электрометрии СО РАН
по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и электрометрии
СО РАН

Автореферат разослан «__» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



Косых В.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Лазерные технологии обработки материалов широко применяются во многих отраслях промышленности и продолжают развиваться. Воздействие лазерного луча на материал основано на его быстром локальном нагреве. Основными параметрами технологического лазера являются мощность и качество излучения, так как именно они определяют условия нагрева материала и эффективность применения лазеров для тех или иных видов обработки. Повышение мощности при сохранении высокого качества излучения стало основным направлением совершенствования технологических лазеров с начала их практического применения. Большинство среди технологических лазеров составляют в настоящее время CO_2 -лазеры, позволяющие генерировать высокую мощность излучения. Мощность лазера может быть повышена либо путем повышения плотности накачки, либо путем увеличения объема активной среды. В первых поколениях технологических CO_2 -лазеров использовался традиционный устойчивый резонатор. Присущее устойчивому резонатору ограничение хорошо известно [4] – для дискриминации высших мод по потерям и поддержания генерации только на TEM_{00} моде число Френеля N резонатора не должно превышать величины, приблизительно равной 1. Это ограничивает объем V моды и мощность излучения, поскольку $V \sim N\lambda L^2$, а длина L резонатора ограничена.

В связи с вышесказанным в 80 – 90 гг. XX века активно исследовались оптические резонаторы, способные генерировать излучение высокого качества при больших, чем устойчивый резонатор, числах Френеля. Значительная часть из них основана на применении неустойчивых резонаторов с неоднородным полупрозрачным зеркалом. Зеркала с гауссовым или супергауссовым профилем коэффициента отражения имеют на прозрачной подложке диэлектрическое покрытие с толщиной, уменьшающейся от центра к краю зеркала [1-3]. Об экспериментах по применению таких зеркал в технологических CO_2 -лазерах сообщалось в [4-6]. Известно зеркало с неоднородным отражением, представляющее собой интерферометр Фабри – Перо с изменяющимся по радиусу зазором [7]. В резонаторах непрерывных CO_2 -лазеров мощностью более 1 кВт применялось зеркало, в котором коэффициент отражения меняется ступенчато – отражение имеет постоянную величину в центральной части и просветленную кольцевую область [8]. В [8] подбором толщин покрытия и подложки обеспечивалось выравнивание фазы в выходном пучке.

В [9] сообщается об использовании в мощном CO_2 -лазере устойчивого резонатора с неоднородным полупрозрачным зеркалом – выходное зеркало имеет заданный коэффициент отражения в центральной части, а остальная часть зеркала просветлена. В лазере с таким резонатором достигнута мощность излучения 6,2 кВт, однако в эксперименте наблюдалось ухудшение качества пучка при мощности излучения более 2 кВт, что авторы связывают с искажением в выходном зеркале.

В [10] в условиях непрерывного CO_2 -лазера мощностью около 1 кВт исследовался неустойчивый резонатор с однородным полупрозрачным зеркалом, что позволило повысить качество пучка по сравнению с неустойчивым резонатором с полностью отражающими зеркалами. Для уменьшения вредных дифракционных потерь резонатор

имел увеличение, близкое к единице. Резонатор с малым увеличением имеет, как известно [11], высокую чувствительность к абберациям, кроме того, остается возможность искажений пучка в полупрозрачном зеркале.

В настоящее время в промышленных технологических CO₂-лазерах применяется резонатор с неосевым выводом излучения из полностью отражающих зеркал, устойчивый по одной поперечной координате и неустойчивый по другой, так называемый устойчиво-неустойчивый резонатор [12, 13]. Устойчиво-неустойчивый резонатор применен в «слэб»-лазерах с диффузионным охлаждением активной среды фирмы Rofin-Sinar, лазеры генерируют мощность до 6 кВт при величине параметра качества 0,9. Устойчиво-неустойчивый резонатор применен также в CO₂-лазере с конвективным охлаждением активной среды и с поперечным потоком газа, где достигнута мощность излучения 6 кВт [12]. Однако эта схема также имеет свои ограничения. Резонатор плохо согласуется с активной средой, имеющей осевую симметрию. Выходной пучок имеет в поперечном сечении форму прямоугольника, что не всегда приемлемо без дополнительных преобразований пучка. В резонаторе применяются цилиндрические зеркала, более сложные в изготовлении и дорогостоящие по сравнению со сферическими. В слэб-лазерах для обеспечения симметрии пучка применяется внрезонаторная пространственная фильтрация. При фильтрации теряется мощность излучения. Кроме того, надежная техническая реализация пространственной фильтрации на высокой мощности является сложной задачей и при мощности ~ 10 кВт, как минимум, значительно усложнит лазерную установку. Достоинством устойчиво-неустойчивого резонатора является отсутствие проходных оптических элементов. В то же время из-за перечисленных особенностей применение устойчиво-неустойчивого резонатора нельзя считать универсальным решением генерации излучения с высоким качеством в мощных лазерах.

В настоящее время в большинстве технологических лазеров по-прежнему используется устойчивый резонатор. Совершенствование систем накачки позволило повысить мощность излучения проточных лазеров с устойчивым резонатором при генерации на низких поперечных модах, но к настоящему времени эта возможность практически исчерпана.

Цель работы – разработать оптический резонатор технологического CO₂-лазера для генерации излучения с высоким качеством при уровне мощности 5 кВт и более.

Требование к резонатору мощного технологического лазера можно сформулировать следующим образом:

- высокое качество пучка при числе Френеля, значительно превышающем 1;
- высокая эффективность преобразования энергии;
- простота конструкции;
- высокая лучевая стойкость оптических элементов;
- низкая чувствительность к абберациям.

