

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.373.826.002

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРЫ КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ С ВЫСОКИМ КАЧЕСТВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2009 г. В. О. Александров; В. В. Буданов; В. В. Васильцов, доктор техн. наук;  
М. Г. Галушкин, канд. физ.-мат. наук; В. С. Голубев, доктор физ.-мат. наук;  
Э. Н. Егоров; Е. В. Зеленов; В. Я. Панченко, доктор физ.-мат. наук; А. Н. Семенов;  
А. В. Соловьев; Е. В. Чашкин

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская обл.

E-mail: v.vasiltsov@mail.ru

В работе представлен типоряд технологических волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров киловаттного уровня мощности с высоким качеством излучения. Обсуждены технические преимущества и перспективы применения таких систем для лазерных технологий.

Коды OCIS: 140.0140.

*Поступила в редакцию 31.10.2008.*

### Краткий обзор технологических CO<sub>2</sub>-лазеров

Продолжающееся развитие лазерных технологий обработки материалов выдвигает повышенные требования к источникам лазерного излучения такие как надежность, высокое качество излучения, низкие эксплуатационные расходы, высокий ресурс работы, малая стоимость.

На рынке продаж мощных технологических лазеров до настоящего времени преимущественное положение продолжают занимать CO<sub>2</sub>-лазеры [1]. При этом происходит довольно жесткая конкуренция не только между изготовителями, но существует и определенное соперничество между разработчиками мощных технологических CO<sub>2</sub>-лазеров различных типов, к основным из которых относятся следующие две группы:

CO<sub>2</sub>-лазеры с конвективным охлаждением рабочей среды

– CO<sub>2</sub>-лазеры с аксиальной прокачкой газа и с возбуждением высокочастотным (ВЧ) разрядом или разрядом постоянного тока,

– CO<sub>2</sub>-лазеры с поперечной прокачкой газа и с возбуждением самостоятельным разрядом постоянного тока при различных схемах секционирования электродов,

CO<sub>2</sub>-лазеры с диффузионным охлаждением рабочей среды

– трубчатые волноводные и неволноводные CO<sub>2</sub>-лазеры с возбуждением разрядом постоян-

ного тока, ВЧ-разрядом и разрядом переменного тока звуковой частоты (от 5 до 30 кГц),

– щелевые CO<sub>2</sub>-лазеры с возбуждением ВЧ-разрядом.

Все эти лазеры имеют свои преимущества и недостатки, но наиболее сильно достоинства каждой из этих двух групп проявляются в определенном диапазоне средних мощностей излучения. Лазеры первой группы генерируют излучение высоких средних мощностей (от 1,5 кВт до 50 кВт). Для средних мощностей излучения (до 1–2 кВт) несомненными преимуществами по всем основным требованиям к промышленным лазерам обладают диффузионные CO<sub>2</sub>-лазеры, особенно по стоимости, габаритно-весовым характеристикам и эксплуатационным расходам.

Общие физические принципы работы волноводных лазеров были разработаны сравнительно давно.

К волноводным лазерам относятся газовые лазеры, например, СО-, CO<sub>2</sub>-лазеры, эксимерные Хе- и KrF-лазеры, в которых распространение лазерного излучения через активную среду происходит в волноводе. Идея использования полых волноводов в газоразрядных лазерах впервые была высказана Маркатили и Шмельцером в 1964 г. [2]. Отличие волноводных газоразрядных лазеров состоит в наличии полого, например, диэлектрического волновода между зеркалами, который выполняет несколько функций. С одной стороны, его внутренняя поверхность ограничивает объем, заполненный активной средой, с

другой стороны, он служит каналом, по которому распространяется лазерное излучение, является составной частью волноводного резонатора и определяет модовый состав излучения.

Для волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров легко реализуется основное их преимущество как технической системы – компактность конструктивного исполнения и снижение на этой основе массогабаритных показателей.

В  $\text{CO}_2$ -лазерах волновод представляет собой, как правило, газоразрядную трубку, имеющую длину значительно больше внутреннего диаметра, который, в свою очередь, может в сотни раз превышать длину волны излучения.

