

Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт

Ю.В.Афонин, А.П.Гольшев, А.И.Иванченко, А.Н.Малов, А.М.Оришич, В.А.Печурин, В.Ф.Филев, В.Б.Шулятьев

Благодаря использованию в лазере самофильтрующего резонатора получено высокое качество пучка в сочетании с большой мощностью излучения. Максимальная мощность излучения равна 8.3 кВт при электрооптической эффективности 11.3%. По оценке, в электроразрядных CO₂-лазерах с самофильтрующим резонатором достижима мощность до 20 кВт при высоком качестве пучка.

Ключевые слова: CO₂-лазер, оптический резонатор, качество пучка.

Мощные CO₂-лазеры широко применяются для обработки материалов и в научных исследованиях. В настоящее время промышленно выпускаются непрерывные CO₂-лазеры мощностью до 20 кВт. Важной характеристикой лазерного пучка является его качество, определяющее, наряду с мощностью излучения W , яркость пучка $J \sim WK^2/\lambda^2$, где K – параметр качества пучка.

Требования большой мощности и высокого качества пучка противоречивы. Для повышения объема активной среды необходимо увеличение апертуры и числа Френеля N оптического резонатора. При $N > 1$ в устойчивом резонаторе возбуждаются поперечные моды высших порядков, и качество пучка ухудшается. При генерации на TEM₀₀-моды ($K = 0.6 - 0.9$) мощность излучения не превышает 3–4 кВт [1–3]. При мощности 8–10 кВт параметр качества составляет ~ 0.25 [1, 2], а при мощности 30 кВт он равен ~ 0.1 [4], т. е. расходимость излучения уже на порядок больше предельной дифракционной.

В течение последнего десятилетия для мощных CO₂-лазеров предложены и реализованы резонаторы, позволившие повысить мощность излучения до 5–6 кВт при сохранении высокого качества пучка. Это – различные разновидности резонаторов с полупрозрачным выходным зеркалом, имеющим неоднородное по радиусу отражение [5–7], и устойчиво-неустойчивый резонатор из полностью отражающих зеркал [2, 8]. При использовании резонаторов с неоднородными зеркалами максимальная мощность 6.2 кВт достигнута в схеме, рассмотренной в [6]. В этой схеме число Френеля равно 1.5, а мощность излучения ограничена малым модовым объемом. Недостатком схем из работ [5–7] является применение технологически сложного неоднородного полупрозрачного зеркала. Поглощение излучения в таком зеркале может быть причиной фазовых искажений пучка

(это наблюдалось в [6]). В устойчиво-неустойчивом резонаторе, который применялся в лазере с поперечным потоком [8] и в промышленных слэб-лазерах мощностью до 4.5 кВт [2], осуществлялся боковой вывод излучения. Эта схема плохо согласуется с активными средами, имеющими аксиальную симметрию. Выходное излучение характеризуется прямоугольным сечением и существенно негауссовым распределением интенсивности; для корректировки пространственной структуры пучка проводится его пространственная фильтрация [2]. При мощности 10–20 кВт фильтрация может оказаться практически неприемлемой из-за сложности технической реализации. Кроме того, при пространственной фильтрации теряется значительная часть мощности излучения.

В настоящей работе в непрерывном CO₂-лазере получена генерация излучения с высоким качеством пучка, близким к качеству TEM₀₀-моды при мощности излучения 8 кВт. В лазере использовался самофильтрующий резонатор из полностью отражающих зеркал с числом Френеля 6.5.

Самофильтрующий резонатор [9–11] (рис.1) представляет собой конфокальный резонатор из вогнутых сферических зеркал разной кривизны с внутрирезонаторным пространственным фильтром. Качество пучка растет с ростом геометрического увеличения резонатора $M = f_1/f_2$, поскольку происходит уменьшение относительного размера отверстия связи и перераспределение энергии в дальней зоне из побочных дифракционных максимумов в центральное пятно. Число Френеля большего плеча резонатора N_1 пропорционально M , величина обратной связи R' , наоборот, уменьшается с ростом

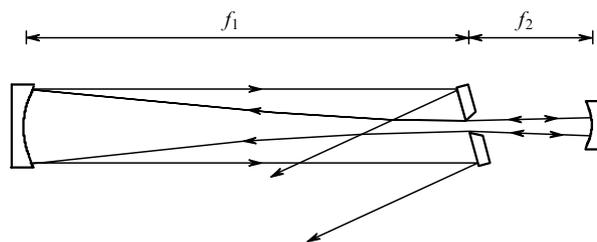


Рис.1. Принципиальная оптическая схема самофильтрующегося резонатора.