В качестве объекта исследования выбран самофильтрующий резонатор (СФР) [3], предложенный авторами P.G. Gobbi и G. C. Reali в 1984 году. Резонатор отличается простотой конструкции, в нем отсутствуют проходные оптические элементы. К началу работы были опубликованы результаты экспериментов с самофильтрующим резонатором в импульсных Nd:YAG, XeCl и CO₂-лазерах. Сообщалось о высокой стабильности

характеристик излучения. Была продемонстрирована возможность генерации пучка с высоким качеством и большой по сравнению с устойчивым резонатором мощностью в лазерах со значительным усилением активной среды. В лазерах с умеренным усилением, к которым принадлежат непрерывные CO_2 -лазеры, СФР не применялся. Имевшихся теоретических и экспериментальных результатов было недостаточно для обоснованного вывода о возможности эффективного использования СФР в мощных непрерывных CO_2 -лазерах. Отсутствовали необходимые данные для оптимального выбора параметров при разработках. В выходном пучке СФР распределение поля низшей моды близко к гауссову за исключением приосевой области, которая не заполнена излучением. По этой причине распределение интенсивности в дальней зоне имеет характерную дифракционную структуру, детали которой определяются параметрами резонатора. Возможность использования такого пучка для обработки материалов, в частности для резки, также была неизвестна.

Задачи работы формулируются следующим образом.

- Исследование возможности использования в непрерывном CO_2 -лазере самофильтрующего резонатора для повышения мощности излучения по отношению к устойчивому резонатору при сохранении качества пучка на уровне TEM_{00} моды.
- Определение оптимальной области рабочих параметров СФР в условиях мощного CO_2 -лазера
- Экспериментальное определение характеристик излучения CO_2 -лазеров с СФР. Оценка диапазона мощности излучения, в котором СФР может эффективно использоваться.
- Исследование характеристик реза металлических листов излучением CO_2 -лазера с СФР.

Научная новизна.

1. Впервые в технологическом CO_2 -лазере применен самофильтрующий резонатор для повышения качества пучка. Разработана конструкция и определена область рабочих параметров резонатора в условиях непрерывного CO_2 -лазера мощностью 1...8 кВт при качестве пучка, близком к TEM_{00} моде.

2. Экспериментально определены энергетические характеристики и качество излучения технологических CO_2 -лазеров с СФР. На основе полученных удельных характеристик сделаны оценки мощности, которая может быть достигнута в проточных электроразрядных лазерах с СФР.

3. Определена перспективность применения CO_2 -лазера с самофильтрующим резонатором в технологиях обработки материалов на примере лазерной резки. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность качественной резки стальных листов толщиной до 20 мм излучением лазера с СФР.

Практическая ценность работы

Результаты позволяют создавать мощные CO_2 -лазеры с высоким качеством излучения на основе простых по конструкции резонаторов из полностью отражающих зеркал. Результаты использованы при создании в ИТПМ СО РАН технологических CO_2 -лазеров мощностью от 1,5 до 8 кВт и на их основе автоматизированных комплексов для резки листовых материалов. Комплекс на основе лазера мощностью 1,5 кВт для резки электротехнической стали установлен в НПО «ОЛСИБ» в 2001 году. В 2002 году в ОАО

«Новосибирский завод химконцентратов» установлен комплекс мощностью 5 кВт для вырезки деталей из коррозионно-стойких сталей для атомной промышленности. На комплексе производится также резка углеродистых и низколегированных сталей, диэлектриков, композиционных материалов. Комплекс на основе лазера мощностью до 8 кВт создан для «ОКБ лазерной техники» при СО РАН. На комплексе ведутся исследования и разработки по лазерной технологии, в частности, произведена резка титановых пластин толщиной 30 мм. На предприятии «СибЛазер» CO₂-лазеры мощностью 1...3 кВт с СФР входят в состав комплексов, использующихся для резки широкого круга металлических и неметаллических материалов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной конференции «Применение лазеров в народном хозяйстве», Шатура, 1989 г.; Российской национальной конференции «Технологические лазеры и лазерная обработка материалов», Шатура, 1993 г.; VII Международной конференции «Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения», Владимир, 2001 г.; XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference, Florence, Italy, 2000; XI International Conference on Laser Optics, St-Petersburg, 30 June-4 July, 2003; XV International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference, Prague, 30 August – 3 September 2004; XII International Conference on the Method of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia, 23 June-3 July 2004; на 5 Международной конференции «Лазерные технологии и средства их реализации», Санкт-Петербург, 2003; V Международном семинаре «Применение лазеров в науке и технике», Новосибирск, 1992; Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов ИППМ, Новосибирск, 1988.

Личный вклад автора в получение представленных в работе результатов является определяющим, включая выбор способа достижения сформулированной в работе цели, планирование и проведение расчетов и экспериментов или непосредственное в них участие, разработку принципиальных технических решений конструкций резонаторов. Автор принимал непосредственное участие в создании экспериментальных установок и в формулировке целей и задач работы.

Защищаемые положения

1. Самофильтрующий неустойчивый резонатор позволяет генерировать в непрерывном электроразрядном CO₂-лазере мощностью 1...8 кВт излучение, близкое по качеству к ТЕМ₀₀ моде устойчивого резонатора при эффективности преобразования энергии на уровне неустойчивого телескопического резонатора.

2. СФР может обеспечивать в непрерывном электроразрядном проточном CO₂-лазере мощность излучения с единицы длины резонатора приблизительно в три раза большую, чем устойчивый резонатор при генерации на ТЕМ₀₀ моде и при близких параметрах системы возбуждения.

