

В.В. Осипов, М.Г. Иванов, В.В. Лисенков

**ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕР, НАКАЧИВАЕМЫЙ КОМБИНИРОВАННЫМ РАЗРЯДОМ**

Сообщается о результатах исследований энергетических и генерационных характеристик экспериментального макета технологического CO<sub>2</sub>-лазера, разработанного на основе оригинального метода комбинированного возбуждения объемного разряда. Активный объем разрядной зоны при проведении испытаний составлял 1000 см<sup>3</sup>. Скорость прокачки газа через разрядный промежуток 50 м/с. Длина разряда по направлению оптической оси 80 см. Исследована работа лазера при различных режимах накачки и давлениях газовых смесей, содержащих водород, в безгелиевых смесях, а также длительная работа без замены газа в смесях, содержащих СО. Показано, что в таких системах можно достичь высоких кпд, примерно 22%, а при снижении доли катодного падения – и 28%. Удельная мощность излучения может составлять единицы Вт/см<sup>3</sup>.

В настоящее время создание высокоэффективных и масштабируемых CO<sub>2</sub>-лазеров остается по-прежнему важным как для решения технологических задач, так и для разработки крупномасштабных лазерных систем.

В подобных устройствах, как правило, накачка и, соответственно, генерация излучения осуществляются в непрерывном режиме, когда возбуждается вся рабочая среда, прокачиваемая через разрядный объем, и таким образом достигаются хорошие энергетические параметры и экономическое соотношение между объемом газа, прокачиваемого через разрядный промежуток, и выводимой энергией излучения. В импульсном же режиме большая часть газа через разрядный объем прокачивается за промежуток времени между импульсами и оказывается невозбужденной.

Однако по воздействию на мишень более эффективным является импульсно-периодическое излучение. В связи с этим длительное время ведется поиск импульсно-периодических методов возбуждения рабочей среды [1 – 3], которые обеспечивали бы высокие удельные энергетические характеристики, масштабируемость и большую эффективность лазера.

Целью настоящей работы является исследование энергетических возможностей и эффективности импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера, накачиваемого комбинированным разрядом, в цепях возбуждения которого отсутствуют элементы, принципиально ограничивающие токи самостоятельного и несамостоятельного разрядов.

Для обоснованного выбора режима возбуждения рабочей среды проводилось численное моделирование работы CO<sub>2</sub>-лазера. При этом решалась система уравнений для электронов, ионов (O<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, He<sup>+</sup>) и нейтральных компонентов газовой среды: N<sub>2</sub>(v = 1÷5), CO<sub>2</sub>(001), CO<sub>2</sub>(01÷30), CO<sub>2</sub>(100). Используемые плазмохимические реакции и их константы были взяты из [4–6]. Константы реакций с участием электронов, зависящих от напряженности электрического поля, вычислялись с помощью уравнения Больцмана, вид и численная схема решения которого приведены в [4].

Численному анализу были подвергнуты наиболее используемые методы возбуждения лазеров: непрерывный самостоятельный разряд, непрерывный несамостоятельный разряд с оптимальной напряженностью поля для передачи энергии на верхний лазерный уровень, импульсный несамостоятельный разряд с экспоненциально спадающим током (при постоянном и оптимальном поле). Значение  $E/N$  (где  $E$  – напряженность электрического поля;  $N$  – концентрация частиц газа) для самостоятельного разряда выбиралось из условия

$$K_O N_{CO_2} + \beta N_i = K_{iCO_2} N_{CO_2} + K_{iN_2} N_{N_2} + K_{iHe} N_{He}.$$

Здесь  $K_O$  – константа диссоциативного прилипания;  $\beta$  – коэффициент рекомбинации;  $K_{iCO_2}$ ,  $K_{iN_2}$ ,  $K_{iHe}$  – константы ионизации соответственно CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He;  $N_{CO_2}$ ,  $N_{N_2}$ ,  $N_{He}$  – концентрация ионов.

Данные расчетов приведены на рис. 1 в виде зависимости эффективности генерации от удельной приведенной энергии, переданной в среду в процессе прокачки газа через активную зону лазера. Видно, что наибольший КПД реализуется в импульсном режиме (кривая 1). Различия в эффективностях накачки несамостоятельным разрядом импульсного и непрерывного действия (кривые 2, 3) обусловлены, в основном, потерями на  $V-T$ -релаксацию. Эффективность лазера еще более уменьшается при накачке среды самостоятельным разрядом (кривая 4) из-за неоптимального для передачи энергии на верхний лазерный уровень соотношения  $E/N$ . Однако следует заметить, что эта разница будет уменьшаться при увеличении межэлектродного расстояния [7].

