

Индустриальные CO₂-лазеры с высоким качеством излучения

А.И.Бондаренко, В.В.Васильцов, М.Г.Галушкин, В.С.Голубев, В.Г.Низьев,
В.Я.Панченко, А.М.Забелин, Ю.Н.Завалов, В.П.Якунин

Дается краткий обзор результатов исследований и разработок, направленных на достижение высоких показателей стабильности и оптического качества излучения промышленных лазеров, созданных в ИПЛИТ РАН для задач лазерной технологии обработки материалов, таких, как резка, сварка, поверхностная обработка, пробивка отверстий. Представлены описания конструкций и основные параметры лазеров. Реализовано несколько концепций мощных лазеров с высоким качеством излучения: с поперечной и аксиальной прокачкой газа, многоканальные волноводные лазеры, импульсно-периодический ТЕ лазер.

1. Введение

Доля лазерной обработки материалов в современном автоматизированном высокоточном производстве неуклонно растет. Появляются новые материалы с уникальными механическими и теплофизическими характеристиками, требующие разработки эффективных, в том числе лазерных технологий их обработки. Особенно актуально создание лазерных технологий обработки перспективных материалов в авиационной и космической технике, в атомной и термоядерной энергетике: здесь идет освоение процессов лазерной резки, сварки, перфорации отверстий. В лазерной технологии обработки материалов растут требования к точности, чистоте, производительности, к предельным значениям толщины материала. С точки зрения параметров излучения лазера, являющегося основным элементом лазерного технологического комплекса, речь идет о высокой мощности и качестве излучения, стабильных и управляемых временных, пространственных и поляризационных характеристиках. С целью достижения высоких значений всех этих параметров в ИПЛИТ РАН был выполнен широкий цикл работ по исследованию газового разряда и проблемы качества лазерного пучка.

Разработанные в ИПЛИТ РАН модели промышленных газоразрядных CO₂-лазеров большой мощности соответствуют различным схемам накачки

и охлаждения активной среды. Разнообразие технических решений определяется двумя причинами. С одной стороны, конкуренция технических решений пока не позволяет определить лидера по общей сумме технико-экономических параметров. С другой стороны, требования к мощности и параметрам качества лазерного излучения в значительной степени варьируются для различных видов обработки материалов. Многоцелевая универсальная лазерная система оказывается неоптимальной.

При всем разнообразии концепций технологических лазеров НИЦТЛ РАН они имеют много общего. Все лазеры, за исключением высокомощных, выполняются в моноблочной конструкции, снабжены компьютерными системами управления и совместимы с промышленным оборудованием на основе ЧПУ. Промышленная эксплуатация предусматривает: порядок работы — до 16 часов в сутки, срок службы — не ниже 10000 часов, периоды между очередными приостановками для обслуживания — 500 часов, максимальную длительность обслуживания — 48 часов.

2. Исследования газового разряда и проблем качества лазерного пучка

В целях выполнения требований к обслуживанию, эффективности и стабильности пучка мощных промышленных CO₂ лазеров были осуществлены

различные исследования и разработки, что способствовало усовершенствованию конструкции лазеров.

2.1. Численное моделирование и экспериментальные исследования устойчивости и однородности газового разряда

В специальном исследовании [1] рассматривается двумерная математическая модель мощного быстропроточного CO_2 лазера; особыми характеристиками этой модели являются учет реальной геометрии многокатодной разрядной камеры, последовательность решения проблем тлеющего разряда, а также проблем газодинамики и молекулярной кинетики. Эффект секционирования катода был проанализирован и признан неоднозначным. С одной стороны, секционирование обеспечивает поддержание значительной части разряда в рекомбинирующей плазме при уменьшенном значении E/n , что оказывает положительное действие на устойчивость разряда. С другой стороны, увеличение ввода энергии вызывает драматический рост удельного энерговыклада в областях плазмы, примыкающих к секциям катода, что вызывает увеличение неоднородности разряда в катодной области и возможность возникновения температурной неустойчивости. Неоднородность энерговыклада влияет на пространственное распределение населенностей колебательных уровней молекулы CO_2 . Было исследовано насыщение коэффициента усиления в секциях, расположенных вниз по потоку, при увеличении общего удельного давления смеси. Необходимо отметить положительное влияние предыонизации, которое состоит в улучшении однородности энерговыклада. Представлены результаты численных расчетов, позволяющих дать оценку влияния общего расположения секций катода. Результаты данной математической модели находятся в хорошем соответствии с данными специальных экспериментов [2,3]. В этих экспериментах неоднородности разрядных параметров измерялись флуоресцентным, интерферометрическим [2] и зондовым [3] методами (рис. 1).