В зависимости от оптической схемы соединения трубок (параллельной или последовательной) можно получить однолучевую или многолучевую генерацию. В многоканальных волноводных решетках с числом трубок до 85 достигнуты средние мощности излучения до 6 кВт, а в однолучевом излучателе с числом трубок 20 шт. – до 1,4 кВт [3–4]. При этом удельные мощности излучения достигают 50 Вт/м.

Материалом разрядных трубок служит кварц или молибденовое стекло. Кварцевые трубки обладают большей диэлектрической и механической прочностью. Однако отечественная промышленность перестала выпускать кварцевые трубки с нужными геометрическими параметрами. В последние годы лазеры типорядом многоканальных технологических лазеров (МТЛ) (многоканальные технологические лазеры) комплектуются стеклянными трубками, выпускаемыми рядом российских предприятий. При сборке излучателя требуется только отбор по группам с учетом внешнего диаметра разрядной трубки, что связано с надежностью торцевого уплотнения между вакуумным объемом излучателя и объемом, заполненным охлаждающей жидкостью. Обработка внутренней поверхности разрядных трубок, как это иногда делается в волноводных излучателях, не требуется. Удельная мощность излучения зависит от волноводных потерь, которые напрямую связаны с диэлектрической проницаемостью разрядных трубок. Для кварца эта величина составляет около 2,2, для стекла – около 4, поэтому с точки зрения снижения волноводных потерь, которые достигают в нашем случае 3–5%, применение стекла предпочтительнее.

В неволноводных трубчатых лазерах реализовать многоканальные схемы намного сложнее, кроме того, их пространственные и энергетические характеристики сильно зависят от оптических неоднородностей усиливающей среды.

При одинаковой мощности однолучевого излучения расход рабочей газовой смеси для поддержания ее стабильного состава в волноводных лазерах почти на порядок меньше, чем в других трубчатых лазерах. С другой стороны, в неволноводных лазерах легче осуществляется юстировка резонатора.

Щелевые  $\text{CO}_2$ -лазеры имеют большую ширину разрядной области по сравнению с ее высотой, что зачастую вынуждает применять устойчиво-неустойчивые резонаторы, что, в свою очередь, не обеспечивает генерацию осесимметричного пучка.

В трубчатых  $\text{CO}_2$ -лазерах с возбуждением разрядом переменного тока звуковой частоты, в отличие от щелевых, используются более дешевые источники питания, а для вывода излучения высокого качества не требуется применять внешние оптические системы при формировании осесимметричного выходного пучка излучения.

Таким образом, мощные многоканальные волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры занимают важные позиции среди современных технологических лазеров и их развитие и совершенствование имеют большое практическое значение.

### **Волноводные технологические многоканальные $\text{CO}_2$ -лазеры**

В ИПЛИТ РАН для технологических применений много лет разрабатываются многоканальные волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры диффузионного охлаждения, возбуждаемые разрядом переменного тока звуковой частоты [3–5]. Этот тип технологических лазеров обладает рядом достоинств таких как:

- высокое качество (одна волноводная мода  $\text{EH}_{11}$ ) при однолучевом режиме генерации и высокая стабильность излучения за счет волноводного режима генерации,
- рекордные массогабаритные характеристики,
- возможность работы на смеси  $\text{CO}_2$ :He:воздух,
- низкие эксплуатационные расходы.

Одной из проблем, возникающих при создании мощных технологических волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров, генерирующих однолучевое излучение, является обеспечение одномодовой генерации в условиях длинных (десятки метров) резонаторов, когда большое число параллельно расположенных разрядных трубок с помощью поворотных зеркал образуют последовательную оптическую ось. При этом должен достигаться необходимый уровень термостабилизации элементов конструкции оптического резонатора, включая

газоразрядные трубки. В результате проведения теоретических и экспериментальных работ были выработаны требования к материалу и геометрическим характеристикам газоразрядных трубок и их пространственному расположению внутри резонатора, а также к точности юстировки оптических элементов резонатора. Были найдены эффективные оптические схемы, обеспечивающие однолучевую генерацию большого числа параллельно расположенных газоразрядных трубок. Полученные технические решения позволяют минимизировать потери излучения на открытых участках резонатора и в то же время обеспечивают необходимую пространственную селекцию одной основной моды.