3. CO₂-лазер с самофильтрующим резонатором позволяет производить резку сталей с основными показателями качества реза и с удельными энергозатратами не хуже, чем лазер с устойчивым резонатором при генерации на низших модах.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 150 наименований. Полный объем диссертации 91 страница, включая 45 рисунков и 8 таблиц.

Содержание работы

Во введении дан краткий обзор и анализ методов генерации излучения с высоким качеством в технологических лазерах, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, приведены данные о практическом использовании результатов работы, сформулированы защищаемые положения.

Глава 1 посвящена численному исследованию самофильтрующего резонатора.

СФР (рис. 1) представляет собой конфокальный резонатор из двух софокусных сферических зеркал, в общей фокальной плоскости которых расположено кольцевое выводное зеркало с отверстием связи радиусом a , $a = (0,61\lambda f_2)^{1/2}$. Активная среда расположена между выводным зеркалом и зеркалом с фокусным расстоянием f_1 .

Расчет распределения интенсивности в пучке СФР проводился на основе дифракционного интеграла Френеля Кирхгофа. Дифракционный интеграл, записанный через элементы лучевой матрицы для случая осевой симметрии, выглядит следующим образом:

$$u_2(r_2) = \frac{2\pi \exp(ikL)}{i\lambda B} \int_0^{a_1} u_1(r_1) \exp[i\pi(Ar_1^2 + Dr_2^2)/\lambda B]^* J_0(kr_1r_2/B) r_1 dr_1,$$

здесь $u_1(r_1)$, $u_2(r_2)$ – радиальные распределения комплексной амплитуды поля в опорных плоскостях 1 и 2, L – расстояние между опорными плоскостями, a_1 – апертура источника в плоскости 1, J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $k = 2\pi/\lambda$, A , B , D – элементы лучевой матрицы промежутка 1-2. Расчеты проводились двумя методами – итерационным методом Фокса и Ли, а также методом [18], при котором интегральное уравнение резонатора сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

Расчеты выполнялись для нижней моды пустого резонатора со сферическими зеркалами. Вследствие дифракции на отверстии связи распределение в дальней зоне представляет собой характерную структуру с центральным пятном и боковыми кольцами. Качество пучка возрастает с ростом увеличения резонатора M , $M = f_1/f_2$, поскольку уменьшается интенсивность побочных максимумов и доля энергии за пределами центрального пятна. При $M > 4$ выходной пучок СФР приближается по качеству к гауссову, рассчитанный для пустого резонатора параметр К имеет величину 0,9 и более, К – параметр качества излучения, $K = 4\lambda/\pi\theta D$, где θ , D – расходимость излучения в дальней зоне и диаметр пучка в ближней зоне, соответственно.

На рис. 2 показана доля мощности ϵ_0 в центральном пятне в дальней зоне и интенсивность I_{m1} первого побочного максимума в зависимости от увеличения резонатора M . При $M = 4$ в центральном пятне содержится 90% всей мощности пучка, а I_{m1} имеет величину менее 0,007. Для сравнения отметим, что источнику с круглой апертурой и однородным распределением амплитуды и фазы соответствуют ϵ_0 и I_{m1} , равные 84% и 0,

0175 На рис 3 показаны рассчитанные распределения интенсивности излучения в выходном пучке (в плоскости выводной зеркала) и в дальней зоне при $M = 4$ и $M = 6$

Рассчитывалась также зависимость качества выходного пучка от соотношения апертуры зеркал резонатора и размера пятен на зеркалах. Установлено, что качество пучка максимально, когда радиус A апертуры зеркал равен радиусу центрального пятна радиального распределения интенсивности на выводном зеркале, это имеет место при $A = 1,5 Ma$.

В главе 2 анализируется возможность эффективного использования СФР в мощном непрерывном электрооразрядном CO_2 -лазере

Особенностью СФР является взаимозависимость величины обратной связи, модового объема при заданной длине резонатора и качества выходного пучка, поскольку все эти величины зависят от геометрического увеличения M резонатора. Причем зависимость модового объема V и качества пучка K от M является прямой, а величины обратной связи R' – обратной.

Оценка эффективности преобразования энергии в резонаторе и необходимого усиления сделана на основе известных соотношений [11], полученных для стационарного режима генерации, одноручного уширения контура усиления, равномерного распределения ненасыщенного коэффициента усиления α_0 по активному объёму и равномерного распределения интенсивности излучения генерации в поперечном сечении резонатора. Как следует из представленных в Главе 1 результатов, выходной пучок СФР приближается по качеству к гауссову при $M \approx 4$ и более. Согласно оценкам, при $M = 4..5$ и характерных для CO_2 -лазера потерях в многопроходной схеме резонатора эффективность преобразования имеет максимум при $\alpha_0 l = 10...12$. Но поскольку КПД резонатора слабо зависит от обратной связи вблизи своего максимального значения, уменьшение усиления в 2..2,5 раза приводит к уменьшению КПД всего на 10%. Усиление $\alpha_0 l \approx 4..6$ уже вполне достижимо при непрерывной накачке в многопроходной схеме. Таким образом, высокое качество пучка и высокая эффективность преобразования энергии в резонаторе достигаются в диапазоне увеличений резонатора $M \approx 4..6$. В СФР с увеличением однозначно связано число Френеля N усилительного плеча, $N = D^2 / 4\lambda l = 0,61\alpha^2 h M$, здесь $\alpha = A/Ma$, A – радиус апертуры зеркала резонатора, l – длина активной среды, $h = f_1/l$. Соответствующий $M = 4..6$ диапазон N равен 5...8, что хорошо согласуется с параметрами активных сред современных прочных CO_2 -лазеров.