2.2. Усиление оптических неоднородностей активной среды, вызванное газовым разрядом и лазерным излучением

В ходе аналитического исследования [4,5] было обнаружено, что в поле интенсивного лазерного излучения тепловая устойчивость самостоятельных тлеющих разрядов быстропроточного CO_2 лазера уменьшается. Это вызывается эффектом кинети-

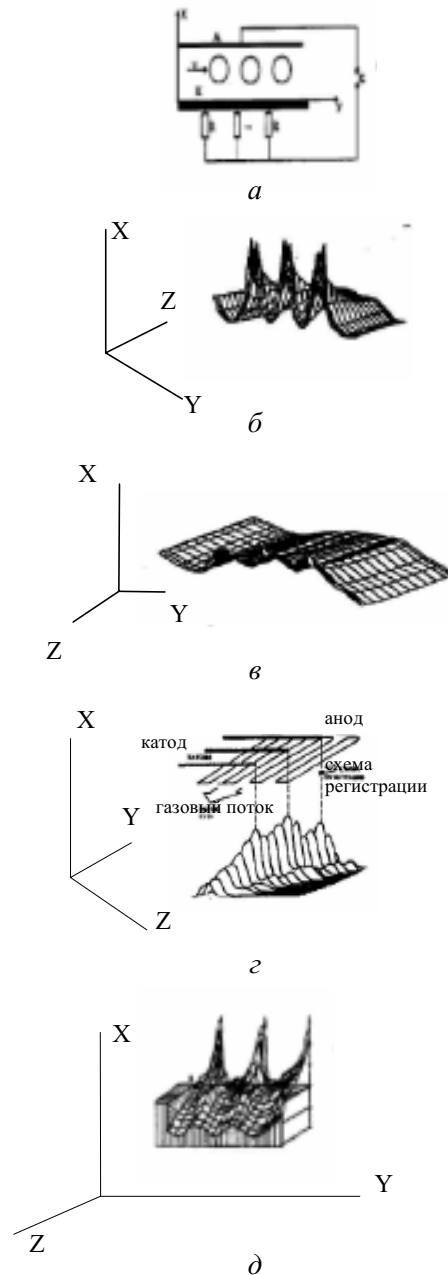


Рис. 1. Некоторые результаты теоретического моделирования [1] и экспериментальных исследований [2,3] неоднородностей газового разряда и активной среды в промышленных CO_2 -лазерах с быстрой поперечной прокачкой. а — геометрия газового разряда; б — пространственное распределение плотности тока (численная модель); в — пространственное распределение потенциала разряда (эксперимент: метод электрических зондов); г — численная модель распределения усиления в режиме малого сигнала; д — распределение интенсивности люминесценции на длине волны 4,3 мкм (эксперимент: ИК диагностика). Примечания: ось X — направление тока (A — анод, K — катод), ось Y — направление скорости потока, ось Z — направление лазерного пучка.

ческого нагрева, который проявляется в возрастании скорости *VT*-релаксации активной среды. В некоторых особых условиях этот эффект может управлять феноменом светоиндуцированного теплового роста флуктуаций плотности газа во времени. В этом случае турбулентность потока газа является одним из основных источников исходных возмущений. В типичных условиях работы быстропроточного CO₂ лазера непрерывного действия мощностью почти 5 кВт светоиндуцированный тепловой рост флуктуаций плотности может достигать 10³. Это приводит к нарушению устойчивости разряда, которое может сопровождаться ухудшением оптического качества среды вследствие появления мелкомасштабных оптических неоднородностей. По этой причине светоиндуцированный тепловой рост мелкомасштабных неоднородностей следует рассматривать как важный фактор, влияющий на качество излучения мощного CO₂ лазера. При соответствующей выходной мощности этих лазеров (порядка 20-30 кВт) светоиндуцированная тепловая неустойчивость может налагать ограничения на предельные параметры пучка и управлять взаимодействием основных характеристик лазера (качество пучка, мощность, компактность и эффективность).

2.3. Новые концепции оптических резонаторов

Если выходная мощность пучка непрерывного лазера не превышает уровня 1 кВт, не возникает никаких специфических проблем при получении одиночной (и самой низкой) моды распределения интенсивности пучка.

Для диапазона выходной мощности пучка от 1 до 5 кВт были исследованы и введены в конструкции лазеров две особые концепции оптического резонатора:

а) устойчивый полуконфокальный резонатор с дифракционным выходом [6,7];

б) устойчивый одномодовый (высокая мода) резонатор со специальным киноформным выходным зеркалом [7].

Для диапазона выходной мощности пучка от 5 до 10 кВт исследована и использована схема "устойчивого-неустойчивого" резонатора [8].

Введение всех вышеупомянутых схем резонаторов дало возможность получить независимое от мощности распределение интенсивности выходного гауссова пучка промышленных CO₂ лазеров с быстрой поперечной прокачкой в диапазоне мощности от 1 до 10 кВт.