Разработанные в ИПЛИТ РАН мощные однолучевые волноводные CO<sub>2</sub>-лазеры впервые в России стали применяться для операций на сердце при лечении ишемической болезни по методу трансмиокардиальной лазерной реваскуляризации миокарда [6].

Эти лазеры в последние годы начали использоваться для газолазерной резки листовых металлических материалов. Благодаря высокому качеству излучения они не уступают (при средней мощности излучения 1 кВт) по скорости и качеству резки CO<sub>2</sub>-лазерам с конвективным охлаждением средней мощности излучения 1,5 кВт

В табл. 1 представлены параметры качества пучка обсуждаемых волноводных лазеров в сравнении с другими типами CO<sub>2</sub>-лазеров.

Для технологических операций модификации поверхности (термоупрочнение, легирование, наплавка и др.), где не требуются очень высокое качество излучения и высокая концентрация энергии, а необходима ее высокая однородность на поверхности обрабатываемого изделия, разработаны модели волноводных лазеров с многолучевой генерацией, позволяющие получать среднюю мощность генерации до 6 кВт [3]. При этом распределение плотности мощности излучения на мишени имеет вид “по-

**Таблица 1.** Параметры качества пучка для волноводных лазеров в сравнении с другими типами CO<sub>2</sub>-лазеров

Параметры	Модель		
	ТЛ-1200 (ИПЛИТ)	ТЛ-1,5 (ИПЛИТ)	TruFlow 2000 (Trumpf)
Выходная мощность, кВт	1,2	1,5	2,0
Качество пучка, К	1,0	0,5	0,6

лочки” или так называемого супергауссово распределения.

### Модели ТЛ-300, ТЛ-1200, ТЛ-1500

В ИПЛИТ РАН разработана серия однолучевых волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров со средней мощностью излучения 300 Вт (модель ТЛ-300), 1200 Вт (модель ТЛ-1200), 1500 Вт (модель ТЛ-1500). Все три модели многоканальных однолучевых лазеров выполнены по моноблочной схеме.

На рис. 1 приведена оптическая схема излучателей. Излучение из параллельно расположенных трубок (от 9 до 27 шт.) с помощью угловых отражателей последовательно обходит все трубки, образуя тем самым один длинный резонатор. Вывод излучения осуществляется через полупрозрачное плоское зеркало из ZnSe.

Для малых (до 400 Вт) средних мощностей излучения оказалось технически возможным осуществить воздушное охлаждение излучателя, что существенно повышает эксплуатационную привлекательность лазеров. Такая схема реализована в модели ТЛ-300, внешний вид которой без защитного кожуха для лучшего понимания конструкции внутренних элементов лазера показан на рис. 2.

Для высоких средних мощностей генерации как и во всех предыдущих моделях серии МТЛ используется жидкостное охлаждение излучателей (трансформаторное масло, кремнийорганические жидкости). На рис. 3 показан внешний вид модели ТЛ-1200.

Все лазеры этой серии отличаются малыми габаритами и низкими эксплуатационными затратами, поскольку имеют достаточно высокий технический КПД (более 10%) и малый расход рабочей смеси (1–2 н.л./ч), т. е. нормальные



**Рис. 1.** Оптическая схема излучателей многоканальных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров диффузионного охлаждения. 1 – газоразрядные трубки, 2, 3 – поворотные зеркала, 4 – заднее зеркало резонатора, 5 – выходное зеркало резонатора.

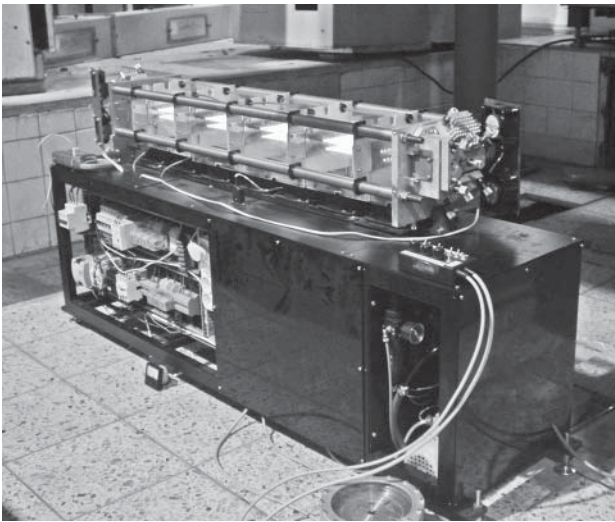


Рис. 2. Внешний вид лазера модели ТЛ-300 (без защитного кожуха).