Глава 3 посвящена применению СФР в технологических CO_2 -лазерах. Описана конструкция разработанных в ИТПМ СО РАН лазеров, представлены схемы резонаторов, приведены результаты измерения характеристик излучения, проведено сравнение лазеров с СФР и лазеров с устойчивым и неустойчивым телескопическим резонаторами

Созданные в ИТПМ СО РАН технологические CO_2 -лазеры непрерывного действия ЛЮК [15] существуют в нескольких модификациях. Общим для них является использование самостоятельного разряда постоянного тока для возбуждения активной среды, конструкция электрооразрядного устройства со сплошными несекционированными электродами и общая компоновочная схема лазера: направления газового потока, электрического тока и направление распространения излучения в резонаторе взаимно перпендикулярны. Различаются лазеры длиной электродной системы в поперечном к

газовому потоку направлению, количеством разрядов в общем газовом потоке (один или два), конфигурацией газодинамического контура. Электродная система включает общий для обоих разрядов анод - медную пластину шириной вдоль потока 100...140 мм, и два катода - медные трубки по обеим сторонам анода вблизи диэлектрических стенок канала. Газ прокачивается по замкнутому контуру при помощи центробежного вентилятора. Скорость газового потока на входе в разрядную камеру составляет 45...60 м/с. Непосредственно за разрядной камерой по направлению потока расположен ребристый теплообменник, использующий в качестве хладагента воду. Газовая смесь $\text{CO}_2\text{:N}_2\text{:He}$ или $\text{CO}_2\text{:воздух:He}$ имеет давление до 30 мм.рт.ст.

СФР устанавливался и исследовался на нескольких лазерах типа ЛЮК, отличающихся количеством разрядных промежутков и длиной разряда. Максимальная мощность излучения CO_2 -лазеров семейства ЛЮК с СФР получена на лазере «Сибирь 1» с двумя разрядными промежутками. Расстояние между катодом и анодом равно 55 мм в каждом разряде, длина электродной системы вдоль направления распространения излучения в резонаторе равна 110 см. Скорость газа в разрядных промежутках равна 50 м/с. Схема резонатора показана на рис. 4. В большем плече резонатора луч совершает по 3 прохода в каждом разрядном промежутке по Z-образной схеме. Увеличение резонатора равно 4,5, длина резонатора (расстояние между крайними сферическими зеркалами) – 11,2 м. Диаметр отверстия связи в выводном зеркале равен 7,3 мм, диаметр апертуры зеркал в большем плече резонатора – 49 мм и равен расчетному значению центрального пятна распределения интенсивности. Кольцевое зеркало является вогнутым и образует со стоящим за ним по ходу луча выпуклым зеркалом (на рисунке не показано) телескоп, уменьшающий диаметр луча в 1,3 раза. Максимальная мощность излучения лазера равна 8,3 кВт.

В таблице 1 дано сравнение лазера «Сибирь 1» с CO_2 -лазерами Spectra Physics 820 [15] и Toshiba Corporation [16], в которых активная среда возбуждается также самостоятельным разрядом постоянного тока.

Таблица 1.

Лазер	Резонатор	Мощность излучения, кВт	Апертура зеркал, мм	Длина резонатора, м	Удельная мощность, кВт/м
Spectra Physics 820	устойчивый TEM_{00}	1,5	–	8,05	0,19
Toshiba Corporation	неустойчивый $M = 3$	10	50	10	1,0
Сибирь 1	самофильтрующий $M = 4,5$	8	49	11,2	0,71

Самофильтрующий резонатор позволил получить мощность излучения с единицы длины резонатора примерно в 1,4 раза меньшую, чем неустойчивый телескопический резонатор, но более чем в 3 раза большую, чем устойчивый при генерации на TEM_{00} моде.

Измерения пространственных характеристик излучения выполнены на лазерах «Сибирь 1» и ЛОК-ЗМ мощностью 3,5 кВт. Лазер ЛОК-ЗМ имеет два разрядных промежутка при длине разряда 80 мм. Увеличение резонатора ЛОК-ЗМ равно 4,5, компоновочная схема резонатора аналогична схеме лазера «Сибирь 1». Для измерения расходимости излучения в дальней зоне и диаметра пятна в ближней зоне использовался метод калиброванных диафрагм. Выходной пучок фокусировался сферическим металлическим зеркалом с фокусным расстоянием 4,8 м, распределение мощности в перетяжке пучка («мощность в кружке») определялось измерением доли полной мощности, проходящей через диафрагму при различных диаметрах диафрагмы. По результатам измерений расходимость излучения Θ равна 0,68 мрад (полный угол по уровню 0,86 мощности), а диаметр D пучка в ближней зоне, измеренный методом калиброванных диафрагм, - 30 мм. Эти величины соответствуют $K = 0,66$.

Зависимость распределения интенсивности в сфокусированном пучке от мощности излучения измерена на лазере «Сибирь 1». Распределение интенсивности в перетяжке пучка, сфокусированного ZnSe линзой с фокусным расстоянием 190,5 мм, регистрировалось методом сканирования отражающим цилиндром. Фокусирующая линза входит в состав резака, который используется для лазерной резки. При помощи согласующего телескопа апертурный диаметр пучка на входе в линзу устанавливался равным 30 мм. На рис. 5 показано распределение мощности в пучке, полученное в результате сканирования перетяжки пучка в направлении, перпендикулярном оси пучка.

Измерения проводились при мощности излучения 0,5, 5,5 кВт. В этом диапазоне осевая интенсивность возрастает с ростом мощности практически линейно, и не происходит видимых изменений диаметра пучка и формы распределения. Диаметр пучка по уровню 0,86 мощности на фокусирующей линзе равен приблизительно 20 мм. Как показывают оценки, вклад сферической аберрации в размер фокального пятна пренебрежимо мал, что позволяет оценить расходимость излучения и параметр качества пучка. Оценка дает $K = 0,63$, что близко к величине 0,66 лазера ЛОК-ЗМ, резонатор которого также имеет увеличение 4,5.