2.4. Модуляция мощности пучка с помощью контролируемого зеркала связи

Были исследованы режимы генерации CO₂ лазера с непрерывной накачкой, использующего интерферометр Фабри-Перо в качестве выходного зеркала [9]. Получены режимы импульсно-периодической генерации в частотном диапазоне 0-5 кГц при длительности импульса 0,1-10 мс и глубине модуляции 100%. Был реализован основанный на интерферометре Фабри-Перо метод контроля и стабилизации мощности лазера с быстрой поперечной прокачкой при выходной мощности лазера до 1,5 кВт.

Гибкое медное зеркало с внутррезонаторным охлаждением применялось (А.М.Забелин, В.В.Якунин, В.В.Самаркин) для получения импульсно-периодического режима генерации 5 кВт лазера с быстрой поперечной прокачкой и непрерывной накачкой. Диапазон частот доходил до 5 кГц, пиковая мощность — до 20 кВт, длительность импульса составляла 0,1 мс.

3. Лазеры с быстрой поперечной прокачкой

3.1. Лазеры ТЛ-1.5 и ТЛ-2.5

Лазеры этих двух моделей на непрерывную мощность излучения 1,5 и 2,5 кВт, соответственно используются для резки листовых металлических и диэлектрических материалов (в основном, конструкционных и электротехнических сталей толщиной до 3-6 мм и материалов на основе древесины, толщиной до 25 мм). Такое применение этих лазеров обусловлено прежде всего высоким оптическим качеством их излучения, в данном случае — возможностью фокусировки в пятно диаметром до 0,2 мм и временной стабильностью мощности (нестабильность не выше 2%).

Лазер ТЛ-1.5 (рис.2) основан на принципе накачки электрическим разрядом постоянного тока. Он снабжен современными встроенными устройствами управления параметрами излучения (измеритель мощности, трассировочный лазер, программное изменение мощности по линейному закону и т.д.). Выходной лазерный пучок имеет линейную поляризацию. В основной моде TEM₀₀ мощность пучка 1,3 кВт, в многомодовом режиме — 1,5 кВт, диаметр пучка 20 мм. Лазер сконструирован в моноблочном исполнении, его габаритные размеры 2,2×1,2×2,06 м. Модель ТЛ-2.5 имеет ту же основную концепцию, что и лазер ТЛ-1.5. Его выходная мощность в моде TEM₀₀ равна 2 кВт, апертура



Рис.2. Общий вид лазера ТЛ-1.5.

излучения 40 мм. Технологические лазеры ТЛ-1.5 и ТЛ-2.5 сравнительно широко распространены в России.

3.2. Лазер ТЛ-5М

Высокое качество излучения ($M=1,2$), стабильность моды и регулируемость выходной мощности лазера ТЛ-5М позволяет применять его для сварки легированных и углеродистых сталей (при толщине до 10 мм), алюминиевых, титановых и медных сплавов, а также для резки, поверхностной термической обработки и наплавки.

Технологический лазер ТЛ-5М — газовый CO_2 -лазер с быстрой поперечной прокачкой и возбуждением разрядом постоянного тока [10,11]. Лазер изготовлен в моноблочном исполнении (рис.3).

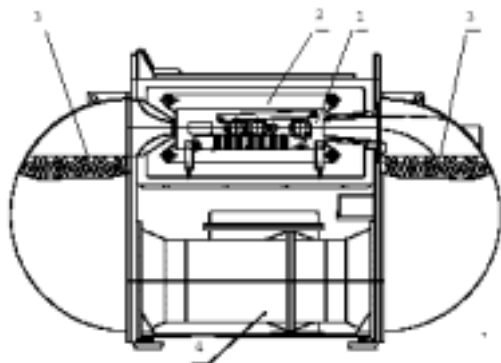


Рис.3. Излучатель лазера ТЛ-5: 1 — газоразрядная камера; 2 — оптический резонатор; 3 — теплообменники; 4 — осевой.

Электродная система состоит из секционированного катода и эквипотенциальной анодной пластины. Такая электродная система обеспечивает однородный разряд в большом объеме разрядной камеры. Для получения высокой однородности и устойчивости основного разряда используется вспомогательный высокочастотный разряд. Стабильность и высокое оптическое качество излучения достигаются пассивными и активными средствами. Установка резонаторных зеркал на жестких пластинах, закрепленных на оптической скамье из суперинвара, обеспечивает пассивную стабилизацию. Активная стабилизация достигается с помощью систем самоподъюстировки и стабилизации выходной мощности, обеспечивающих уровень флуктуации не выше 2%.