Ю.В.Афонин, А.П.Гольшев, А.Н.Малов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: shulyat@itam.nsc.ru
В.А.Печурин, В.Ф.Филев. ОКБ лазерной техники при СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/18

Поступила в редакцию 8 сентября 2003 г., после доработки – 22 января 2004 г.

M : $R' \approx 2/M^2$. Малая обратная связь при больших M , когда как раз и проявляются полезные свойства самофильтрующего резонатора (высокое качество пучка и большой модовый объем), требует значительного усиления активной среды для обеспечения высокой эффективности преобразования энергии в резонаторе. Этой особенностью, безусловно сужающей сферу применения такого резонатора, посвящена статья [12].

Как показали проведенные нами расчетные и экспериментальные исследования, в непрерывном проточном электроразрядном CO_2 -лазере с самофильтрующим резонатором могут быть одновременно достигнуты достаточно большой объем низшей моды, высокая эффективность преобразования энергии в резонаторе и высокое качество выходного пучка. Распределение поля в резонаторе рассчитывалось численно на основе дифракционного интеграла Френеля – Кирхгофа итерационным методом [13, 14]. Из расчетов следует, что уже при $M > 4$ – 4.5 за пределами центрального пятна в дальней зоне находится менее 0.1 – 0.08 всей мощности пучка, а интенсивность первого побочного максимума составляет менее 0.007 – 0.005 осевой интенсивности. Таким образом, выходной пучок приближается по качеству к гауссову. Коэффициенту увеличения $M = 4$ – 5 соответствуют $N_1 \approx 5.5$ – 7 и $R' = 0.12$ – 0.08 .

Конструкция лазера, на котором проводились эксперименты, описана в [11]. Активная среда возбуждается самостоятельным разрядом постоянного тока в поперечном потоке газа. Разрядная система включает в себя два разрядных промежутка, имеющих по два трубчатых катода и общий плоский анод. Расстояние катод–анод составляет 55 мм в каждом разрядном промежутке, длина электродной системы вдоль направления распространения излучения в резонаторе равна 110 см, скорость газа в разрядных промежутках – 50 м/с. Давление газовой смеси в разрядной камере составляет 24 Тор при соотношении парциальных давлений компонентов $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 10 : 50 : 40$.

В большем плече резонатора луч совершает по три прохода в каждом разрядном промежутке по Z-образной траектории. Коэффициент увеличения резонатора равен 4.5 , длина резонатора вдоль оптической оси – 11.25 м, апертура зеркал – 50 мм. Максимальная мощность излучения составляет 8.3 кВт при эффективности (отношение мощности излучения ко вкладываемой в разряд электрической мощности) 11.3% . В резонаторе использовались медные охлаждаемые водой зеркала. Излучение выводится из разрядной камеры через окно из просветленного ZnSe .

Распределение интенсивности в сфокусированном пучке измерено методом вращающегося отражающего цилиндра [15, 16]. Сканирование пучка цилиндрическим зеркалом эквивалентно сканированию щелью, ширина которой в геометрическом приближении равна $aR/(2L)$, где a – размер апертуры фотоприемника, L – расстояние от цилиндра до фотоприемника, R – радиус цилиндра. По оценкам, пространственная разрешающая способность метода при выбранных параметрах измерительной системы составляет 30 – 50 мкм. Излучение фокусировалось менисковой ZnSe -линзой с фокусным расстоянием $F = 190.5$ мм, которая используется в экспериментах по резке. Диаметр лазерного пучка после прохождения согласующего зеркального телескопа уменьшался до 30 мм на входе в линзу. Измеренное распределение интенсивности

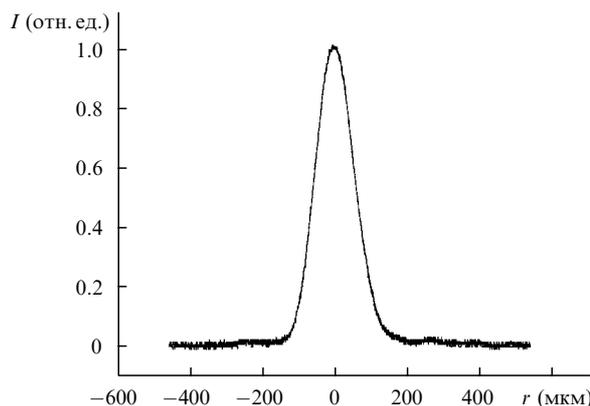


Рис.2. Распределение интенсивности в перетяжке сфокусированного пучка.