На рис. 6 в координатах «мощность излучения – качество пучка» представлены промышленные технологические (CO_2 -лазеры двух ведущих мировых фирм-производителей – Trumpf и Rofin Sinar, здесь же представлен лазер «Сибирь 1» с самофильтрующим резонатором).

Как видно из рисунка, максимальная мощность лазеров с устойчивым резонатором при генерации на TEM_{00} моде ($K = 0,9$) не превышает 3,5 кВт. Такую же мощность имеют лазеры, генерирующие преимущественно на TEM_{00} моде с примесью мод высших порядков ($K = 0,6$). Мощность 6 кВт достигается при генерации на TEM_{01} моде ($K = 0,55$). Далее с ростом мощности происходит резкое ухудшение качества пучка. Максимальную мощность 6 кВт при качестве пучка на уровне TEM_{00} моды имеют так называемые «слаб»-лазеры, в которых применен устойчиво-неустойчивый резонатор. Эта схема применена также в CO_2 -лазере с поперечным потоком мощностью 6 кВт [12]. Присущие этому резонатору недостатки отмечены во Введении. Проведенный анализ показывает, что

полученная в настоящей работе мощность проточного CO_2 -лазера с СФР не является предельной. Самофильтрующий резонатор позволяет сочетать высокую мощность излучения и высокое качество пучка и представляется перспективным для использования в CO_2 -лазерах мощностью более 5 кВт.

Мощность излучения может быть повышена путем увеличения объема активной среды или увеличения плотности накачки. В работе сделаны оценки мощности, достижимой в лазере с поперечной прокачкой при использовании СФР. В таблице 2 представлены два варианта построения лазера типа «Сибирь 1» также с двумя рядами, но с повышенной длиной разряда и коэффициентом увеличения резонатора 5 вместо 4,5. Усиления активной среды при этом, как показывают оценки, достаточно для обеспечения эффективного преобразования энергии. Мощность излучения с единицы активной среды при накачке такой же, как в лазере «Сибирь 1». Возможность достижения мощности излучения 5 кВт с 1 м длины разряда в лазерах типа ЛОК продемонстрирована в [17].

Таблица 2.

Лазер	Длина разряда м	Увеличение резонатора	Длина резонатора м	Объем разряда л	Диаметр пучка мм	Мощность кВт
Сибирь 1	1,1	4,5	11,2	9,1	49	8,2
Вариант 1	1,3	5	13,2	13,6	56	12,4
Вариант 2	1,5	5	14,4	18,4	59	16,8

В главе 4 изложены результаты применения CO_2 -лазеров с СФР для резки сталей. Дано общее описание созданных на основе лазеров с СФР технологических комплексов для резки листовых материалов. Приведены скорость резки, шероховатость поверхности реза, ширина реза для листов углеродистой и легированной стали. Дано сравнение полученных результатов с известными из литературы характеристиками реза, полученными при использовании лазеров с устойчивыми резонаторами. Приведены фотографии вырезанных деталей, поверхностей реза, поперечных сечений канала реза.

Оптическая система комплекса включает лазерный резонатор, выходное окно из ZnSe , зеркальный телескоп для согласования диаметра выходного пучка лазера и входной апертуры лазерного резака, систему плоских промежуточных зеркал, фазосдвигающее зеркало для преобразования плоской поляризации излучения в круговую, фокусирующую линзу из ZnSe . Координатный технологический стол построен по схеме «летающая оптика» (лазерный резак перемещается по двум поперечным координатам относительно неподвижного листа). Соосно с лазерным пучком на материал подается через коническое сопло струя технологического газа. Для стабилизации зазора между соплом и разрезаемым листом применена система слежения на основе емкостного датчика. На рис. 7 дана фотография лазерного технологического комплекса для резки листовых материалов на основе лазера с СФР. Резонатор лазера имеет увеличение 4,5.

В таблице 3 приведены скорости резки листов углеродистой стали обыкновенного качества Ст.3 в струе кислорода в сравнении со скоростями резки малоуглеродистой стали

при использовании CO₂-лазера с устойчивым резонатором фирмы PRC. При резке лазером с СФР во всем диапазоне толщин листов использовалась линза с фокусным расстоянием 190,5 мм при диаметре пучка на линзе 30 мм (апертурный размер). Скорость резки определялась как скорость, при которой отсутствует грат на нижней кромке реза, и шероховатость имеет визуально минимальную величину. Видно, что скорости резки лазером с СФР и лазером PRC близки.

Таблица 3.

Толщина, мм	2	3	4	5	6	8	10	10	12	20
Мощность, кВт	1	1	1	1	1	1	1,3	1,5	1,5	3,5
Скорость, м/мин СФР, ЛЮК	3,8	2,7	1,8	1,6	1,4	1	0,8	-	0,6	0,9
Скорость, м/мин УР, PRC	4	2,3	1,8	1,5	1,4	1	-	0,9	0,8	0,85

Измеренная величина шероховатости R_a , усредненная для образцов толщиной 1...10 мм, равна 19,7 мкм (для измерений использовался профилограф Form Talysurf 0355). Аналогичная величина для поверхности реза, полученного на комплексах фирмы Trumpf, – 14,7 мкм, величины достаточно близки. При толщине образцов 10 мм и более поверхность реза для лазеров с СФР имеет в 1,5...2 раза большую шероховатость. Следует заметить, что качество реза зависит от большого количества различных, иногда трудно контролируемых факторов – химического состава разрезаемого материала и технологического газа, состояния поверхности листа, стабильности перемещения резака относительно листа, состояния оптических элементов, что затрудняет корректное сравнение результатов, полученных на разных установках. Образцы реза малоуглеродистой стали толщиной 16 мм и 10 мм показаны на рис. 8 и 9, соответственно.