Визуализация оси лазерного пучка осуществляется трассировочным He-Ne лазером. Работа лазера ТЛ-5М регулируется и контролируется компьютерной системой управления с пульта оператора. Лазер имеет как непрерывный, так и импульсно-периодический режим работы. Мощность излучения лазера регулируется в диапазоне 100-7500 Вт. В лазере применена специальная схема “устойчивого-неустойчивого” оптического резонатора, которая обеспечивает высокое качество выходного пучка. Распределение интенсивности излучения в ближней зоне практически гауссово при прямоугольном сечении пучка. Качество пучка излучения этого лазера, характеризуемое общепринятым фактором M^2 , [12] составляет $M^2=1,2$ (фактор M^2 равен отношению интенсивности сфокусированного пучка при его дифракционной расходимости к интенсивности сфокусированного реального пучка). Отклонение распределения интенсивности излучения в дальней зоне от распределения Гаусса не более $\pm 10\%$, расходимость излучения (полный угол) 1,5 мрад, нестабильность оси пучка не выше 0,15 мрад. Размеры (Д-Ш-В) моноблока лазера 2,175×2,3×1,9 м.

4. CO_2 -лазеры с диффузионным охлаждением

4.1. Многоканальные лазеры МТЛ-2.5 и МТЛ-4

Эти лазеры отличаются высокой пространственной однородностью распределения интенсивности излучения в зоне обработки материалов, а также высоким уровнем мощности (2,5 и 4 кВт), и ее стабильности. Благодаря этому лазеры МТЛ-2.5 и МТЛ-4 эффективно применяются в процессах поверхностной модификации поверхности — термической обработки, наплавки, легирования [10,11].

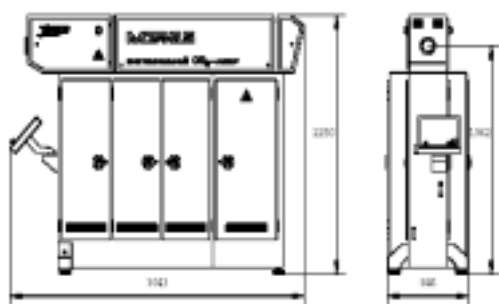


Рис.4. Общий вид и размеры лазера МТЛ-2.5.

МТЛ-2.5 и МТЛ-4 являются многоканальными мощными волноводными CO₂-лазерами с диффузионным охлаждением и возбуждением емкостным зарядом переменного тока частотой 20 кГц [11]. Лазерный излучатель содержит до 100 параллельных кварцевых трубок (диаметр комплекта трубок до 90 мм).

Разрядные трубки расположены в резонаторе Фабри-Перо. Лазерные пучки, генерируемые каждой трубкой, не сфазированы, поэтому общая суммарная расходимость выходного излучения равна расходимости отдельного пучка.

Общий вид моноблока лазера МТЛ-2.5 показан на рис.4. Модель МТЛ-4 имеет те же размеры, что и МТЛ-2.5. Модели МТЛ-2.5 и МТЛ-4 генерируют номинальную мощность излучения 2,5 и 4 кВт, соответственно. Лазеры снабжены системами стабилизации и измерителями мощности излучения. Нестабильность мощности излучения и распределения интенсивности — не более 2%. Высокая общая эффективность лазеров этого типа (12%) связана с уменьшением расхода энергии на вспомогательные системы и высоким электрооптическим кпд. Расходимость излучения не зависит от уровня выходной мощности и равна $\theta=4,2-4,6$ мрад.

Многолучевая система с несинхронизованными фазами дает уникальное распределение плотности мощности, оптимальное для лазерной термической обработки изделия. Рис.5 иллюстрирует распределение плотности мощности излучения на двух различных расстояниях от системы фокусировки. Многолучевая концепция дает возможность широко изменять профиль энергии на поверхности обрабатываемой детали путем фокусировки с применением недорогой сферической оптики.

Лазеры могут эффективно генерировать на смеси, в которой азот заменен атмосферным воздухом. Лазеры отличаются малым расходом газовой смеси (менее 5 нл/ч) благодаря особенностям плазмохимических реакций в активной среде, возбуждаемой разрядом переменного тока.

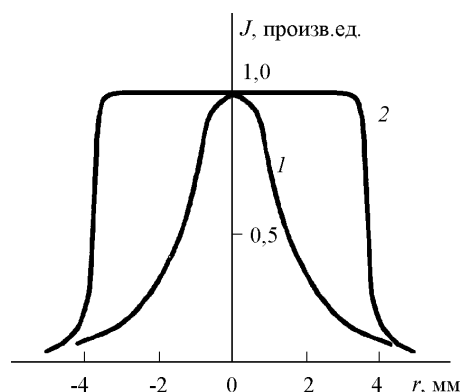


Рис.5. Распределение интенсивности J излучения лазера МТЛ-2.5 на расстояние L от фокусирующей системы. Мощность лазера $P=3$ кВт, фокусное расстояние $F=1350$ мм. 1 — $L=F$; 2 — $L=F(1+1/5)$.