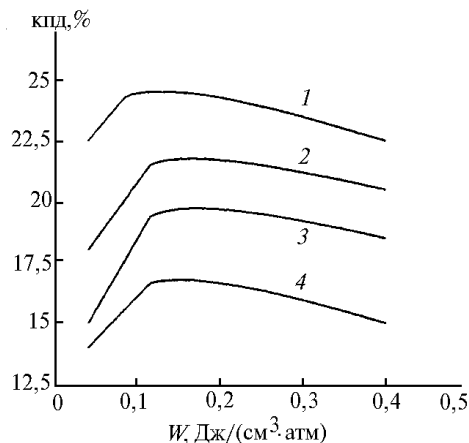


Рис. 1. Зависимость КПД  $\text{CO}_2$ -лазера от удельного энерговклада в среду при различных способах накачки. Смесь  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 8$ , давление 0,1 атм, скорость прокачки 50 м/с. 1 – комбинированный разряд, импульсный режим; 2 – несамостоятельный разряд, ширина электродов 3,5 см; 3 – несамостоятельный разряд, ширина электродов 5 см; 4 – самостоятельный разряд, непрерывный режим

Для реализации оптимального импульсного возбуждения среды нами был использован комбинированный разряд. Метод возбуждения отличается от известных отсутствием в цепях самостоятельного и несамостоятельного разрядов элементов, ограничивающих ток. При этом 90–97 % всей мощности поступает в газ при несамостоятельном разряде, как и в случае иницирования разряда электронным пучком. Это создает предпосылки для получения высоких КПД, удельных энергетических характеристик и обеспечения масштабируемости разряда. Схема, реализующая данный метод, аналогична приведенной нами в [8].

При проведении экспериментов объем разрядной зоны составлял 1 л. Скорость прокачки газа через разрядный промежуток 50 м/с. Длина разряда по направлению оптической оси 80 см. Для определения энергетических характеристик излучение выводилось простейшим устойчивым резонатором с вогнутым медным зеркалом ( $R = 20$  м, коэффициент отражения 98 %) и плоским зеркалом из  $\text{ZnSe}$  с напылением (с коэффициентом отражения 80 %). Расстояние между зеркалами 1,4 м.

Нами были исследованы предельные энергетические режимы работы лазера в различных средах и условиях накачки. Дальнейшее повышение энергетики ограничивалось контракцией разрядного промежутка.

Зависимости введенной мощности и мощности излучения от частоты следования импульсов возбуждения приведены на рис. 2.

Поскольку в диапазоне низких частот (до 400–500 Гц) мощность накачки линейно растет с увеличением частоты следования импульсов, то и мощность излучения на этом участке растет линейно. При больших частотах происходит насыщение, а затем спад (кривая 1) мощности, вводимой в газ, и, следовательно, мощности излучения. В проводимых экспериментах был замечен устойчивый максимум энерговкладов в несамостоятельный разряд на частотах ~900 Гц для безводородных смесей и ~600 Гц для смесей, содержащих водород, хотя самостоятельный разряд устойчиво горел на частотах до 3–4 кГц. По-видимому, это связано с процессами интенсивного энерговыделения в наименее устойчивой части разряда – катодном слое и, соответственно, с развитием неустойчивостей в прикатодной области. Проведенные расчеты показали, что для условий эксперимента длина зоны катодного падения практически равнялась толщине пограничного слоя Прандтля. Поэтому время между импульсами, которое боль-

ше, чем время однократной смены газа в разрядном промежутке, обусловлено необходимостью полной смены газа в плохо прокачиваемом пограничном приэлектродном слое. Одновременно с этим, видимо, имеет место развитие акустических процессов [9]. В момент начала протекания тока через разрядный промежуток в обе стороны по потоку газа уходит ударная волна, усиливающаяся в зоне несамостоятельного разряда. Следовательно, перерыв между импульсами необходим для того, чтобы все созданные неоднородности плотности газа ушли вместе с потоком.