При резке малоуглеродистой стали толщиной 1 мм в струе азота одиночной линзой при условиях фокусировки, оптимальных для получения минимального размера фокального пятна, рез имеет ширину 90...100 мкм, что характерно для одномодовых CO₂-лазеров.

На рис. 10 показано сечение канала реза титановой пластины толщиной 20 мм. В качестве технологического газа использовался аргон, фокусное расстояние линзы равно 254 мм, перетяжка сфокусированного пучка находится на расстоянии 9 мм от верхней поверхности реза. Ширина канала на половине толщины равна 33 мм, что близко к диаметру пучка в перетяжке. На рис. 11 показана поверхность реза титановой пластины толщиной 30 мм, рез выполнен на установке «Сибирь 1» при мощности излучения 6 кВт.

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. При резке малоуглеродистой стали в струе кислорода грат на деталях отсутствует.
2. Скорость резки малоуглеродистой стали в струе кислорода близка к скорости резки излучением CO_2 -лазера с устойчивым резонатором.
3. Шероховатость поверхности реза листов малоуглеродистой стали толщиной до 10 мм не превышает 20 мкм, что характерно для резки излучением лазеров с устойчивым резонатором.
4. Боковые стенки канала реза близки к прямым. При резке стальных и титановых листов с инертным газом подбором условий фокусировки может быть получена ширина реза, близкая к диаметру перетяжки сфокусированного пучка. В листе толщиной 1 мм рез имеет ширину примерно равную 0,1 мм, характерную для CO_2 -лазеров с устойчивым резонатором.

В Заключении приведены основные результаты работы.

1. Расчетным путем определены пространственные характеристики выходного пучка самофильтрующего резонатора.

2. Определены увеличение резонатора и поперечные размеры зеркал, оптимальные для генерации излучения с высоким качеством в мощном непрерывном CO_2 -лазере.

3. Разработаны и применены в технологических CO_2 -лазерах с поперечным потоком резонаторы на основе СФР. Измеренный параметр качества пучка равен 0,66 при числе Френеля 6,1.

4. Впервые произведена генерация пучка с качеством TEM_{00} моды при мощности излучения 8 кВт.

5. Показано, что возможным является создание непрерывных CO_2 -лазеров с СФР уровня мощности до 15 кВт при значениях параметров резонатора, обеспечивающих высокое качество излучения.

6. Впервые произведена резка стальных листов толщиной до 20 мм излучением CO_2 -лазера с СФР. Показано, что по основным показателям качества реза и удельной энергии резки СФР близок к устойчивому резонатору. Произведена резка титановых пластин толщиной 30 мм.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шулятьев В.Б. Самофильтрующий резонатор в CO_2 -лазере непрерывного действия // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 2. С. 305-307.
2. Грачёв Г.Н., Иванченко А.И., Смирнов А.Л., Шулятьев В.Б. Неустойчивый резонатор с пространственной фильтрацией излучения в технологическом CO_2 -лазере // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 1. С. 131-134.
3. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Смирнов А.Л., Шулятьев В.Б. Технологический CO_2 -лазер мощностью 3 кВт с высоким качеством излучения // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 7. С. 643-648.

4. Афонин Ю.В., Гольшев А.И., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришнич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. Генерация излучения с качеством TEM₀₀ моды в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электроника. 2004. Т. 31, № 4. С. 307-310.
5. Смирнов А.Л., Шулятьев В.Б. Численное и экспериментальное исследование самофильтрующего неустойчивого резонатора применительно к проточному CO₂-лазеру // Моделирование в механике: Сб. науч. тр. Т. 2, № 6. Новосибирск, Изд. ИТПМ СО АН СССР, 1988. С. 115-121.
6. Иванченко А.И., Крашенишников В.В., Пономаренко А.Г., Шулятьев В.Б. Самофильтрующий неустойчивый резонатор для CO₂-лазера // Применение лазеров в народном хозяйстве: Тез. докл. III Всесоюз. конф. Шатура, 1989. С. 23.
7. Golyshev A.P., Ivanchenko A.I., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B. Industrial CO₂-lasers of power up to 10 kW with high quality radiation // Proc SPIE. 2001. Vol. 4184. P. 414 - 419.
8. Малов А.Н., Малов Н.А., Оришнич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Резка толстых металлических пластин излучением CO₂-лазера с самофильтрующим резонатором // Лазерные технологии и средства их реализации: Материалы IV Международ. научно-техн. конф. С.-Петербург: Изд-во СГБГТУ, 2003. С. 39-47
9. Fomin V.M., Filev V.F., Pechurin V.A., Orishich A.M., Golyshev A.P., Malov A.N., Afonin Yu.V., Shulyat'ev V.B. High power high beam quality industrial CO₂-lasers and material processing systems // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt III. Novosibirsk, 2004. P. 65-70.
10. Malov A.N., Shulyat'ev V.B. Measurement of the parameters of a focused beam of powerful CO₂-laser // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt III. Novosibirsk, 2004. P. 119-122.
11. Golyshev A.P., Malov A.N., Orishich A.M., Shulyat'ev V.B., Pechurin V.A., Filev V.F. Application of the high-power continuous-wave CO₂-laser with self-filtering resonator to cutting of metal plates // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5777. P. 256-261
12. Afonin Yu.V., Filev V.F., Ivanchenko A.I., Golyshev A.P., Malov A.N., Orishich A.M., Pechurin V.A., Shulyat'ev V.B., Shkhalov E.G. Automated laser technological complex for cutting with irradiation power of 8 kWt // Proc SPIE. 2004. Vol. 5479. P. 164-169.