Чтобы уменьшить диаметр выходного пучка до размеров, оптимальных для применения в технологической системе, излучатель лазера оснащен компактизатором пучка. Компактизаторы с элементами проходной оптики при выходной мощности до 2,5 кВт увеличивают стартовую расходимость излучения. Компактизаторы с отражательными оптическими элементами могут быть оснащены фазовыми корректорами для сохранения стартовой расходимости излучения. Апертура излучения на выходе компактизатора 45 мм.

Качество излучения многоканальных лазеров может быть значительно улучшено (до $M^2 \geq 1$) за счет фазовой синхронизации пучков по всем каналам с последующим формированием однолепесткового распределения излучения в дальней области [13-15]. При выборе оптимального режима синхронизации фаз теоретически моделировались и экспериментально исследовались различные методы:

- метод пространственной фильтрации (фокальный и афокальный) [14] (рис.6а);
- размножение изображений пространственно-периодических структур [15-17] с дополнительной коррекцией волнового фронта (рис.6б);
- внутрирезонаторное формирование однолепесткового распределения в дальней области (рис.6в);
- схема “генератор-многоканальный усилитель”.

Экспериментально было получено синхронизованное излучение мощностью 450-500 Вт, что составляет 45% мощности излучения без синхронизации фаз. В центральном максимуме распределения интенсивности излучения в дальней зоне при этом содержится 92% от всей энергии.

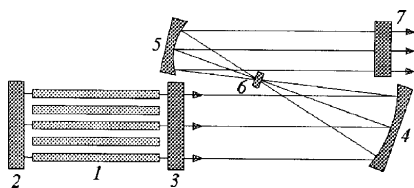


Рис.6а. Схема пространственной фильтрации излучения лазера МТЛ: 1 — активный элемент; 2 — глухое зеркало; 3 — окно; 4, 5 — сферические зеркала; 6 — фокальный фильтр; 7 — выходное зеркало.

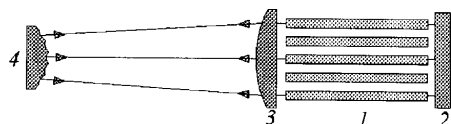


Рис.6б. Схема лазера МТЛ с использованием эффекта размножения изображений: 1 — активный элемент; 2 — плоское выходное окно; 3 — просветленная линза; 4 — фазорельефное зеркало связи

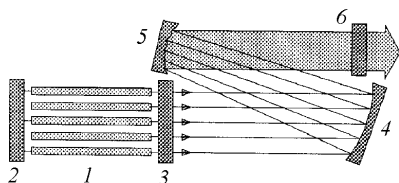


Рис.6в. Схема внутрирезонаторного формирования однолепесткового распределения излучения лазера МТЛ: 1 — активный элемент; 2 — глухое зеркало; 3 — окно; 4, 5 — фазорельефные сферические зеркала; 6 — полупрозрачное зеркало связи.

4.2. Одномодовый лазер М-500

Особый интерес представляет вариант однолучевого лазера, созданного на базе описанных выше физико-технических решений лазеров МТЛ [18]. Эта схема дает возможность разработки компактных и недорогих одномодовых лазеров. Первая из этих моделей — лазер М-500 с размерами излучателя 200×200×2000 мм и весом 40 кг. Номинальная средняя мощность излучения 500 Вт, апертура излучения 14 мм, расходямость 1,0 мрад, общая эффективность превышает 10%. Лазер может генерировать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме при длительности импульса 50-70 мс и периоде повторения импульсов 2-5 кГц. Пиковая мощность излучения превышает среднюю мощность в 5 раз. Эта модель может успешно применяться для прецизионной резки листов из диэлектрика и металлической фольги, а также в кардиохирургии.

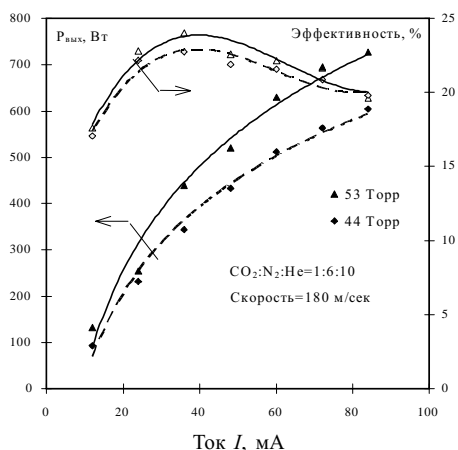


Рис.7. Выходная мощность и эффективность генерации лазера ТЛА-600 в зависимости от тока в газоразрядной трубке. (Двухпроходный резонатор, мода TEM_{01}^*).