(при атмосферном давлении) литры в час). Такой низкий расход связан с диффузионным режимом охлаждения рабочей смеси, малым диаметром разрядных трубок (7 мм) и, как следствие, малой деградацией смеси. Отметим, что типичный расход для  $\text{CO}_2$ -лазеров других конструкций, например, для лазеров с быстрой аксиальной прокачкой фирмы *Bystronic* (модель *Bystar-3015*, средняя мощность 1,8 кВт) составляет 44,6 н.л/ч; для лазеров с быстрой поперечной прокачкой разработки ИПЛИТ РАН (типоряд ТЛ-1,5, средняя мощность 1,5–2,5 кВт) до 60 н.л/ч. Следует заметить, что чистота газов для лазеров модели *Bystar-3015* должна быть не ниже, чем 99,996%. Лазеры типоряда МТЛ могут работать при замене азота на атмосферный воздух и поэтому мало чувствительны к чистоте газов, что повышает их эксплуатационную привлекательность. Возможна работа этих лазеров примерно 2–3 суток и в отпаянном режиме. Увеличение времени работы в отпаянном режиме связано с ужесточением требований к натеканию атмосферного воздуха в объем излучателя, что вызывает существенное удорожание конструкции лазера в целом.

Кроме того, за счет волноводного режима генерации легко осуществляется и поддерживается с высокой долговременной стабильностью одномодовый режим генерации. Распределение плотности мощности излучения модели ТЛ-1200 показано на рис. 4. Видно, что генерируется практически одна первая волноводная мода.

В табл. 2 приведены основные параметры рассматриваемых моделей волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров.

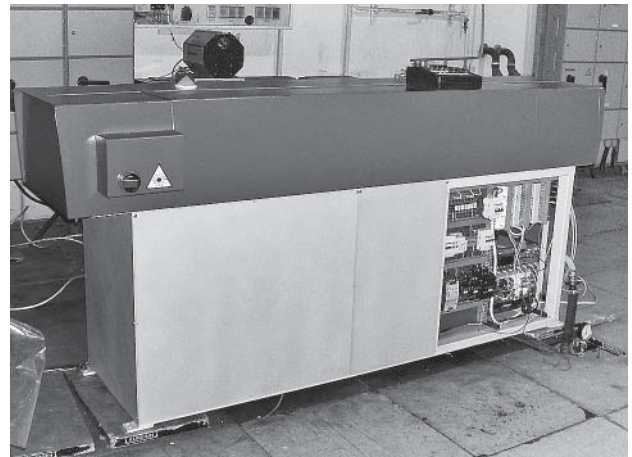


Рис. 3. Внешний вид лазера модели ТЛ-1200.

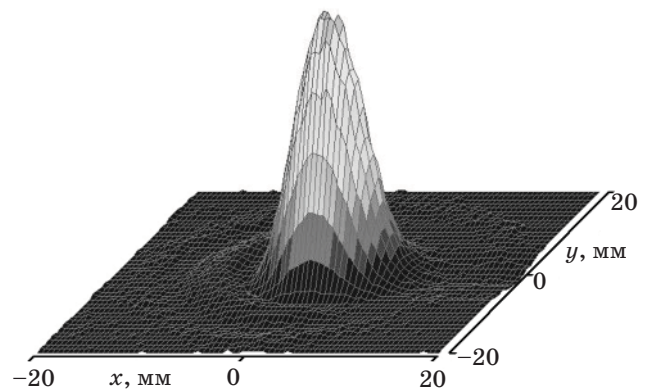


Рис. 4. Распределение плотности мощности излучения (модель ТЛ-1200). Расходимость по уровню мощности  $0,86 = 1,57$  мрад. Расходимость по уровню мощности  $0,9 = 1,67$  мрад.  $P = 1380$  Вт.