Цитируемая литература

1. Willets D.V., Harris B.R. Output characteristics of a compact 1 J CO₂-laser with a gaussian reflectivity resonator // IEEE J. Quant. Electron. 1988. Vol. 24, No. 6. P. 849-955
2. Snell K.J., McCarthy N., Piche M., Lavigne P. Single transverse mode oscillations from an unstable resonator Nd:YAG laser using a variable reflectivity mirror // Optics Comms. 1988. Vol. 65, No. 5. P. 377-381.
3. Lavigne P., McCarthy N., Parent A., Snell K.J. Laser mode control with variable reflectivity mirrors // Canadian J. Phys. 1988. Vol. 66, No. 10. P. 888-895.
4. Sona P., Muys P., Sherman C., Leys Ch. High-power fast-axial-flow CO₂-laser with a variable-reflectivity output coupler // Opt. Lett. 1990. Vol. 15, No. 24. P. 1452-1455
5. Generalov N.A., Gorbulev M.J., Solov'yov N.G., Yakimov M.Yu., Zimakov V.P. High-power industrial CO₂-lasers excited by a nonself-sustained glow discharge. Gas Lasers –

- Recent Developments and Future Prospects / Eds W.J. Witteman, V.N. Ochkin Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996 P. 323-327.
- 6 Генералов Н.А., Зимаков В.П., Соловьев Н.Г., Якимов М.Ю. Повышение качества излучения монопольных непрерывных CO₂-лазеров с поперечной прокачкой путем применения специальных схем оптических резонаторов // Изв. Акад. наук. Сер. физическая. 1994. Т. 56, № 2. С. 104-109.
 - 7 De Silvestri S., Laporta P., Magni V. Laser output coupler based on a radially variable interferometer // J. Opt. Soc. Am. A. 1987 Vol. 4, No. 8. P. 143-150.
 - 8 Yasui K., Tanaka S., Yagi S. Unstable resonator with phase-unifying coupler for high power lasers // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52, No. 7. P. 530-533.
 - 9 Takenaka Y., Nishimae J., Tanaka M., Motoki Y. Gauss-core resonator for high-speed cutting of thin metal sheets // Opt. Lett. 1997. Vol. 22, No. 1. P. 37-39.
 - 10 Михеев П.А., Николаев В.Д., Шелепенко А.А. Неустойчивый резонатор с полупрозрачным выходным зеркалом для быстропроточного CO₂-лазера // Квантовая электроника. 1992. Т. 12, № 5. С. 456-461.
 - 11 Агальев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979.
 - 12 Galushkin M.G., Golubev V.S., Korotchenko A.V., Zabelin A.M. Physical and technical factors determining beam quality of high-power fast-transverse-flow industrial lasers // Proc. SPIE. 1996 Vol. 3092 P. 134-141.
 - 13 Du K., Biesenbach J., Ehrlichmann D. Lasers for material processing: specifications and trends // Opt. and Quant. Electronics. 1995. Vol. 27. P. 1089-1101.
 - 14 Gobbi P.O., Reali G.C. A novel unstable resonator configuration with a self filtering aperture // Opt. Commun. 1984. Vol. 52, No. 3. P. 195-202.
 - 15 Технологические лазеры: Справочник / Под ред. Г.А. Абильситова. Т. I. М.: Машиностроение, 1991.
 - 16 Takhasaki T., Kakisaki K., Sasaki N., Sakuma J. 10 kW CO₂-laser for material processing // Proc. SPIE. 1986. Vol. 610 P. 50-55.
 - 17 Волков В.Л., Денисенко А.А., Закревский С.И., Иванченко А.И., Коба А.П., Лысенко К.Л., Попомаренко А.Г. Система накачки с высокими удельными энергетическими характеристиками для технологического CO₂-лазера // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 11. С. 2234-2234.
 - 18 Бульцупев А.Е., Ведерников Ю.А., Преображенский Н.Г. К расчету характеристик лазерного резонатора // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 5. С. 1093-1094.

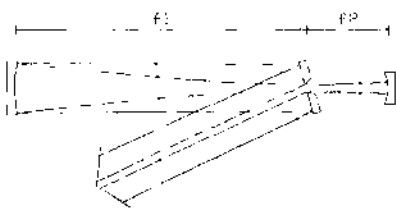


Рис. 1. Оптическая схема самофильтрующего резонатора.

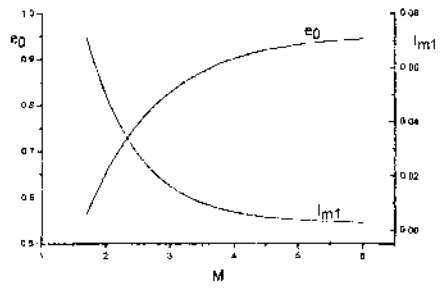


Рис. 2. Зависимость доли мощности ϵ_0 в центральном пятне и интенсивности I_{m1} первого побочного максимума в дальней зоне от увеличения M резонатора.