5. CO₂-лазеры с быстрой аксиальной прокачкой

Технологические CO₂-лазеры с быстрой аксиальной прокачкой при выходной мощности 1-3 кВт являются наиболее удобным инструментом для прецизионной резки металлических листов (из конструкционных и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов и др.). В НИЦТЛ разработана базовая модель такого лазера: ТЛА-600 с выходной мощностью 600 Вт, с разрядом постоянного тока и индивидуальной балластировкой вакуумной лампы для каждой из газоразрядных трубок [19]. Лазер прост в обслуживании, характеризуется высокой надежностью и обладает следующими режимами генерации: непрерывный, “суперимпульсный”, комбинированный и режим высокой частоты повторения импульсов.

Для эффективной турбулизации газового потока применяется комбинированная схема аксиальной инжекции рабочего газа. На рис. 7 показана выходная мощность в непрерывном режиме и эффективность генерации в зависимости от тока газового разряда при двухпроходном резонаторе. Выходная мощность в гауссовом пучке достигает 650 Вт, при преобладании моды TEM_{01}^* максимальная выходная мощность составляет 750 Вт. Коэффициент полезного действия 18%, расход газовой смеси 60 нл/ч.

Исследовались различные методы получения режима высокой частоты повторения импульсов. В частности, метод пассивной модуляции добротности реализован в диапазоне 10 кГц. Режим высокой частоты повторения импульсов получен при комбинировании этого метода с модуляцией тока. Пиковая мощность превосходила в 50 раз среднюю мощность,

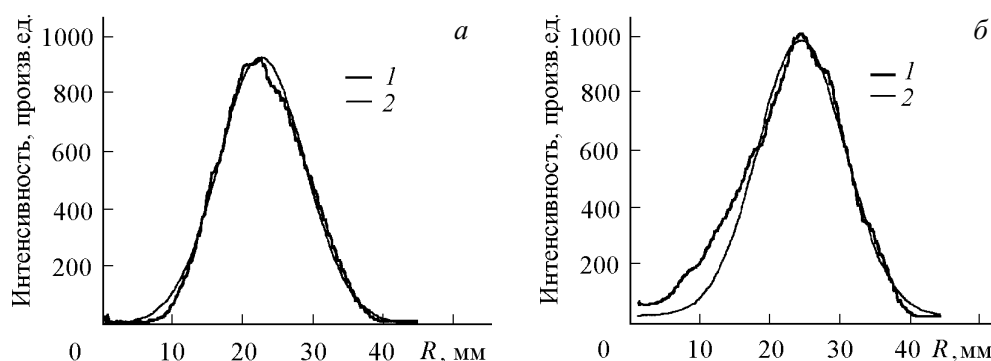


Рис.8. Поперечное распределение выходного излучения лазера ТЛА при четырехпроходном резонаторе и моде TEM_{00} : 1 — эксперимент, 2 — TEM_{00} . а — X-плоскость, б — Y-плоскость.

когда частота повторения импульсов находилась в диапазоне единиц килогерц. Режим высокой частоты повторения импульсов предназначен для применений лазера ТЛА-600 в селективной лазерной молекулярной технологии, а также в качестве источника излучения в лидаре.

На рис.8 показаны некоторые результаты измерения качества излучения ТЛА-600, снабженного четырехпроходным оптическим резонатором (общая длина 5,25 м) с диафрагмой около 17 мм. Наблюдалось незначительное отклонение от распределения Гаусса в широком диапазоне рабочих параметров лазера.

6. Импульсно-периодический CO₂-лазер ИПТЛ-2

Излучение импульсно-периодического CO₂-лазера, в отличие от непрерывного, характеризуется тремя независимыми параметрами: энергией в импульсе, длительностью и частотой следования импульсов. Это обстоятельство, а также возможность получения высоких пиковых мощностей, обеспечивающих режим абляции обрабатываемых материалов, наряду с простотой и надежностью конструкции лазера, позволяют широко применять эти лазеры в промышленности.

В некоторых операциях импульсно-периодические лазеры более эффективны по сравнению с лазерами непрерывного действия, а такие операции, как пробивка отверстий, могут выполняться только этими лазерами. Импульсно-периодический режим обработки при высокой пиковой мощности обеспечивает также преимущества при резке диэлектриков, композитов, сверхтвердых и тугоплавких материалов. Он может эффективно применяться при гравировке облицовочных камней. Возможно успешное использование импульсно-периодических CO₂-лазеров с короткой длительностью импульса и достаточной энергией для ультразвукового контроля материалов,

селективного возбуждения химических реакций, разделения изотопов. Таким образом, разработка промышленных импульсно-периодических CO₂-лазеров, которые могут надежно и эффективно применяться в промышленности при средней мощности 1 кВт и выше, является актуальной задачей.