(рис.2) в большей части сечения имеет характерную для TEM_{00} -моды колоколообразную форму и слабо выраженные побочные максимумы. Диаметр пучка по половине максимальной интенсивности равен 125 мкм, диаметр центрального пятна по основанию – 330 мкм.

Сделанная по результатам измерений оценка параметра качества пучка дает $K = 0.6$ – 0.7 . Не замечено изменения осевой интенсивности, формы и диаметра фокального пятна при изменении мощности излучения от 0.5 до 6 кВт.

Из рис.1 видно, что по характеру заполнения активной среды излучением самофильтрующийся резонатор близок к неустойчивому телескопическому резонатору. Эффективность самофильтрующегося резонатора (11.3%) близка к эффективности 10% – 12% , типичной для непрерывных CO_2 -лазеров с поперечным потоком, самостоятельным разрядом постоянного тока и неустойчивым телескопическим резонатором [17, 18]. Следует отметить, что в лазерах с одномодовым (TEM_{00}) устойчивым резонатором электрооптическая эффективность меньше (8% – 9%) [3].

Насколько нам известно, мощность 8 кВт является в настоящее время максимальной для непрерывных CO_2 -лазеров с высоким качеством пучка. Полученная мощность может быть повышена при увеличении давления газовой смеси и удельного объемного энерговклада. При возбуждении активной среды разрядом переменного тока или высокочастотным разрядом может быть достигнута плотность накачки, в 2 – 4 раза превышающая значение 5 – 7 Вт/см³, характерное для самостоятельного разряда постоянного тока [3, 4]. Таким образом, в качестве оценки верхней границы достижимой мощности при приведенных параметрах резонатора можно принять мощность 15 – 25 кВт.

Эксперименты по резке металлов при толщинах пластин 0.5 – 30 мм и мощности 0.5 – 6 кВт показали, что скорость резки и основные характеристики реза (отсутствие грата, прямизна и шероховатость кромок, ширина реза) приблизительно одинаковы для лазеров с самофильтрующим и устойчивым резонаторами (результаты экспериментов готовятся к публикации).

Приведенные результаты и их сравнение с данными, полученными при использовании других схем резонаторов, дают основание считать самофильтрующийся резонатор оптимальным для CO_2 -лазеров мощностью 5 – 20 кВт с высоким качеством излучения.

1. *Технические данные лазеров Trumpf*. <http://www.us.trumpf.com>.
2. *Технические данные лазеров Rofin-Sinar*. <http://www.rofin.com/home-e.htm>.
3. Yasui K., Kuzumoto M., Ogawa S., Tanaka M., Yagi S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 836 (1989).
4. Habich U., Hertzler C., Wollermann-Windgase R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2702**, 374 (1996).
5. Takenaka Y., Kuzumoto M., Yasui K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1855 (1992).
6. Takenaka Y., Nishimae J., Tanaka M. *Opt. Lett.*, **22**, 37 (1997).
7. Generalov N.A., Solov'yov N.G., Yakimov M.Y., Zimakov V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3267**, 144 (1998).
8. Galushkin M.G., Golubev V.S., Korotchenko A.V., Zabelin A.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 134 (1996).
9. Gobbi P.G., Reali G.C. *Opt. Commun.*, **52**, 195 (1984).
10. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **16**, 305 (1989).
11. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Смирнов А.Л., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **21**, 643 (1994).
12. Siegman A. *Opt. Commun.*, **88**, 295 (1992).
13. Ананьев Ю.А. *Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения* (М.: Наука, 1979).
14. Ананьев Ю.А., Аникичев С.Г., Соловьев В.Д. *Оптика и спектроскопия*, **73**, 173 (1992).
15. Иванченко А.И., Шепеленко А.А. А.с. СССР № 646774 (1977).
16. Lim G.C., Steen W.M. *J. Phys. E: Sci. Instr.*, **17**, 999 (1984).
17. Cheng Z., He X., Li Z. *Appl. Opt.*, **24**, 4260(1985).
18. Takahashi T., Kakizaki K., Sasaki N., Sakuma J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **610**, 50 (1986).