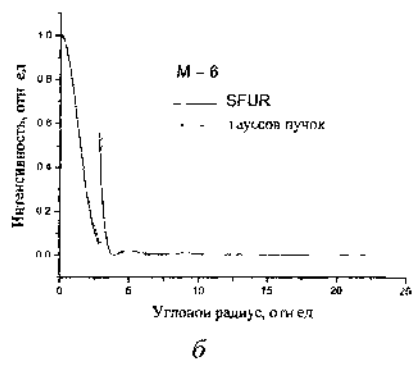
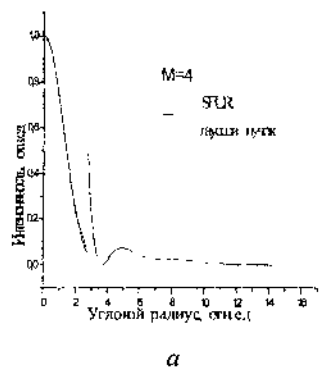


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности излучения выходного пучка СФР в дальней зоне при $M = 4$ (а) и $M = 6$ (б). Периферийная часть пучка увеличена.

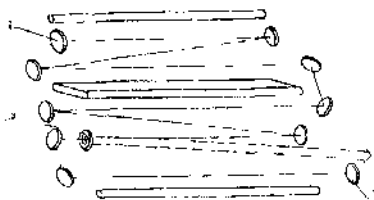


Рис. 4. Схема СФР CO_2 -лазера Сибирь 1. 1, 2 – сферические зеркала, 3 – кольцевое выводное зеркало.

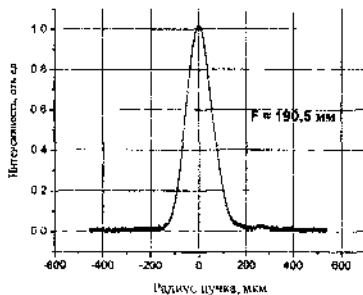


Рис. 5. Измеренное распределение мощности в сфокусированном пучке.

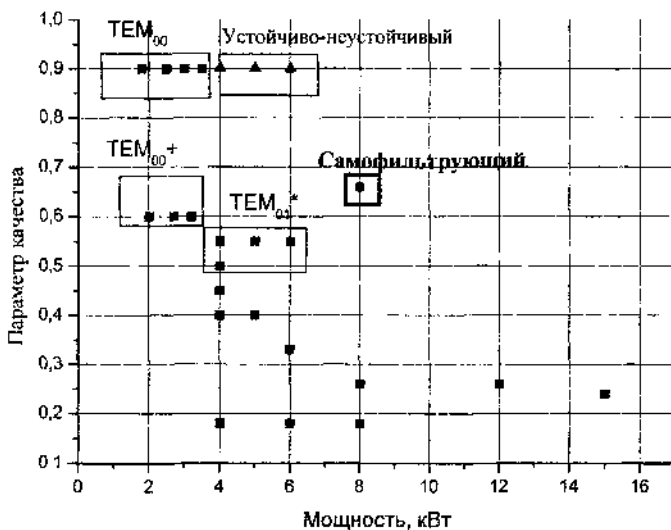


Рис. 6. Мощность излучения и качество пучка технологических CO_2 -лазеров. Знак «+» в TEM_{k0}^+ означает, что TEM_{k0} мода является доминирующей.



Рис. 7. Автоматизированный лазерный технологический комплекс для резки листовых материалов на основе лазера мощностью 5 кВт.

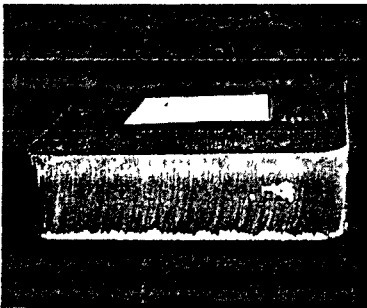


Рис 8 Поверхность реза низкоуглеродистой стали, толщина листа – 16 мм

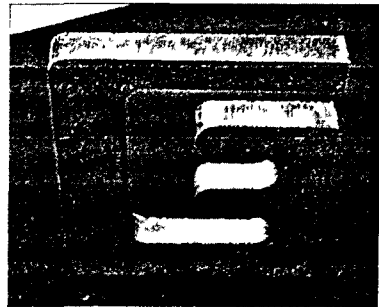


Рис 9. Образец детали из низкоуглеродистой стали, толщина листа – 10 мм.

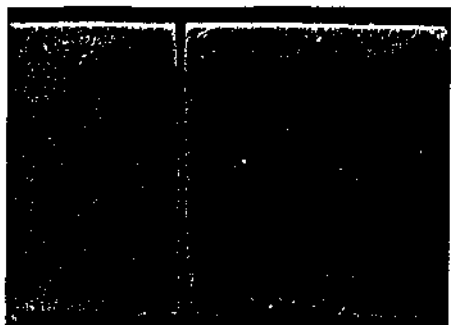


Рис. 10. Поперечное сечение канала реза в титановой пластине толщиной 20 мм. Ширина канала равна 33 мм (измерение при помощи микроскопа). Минимальная ширина канала равна 23 мм (измерение щупом).

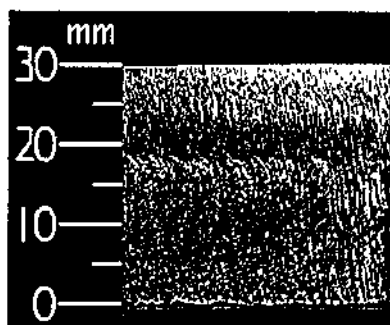


Рис.11. Поверхность реза титановой пластины толщиной 30 мм. Рез выполнен на установке «Сибирь 1» при мощности излучения 6 кВт

Ответственный за выпуск В.Б. Шулятьев
Подписано в печать 28.10.2005

Формат бумаги 60 × 84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч. изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 10

Отпечатано на ризографе ЗАО "ИНТЕРТЕК"
630090, Новосибирск-90, Институтская, 4/1

№ 2 1 3 3 1

РИБ Русский фонд

2006-4
20082