Технологический импульсно-периодический CO₂-лазер ИПТЛ-2 [20] имеет два газодинамических контура рециркуляции газа и две газоразрядные камеры (рис.9). Двухкамерная конструкция с общим резонатором или двумя отдельными резонаторами дает возможность генерировать, соответственно, один или два пучка; это расширяет технологические возможности лазера.

Выходной оптический блок состоит из выходного окна (пластина с покрытием из KCl или ZnSe) и полупрозрачного зеркала — плоскопараллельной пластины из GaAs. Комбинация двухкамерной конструкции и общего резонатора дает возможность получения трех рабочих режимов лазера. В первом из них при одновременной работе разрядных камер

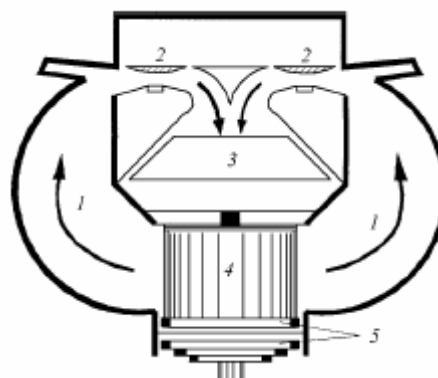


Рис 9 Схема блока генерации лазера ИПТЛ-2: 1 — газодинамический контур; 2 — газоразрядная камера; 3 — теплообменник; 4 — центробежные вентиляторы; 5 — магнитная муфта.

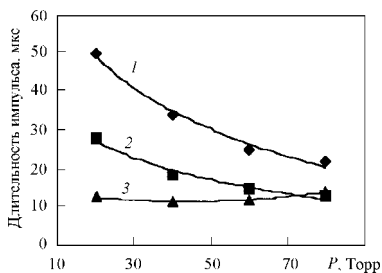


Рис. 10. Длительность импульса в зависимости от давления молекулярных компонентов газовой смеси. Лазер ИПТЛ-2. Парциальное давление гелия 24 мм рт.ст. постоянно для всех кривых. 1 — $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:6$; 2 — 1:3; 3 — 1:1.

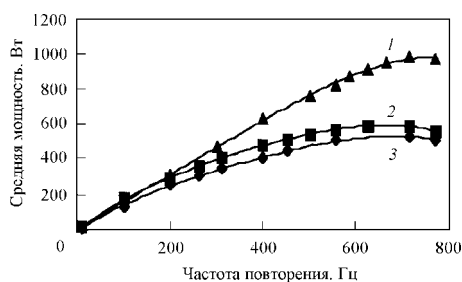


Рис. 11. Средняя выходная мощность лазерного излучения одной из камер в зависимости от частоты повторения импульсов. Лазер ИПТЛ-2. Давление газовой смеси 210 Торр. Смесь газов 1 — $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:3:6$; 2 — 1:6:6; 3 — 1:5:9.

энергия в импульсе достигает 4 Дж при частоте повторения импульсов до 700 Гц. Поочередная работа разрядных камер реализует второй режим; частота повторения импульсов в нем удваивается при соответствующем уменьшении энергии в импульсе. В условиях третьего режима одна из разрядных камер работает с некоторой временной задержкой по отношению к другой, что удлиняет импульс излучения до 100 мкс. Энергия в импульсе и частота повторения импульса могут изменяться в широком диапазоне. Длительность импульса зависит от состава смеси и давления газа (рис. 10). Зависимость средней выходной мощности одного из двух независимых пучков от частоты повторения импульсов представлена на рис. 11. Приведем, в заключение, примеры параметров процесса пробивки отверстий излучением этого лазера в стали и меди.

	Сталь	Медь
Толщина образца, мм	1,5	0,3
Диаметр отверстия, мм	0,4	0,2
Энергия в импульсе, Дж	1	1,3
Длительность импульса, мкс	30	50
Частота следования, Гц	500	80
Время пробивки, с	0,15	0,35

7. Заключение

Мощные промышленные CO_2 -лазеры предназначены для основных операций обработки (резка, сварка, перфорация, модификация поверхности) широкого спектра материалов, применяемых в ключевых отраслях XXI века: энергетическое и транспортное машиностроение, судостроение, топливные отрасли, аэрокосмическая промышленность, оптоэлектроника, информатика, медицинская и пищевая промышленность.

Особенно важны возможности применения созданных мощных лазеров в лазерной технологии обработки таких перспективных материалов, как специальные сплавы с уникальными свойствами, керамические композиты, минералы, сверхтвердые и тугоплавкие материалы.