### Технологические применения и перспективы

Благодаря высоким параметрам качества излучения и эксплуатационным характеристикам волноводные однолучевые  $\text{CO}_2$ -лазеры со средней мощностью 300–1500 Вт нашли применение в технологии и медицине. Они эффективны в составе лазерных технологических комплексов для прецизионной резки металлических (толщиной до 10 мм) и неметаллических (толщиной до 40 мм) материалов, сварки, наплавки и изготовления деталей из композитных и металлических порошковых и нанопорошковых материалов.

В отличие от однолучевых многолучевые волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры характеризуются более высокой мощностью излучения (до 6 кВт),

**Таблица 2.** Основные технические характеристики

Параметры	Модель		
	ТЛ-300	ТЛ-1200	ТЛ-1500
Длина волны излучения, мкм	10,6	10,6	10,6
Средняя мощность, Вт	320	1200	1500
Импульсно-периодический режим, кГц	0,2–2,5	то же	то же
Стабильность мощности, %	<2	то же	то же
Апертура с телескопом, мм	20	то же	то же
Расходимость излучения с телескопом, мрад	0,8	то же	то же
Расход газовой смеси, н.л/ч	0,5	1,5	1,7
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	нет	0,7	0,9
Технический КПД, %	10	11	10
Габариты, м	0,6×0,6×1,5	0,6×1,2×2,2	0,7×1,2×2,4
Масса, кг	220	380	450
Охлаждение	воздух	жидкость	жидкость

имеют достаточно высокую расходимость излучения (до 4 мрад). Они используются в промышленности в основном для лазерной закалки, легирования, наплавки и других технологических операций, в которых не требуется относительно высокой концентрации лазерного излучения.

Существует перспектива дальнейшего расширения технологических применений волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров. Ее реализация связана с использованием внешнего растрового отражающего корректора волнового фронта, позволяющего уменьшить почти вдвое расходимость излучения. Кроме того, повышение яркости излучения обеспечивает применение комбинированной оптической схемы, в которой оптически соединены последовательные секции трубок. Каждая секция состоит из ограниченного числа трубок (не более 4–5), оптически соединенных параллельно. Такая схема сочетает преимущества однолучевого и многолучевого вариантов и может обеспечивать среднюю мощность излучения 4–5 кВт с расходимостью по уровню 1/e<sup>2</sup> около 1,5–2 мрад при общей апертуре 2 см.

После реализации таких перспективных разработок область промышленного применения волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров, несомненно, должна расширяться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Schlueter H.* Advances in industrial power lasers // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 8–15.
2. *Degnan J.J.* The waveguide laser: A review // Appl. Phys. 1976. V. 11. № 1. P. 1–33.
3. *Galushkin M.G., Golubev V.S., Panchenko V.Ya., Roshin A.P., Soloviev A.V., Vasiltsov V.V.* High power waveguide industrial CO<sub>2</sub> lasers // Proc. SPIE. 1995. V. 2713. P. 76–84.
4. *Бондаренко А.И., Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Низьев В.Г., Панченко В.Я., Забелин А.М., Завалов Ю.Н., Якунин В.П.* Мощные технологические CO<sub>2</sub>-лазеры с высоким качеством излучения // Перспективные материалы. 1999. № 2. С. 60–67.
5. *Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Roshin A.P., Soloviev A.V.* Waveguide high-power industrial CO<sub>2</sub> lasers // Proc. SPIE. 2000. V. 4165. P. 169–177.
6. *Беришвили И.И., Бокерия Л.А., Васильцов В.В., Вахромеева М.Н., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Егоров Э.Н., Забелин А.М., Зеленев Е.В., Иошина В.И., Панченко В.Я., Роцин А.П., Сигаев И.Ю., Хелимский А.А.* Мощный волноводный одномодовый CO<sub>2</sub>-лазер с диффузионным охлаждением для трансмиокардиальной реваскуляризации // Известия РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 10. С. 2059–2065.