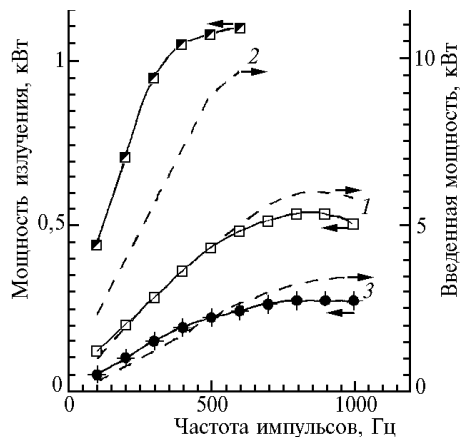


Рис. 2. Зависимость введенной мощности и мощности излучения от частоты следования импульсов самостоятельного разряда. 1 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 4$ , давление 90 мм рт. ст.; 2 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{H}_2 = 3 : 10 : 26 : 3$ , давление 90 мм рт. ст.; 3 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 3$ , давление 40 мм рт. ст.

Различие же в максимумах излучения для безводородных (800÷900 Гц) и водородсодержащих (400÷600 Гц) смесей, очевидно, связано с нагревом рабочего газа при больших мощностях накачки, которые для смесей, содержащих водород, достигаются на более низких частотах следования импульсов разряда.

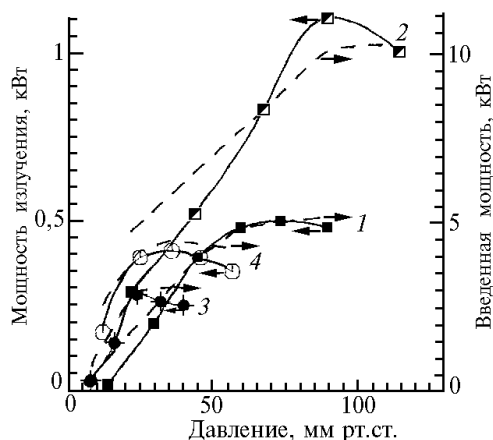


Рис. 3. Зависимость введенной мощности и мощности излучения от давления газовой смеси, частота следования импульсов 700 Гц. 1 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 4$ ; 2 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{H}_2 = 3 : 10 : 26 : 3$ ; 3 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 3$ ; 4 –  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{H}_2 = 1 : 3 : 0,5$ , частота импульсов 300 Гц

На рис. 3 приведены зависимости предельных введенных мощностей и мощностей излучения от давления смесей газов. Такое поведение кривых можно объяснить рядом конкурирующих процессов, ведущих как к нарастанию, так и к снижению мощности излучения. С одной стороны, увеличение давления ведет к увеличению вводимой в разряд мощности и увеличению числа возбужденных молекул, что обуславливает возрастание мощности излучения. С другой стороны, рост давления приводит к увеличению скорости  $V$ - $T$ -релаксации, уширению линии и соответственно к снижению коэффициента усиления, что выражается в уменьшении мощности излучения. При высоких давлениях газовой смеси (особенно ее молекулярной компоненты) снижается устойчивость разряда и соответственно мощность, рассеянная в газе, ухудшается однородность плазмы разряда.

Для определения оптимального состава газовой смеси были приведены эксперименты по выбору соотношения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  в смеси газов (рис. 4).

Измерения выполнялись на первых включениях (кривая 1) и через  $10^6$  включений (кривая 2). Парциальное давление гелия составляло 40 мм рт. ст., а смеси  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  30 мм рт. ст. С увеличением доли  $\text{CO}_2$  в газовой смеси мощность, рассеянная в активном объеме, спадала.

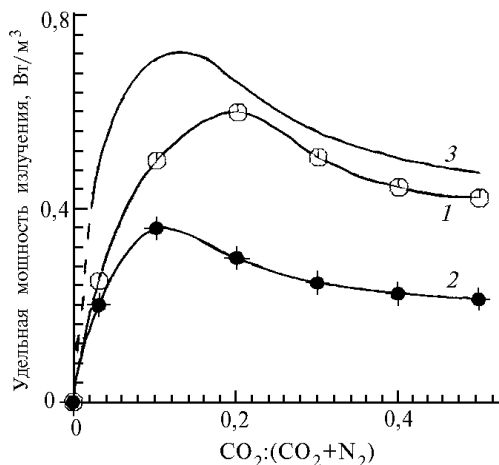


Рис. 4. Зависимость удельной мощности излучения от содержания  $\text{CO}_2$  в смеси газов. Частота следования импульсов 700 Гц. Давление He = 40 мм рт. ст.,  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 30$  мм рт. ст. 1 – на первых включениях; 2 – через  $10^6$  включений; 3 – расчетная

На первых включениях максимальная мощность излучения была получена при соотношении  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 = 1 : 4$ . Однако через  $10^6$  включений оптимальными оказались смеси, где соотношение  $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2)$  не превышало 0,1. Очевидно, что при малых концентрациях  $\text{CO}_2$  его разложение в меньшей степени сказывается на работе лазера.