Понятия “перспективные материалы” и “современные технологии” весьма многогранны. Требования таких технологий к параметрам лазерного луча как инструменту обработки не могут быть удовлетворены одним универсальным источником. Такой подход крайне неэффективен и с экономической точки зрения. В ИПЛИТ РАН разработан и создан целый ряд мощных технологических лазеров, адаптированных к таким современным технологиям. С одной стороны, это лазеры ТЛ-1.5 и М-500 с генерацией основной поперечной моды для высококачественной резки листовых материалов. С другой — многоканальные лазеры для модификации поверхности металлов с равномерным распределением мощности в пятне фокусировки. Технологические лазеры ИПЛИТ РАН покрывают широкий, пользующийся наибольшим спросом у потребителей, диапазон мощности излучения от 0,5 до 10 кВт. Они являются промышленными образцами, имеют современные системы управления, просты в обслуживании, работают на многих предприятиях в России и ряда зарубежных стран.

Литература

1. В.Е. Завалова, В.И. Леденев, В.Я. Панченко, Ю.П. Райзер, С.Т. Суржигов. Труды НИЦТЛ, с.141-174, 1994.
2. В.М. Гордиенко, А.П. Кубышкин, В.Я. Панченко, В.Г. Платоненко. Флуоресцентные и интерферометрические методы диагностики колебательно возбужденных молекул в газах. Итоги науки и техники, Физ. основы лазерной науки и техники, 2, ВИНТИ, Москва, 1998.
3. В.Г. Низьев, В.Н. Кортунов, О.А. Новодворский, Р.Я. Сагдеев. Плазменные устройства и операции, 5, с.89-98, 1992.
4. М.Г. Галушкин, В.С. Голубев, А.М. Забелин, В.Е. Завалова. Proc. SPIE, 2257, p.148-155, 1993.

5. М.Г. Галушкин, В.С. Голубев, А.М. Забелин, В.Я. Панченко. Известия Академии наук, сер. Физическая, 56, №8, с.199-205, 1992.
6. Ю.А. Ананьев, С.Г. Аникишев, В.Д. Соловьев. Оптика и спектроскопия, 68, с.1213, 1990.
7. М.Г. Галушкин, В.С. Голубев, В.В. Дембовецкий, А.М. Забелин. Известия Академии наук, сер. Физическая, 60, №12, с.157-164, 1996.
8. А.В. Коротченко, А.М. Забелин. Proc. SPIE, 3092, с.134-137, 1996.
9. С.А. Гнедой, В.В. Самаркин, В.П. Якунин. Proc. SPIE, 2257, p.144-147, 1993.
10. Технологические лазеры. Справочник. Под ред. Г.А.Абильситова. М.: Машиностроение, 1985, 432 с.
11. Абильситов Г.А., Бондаренко А.И., Васильцов В.В., Голубев В.С., Гонтарь В.Г., Забелин А.М., Низьев В.Г., Якунин В.П. Промышленные технологические лазеры. НИЦТЛ АН СССР. Квантовая электроника, 1990, т.17, №6, с.672-676.
12. Galushkin M.G., Golubev V.S., Korotchenko A.V., Zabelin A.M. The Physical and Technical Factors, Determining Beam Quality of High-Power Industrial Fast Transverse Flow CO₂-Lasers. Proc. SPIE, 1996, v.3092, p.134-137.
13. Лиханский В.В., Напартович А.П. Успехи физических наук, 1990, т.160, №3, с.101-143.
14. Александров А.Г., Ангелуц А.А., Васильцов В.В и др. Квантовая электроника, 1990, т.17, с.1462-1463.
15. Zelenov E.V., Kurushin E.A., Filimonov D.Yu., Golubev V.S., Vasiltsov V.V. Synchronization of High Power Lasers. Proc. SPIE, 1993, v.2109, p.107-114.
16. Zelenov E.V., Kurushin E.A., Filimonov D.Yu., Golubev V.S., Vasiltsov V.V. Using Diffraction Optics for Formation Single-Loope Far-Field Beam Intensity Distribution in the Waveguide CO₂-Laser Synchronized Arrays. Proc. SPIE, 1993, v.2109, p.122-128.
17. Talbot H.F. Phil. Mag., 1936, v.9, p.401-404.
18. Васильцов В.В., Зеленов Е.В., Курушин Е.А., Филимонов Д.Ю., Лисин А.А. Изв. Академии наук. Сер. физ. 1993, т.57, №12, с.123-126.
19. Dembovetsky V.V. and Zavalov Yu.N. Industrial Fast-Axial Flow Carbon Dioxide Lasers. High Power Lasers-Science and Engineering. Eds. R.Kossowsky, M.Jelinek, R.F.Walter. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 1995, p.603-618.
20. Гофман В.Э., Дембовецкий В.В., Низьев В.Г., Тарасов М.Н. Электротехника, 1988, №11, с.5-8.