Авторами было проведено численное моделирование. Были рассчитаны зависимости предельной удельной мощности от соотношения  $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2)$  для указанных условий (кривая 3 на рис. 4). Рост удельной мощности излучения при малых парциальных давлениях  $\text{CO}_2$  обусловлен ростом КПД, связанным с уменьшением доли релаксационных  $V\text{-}T$ -потерь, и ростом коэффициента усиления.

При отношении  $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{N}_2) > 0,15$ , КПД практически перестает расти с увеличением доли  $\text{CO}_2$ , а у кривой удельной мощности наблюдается спад. Он объясняется уменьшением энерговклада в среду, что связано с более интенсивным диссоциативным прилипанием электронов к  $\text{CO}_2$ , уменьшающим длительность импульса тока.

В ходе экспериментов была найдена смесь газов:  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 4 : 8$  с давлением 80 мм рт. ст., где на первых включениях зарегистрирован максимальный КПД 28% (без учета доли энергии, приходящейся на катодное падение). Однако для данной смеси газов в процессе работы КПД лазера быстро падал вследствие диссоциации  $\text{CO}_2$  и появления в смеси газов новых компонент  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ . Причем появление в смеси газов  $\text{O}_2$  вело при прочих равных условиях к уменьшению мощности накачки из-за увеличения скорости прилипания электронов к  $\text{O}_2$  и уменьшению тока несамостоятельного разряда.

Для исследования долговременных режимов работы лазера были использованы смеси газов, содержащие  $\text{CO}$ , в которых за счет обратных процессов  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$  возможно поддержание начального газового состава. Так, для смеси  $\text{CO}_2 : \text{CO} : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 10 : 20$  спад мощности излучения не превышал 10% за  $10^6$  включений.

Таким образом, в результате работы на экспериментальном макете технологического  $\text{CO}_2$ -лазера был реализован новый импульсно-периодический режим накачки, показано, что в таких системах реально достижение высоких КПД – до 22%, а при снижении доли катодного падения и 28%, удельная мощность может составлять единицы  $\text{Вт/см}^3$ . Возможна работа лазера (с некоторым снижением КПД) на безгелиевых смесях, а также долговременная работа без замены газа в смесях, содержащих  $\text{CO}$ .

1. Reilly J. R. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. N 8. P. 3411–3416.
2. Hill A. E. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. N 12. P. 670–673.

3. Bychkov Yu.J., Osipov V.V., Telnov V.A. // J. de Physique. 1979. V. 40. P. C7-161-162.
4. Лобанов А.Н., Сучков А.Ф. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. N 7. С. 1527-1536.
5. Hozakono H., Fujimoto H. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 5. P. 1585-1594.
6. Taylor R., Bitterman S. // Rev. of Modern Phys. 1969. V. 41. N 1. P. 26-47.
7. Reilly J.P. // SPIE Vol. 1397 Eighth International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers. 1990. P. 339-351.
8. Иванов М.Г., Мухачев С.В., Осипов В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 11. С. 1616-1621.
9. Dzacowic G.S., Waztke S.A. // J. Appl. Phys. 1973. V. 46. N 4. P. 5061-5063.

Институт электрофизики УрО РАН,  
г. Екатеринбург

Поступила в редакцию  
2 июня 1997 г.

V.V. Osipov, M.G. Ivanov, V.V. Lisenkov. **Pulsed Repetitive CO<sub>2</sub> Laser Pumped by Combined Discharge.**

The paper reports about results of investigations carried out on the experimental model of processing CO<sub>2</sub> laser developed on the basis of original technique of space discharge excitation. Active volume of discharge gap in experiments was 1000 cm<sup>3</sup>. Gas flow velocity through the discharge gap was 50 m/s. Discharge length along optical axis was 80 cm. The dependencies of the maximum input energy and generation characteristics from discharge frequency, pressure and composition of gas mixture are shown. Specific power output of the order of 1 W/cm<sup>3</sup> and the efficiency of 22-28% were obtained.