

**М.Г. Иванов, С.В. Мухачев, В.В. Осипов**

## **МОЩНЫЙ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕР С КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Сообщается о создании экспериментального макета технологического СО<sub>2</sub>-лазера, разработанного на основе оригинального метода возбуждения объемного разряда. Активный объем разрядной зоны при проведении испытаний составлял 560 см<sup>3</sup>. Устойчивая работа лазера была получена в следующих экспериментальных условиях: состав газовой смеси СО<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:8:12 при давлении 40 Торр, скорость прокачки газовой смеси в зоне разряда ~75 м/с, частота следования импульсов самостоятельного разряда ~3,5 кГц. Средняя мощность, рассеиваемая в активном объеме на стадии несамостоятельного разряда, равнялась 4,5 кВт, что соответствует удельному энергокладу 8 Вт/см<sup>3</sup>. Приведены результаты исследования энергетических характеристик лазера в непрерывном и импульсно-периодических режимах.

В связи с возможностью применения газовых лазеров импульсно-периодического и непрерывного действия в таких областях, как резка материалов, закалка поверхностного слоя деталей и т.п., встают вопросы о больших удельных мощностях, высоком КПД и долговечности лазера. Известны несколько типов технологических (с мощностью излучения 1÷10 кВт и более) СО<sub>2</sub>-лазеров, которые созданы на основе различных методов зажигания объемного разряда.

Основной недостаток всех этих методов заключается в том, что они имеют принципиальные ограничения на удельные энергетические характеристики объемного разряда или малый срок службы отдельных частей лазера. Так, электроионизационный метод возбуждения активной среды позволяет создавать лазеры с высокими удельной мощностью и энергией излучения и КПД, близким к квантовому. Однако применение электронного пучка приводит к появлению у электроионизационных лазеров ряда недостатков: сложность конструкции и эксплуатации, небольшой срок службы и низкая надежность (из-за разрушения разделительной фольги).

В электроразрядных лазерах, возбуждаемых самостоятельным разрядом, поддержание высокой напряженности поля в процессе ввода энергии существенно снижает эффективность накачки лазера и увеличивает вероятность перехода разряда в контрагированное состояние. Что касается лазеров с комбинированным возбуждением, то технические возможности применяемых способов не позволяли осуществить высокий удельный энергоклад.

Наиболее интересной из опубликованных за последнее время работ по комбинированному возбуждению СО<sub>2</sub>-лазеров является работа [1], в которой развязку импульсного источника, создающего в разрядном промежутке плазму, и источника питания самостоятельного разряда осуществляют пространственным разнесением зон самостоятельного и несамостоятельного разрядов. Используя в качестве самостоятельного разряда через диэлектрик (электроды – стальные трубочки, покрытые стеклом), а также высоковольтный, высокочастотный (~100 кГц), мощный (7,2 кВт) источник питания, удалось получить высокие удельные энергоклады в активную среду (10÷15 Вт/см<sup>3</sup>).

Однако полученные результаты, видимо, являются предельными для данного метода возбуждения активной среды. Это связано с тем, что при пространственной развязке зон самостоятельного и несамостоятельного разрядов, с ростом концентрации электронов в зоне самостоятельного разряда, процесс рекомбинации будет опережать процесс переноса электронов за счет диффузии в зону несамостоятельного разряда. Кроме этого, в [1] не указана продолжительность срока службы электродов самостоятельного разряда.

В настоящее время найден метод [2], позволяющий получить удельные энергоклады, которые по крайней мере на порядок больше известных результатов. Такой метод был реализован лишь на макете электродной системы, состоящей из двух полусферических электродов с разделительной сеткой (рабочий объем 83 см<sup>3</sup>) [3].

В представленной работе предпринята попытка создать на основе данного метода комбинированного возбуждения объемного разряда экспериментальный макет технологического  $\text{CO}_2$ -лазера.

### Методика эксперимента

Для решения проблемы создания высокоэффективных  $\text{CO}_2$ -лазеров с большим объемом активной среды, способных работать при средних давлениях (10–100 мм рт.ст.), предложены метод комбинированного возбуждения объемного разряда и электрическая схема, реализующая его [2]. Концентрация электронов в рабочей среде создается коротким самостоятельным разрядом, а основная доля энергии (более 90%) вводится в несамостоятельном разряде при оптимальной напряженности поля. Схема возбуждения приведена на рис. 1.

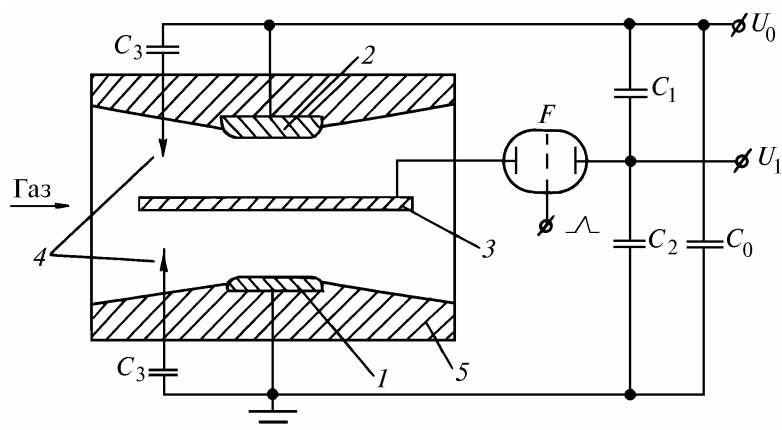


Рис. 1. Схема возбуждения комбинированного разряда: 1, 2 – электроды основного разряда; 3 – промежуточный электрод; 4 – электроды подсветки; 5 – разрядная камера

Комбинированный разряд возбуждается в разрядных промежутках, образованных двумя профилированными электродами 1 и 2 и промежуточным 3. Источником питания несамостоятельного разряда служит емкостный накопитель  $C_0$ , заряженный до оптимального для накачки среды напряжения  $U_0$  и подключенный к профилированным электродам 1 и 2. Самостоятельный разряд, обеспечивающий создание в активном объеме плазмы с заданной концентрацией, возбуждается в промежутках 3–1 и 3–2. Источниками питания этих разрядов служат генераторы, собранные на емкостях  $C_1$  и  $C_2$ , с общим коммутатором  $F$ . Емкости  $C_3$  с острями 4 используются для предварительной ионизации рабочей среды.

Наличие промежуточного электрода 3 и применение раздельного питания самостоятельных разрядов в промежутках 3–1 и 3–2 с общим коммутатором позволяют осуществить электрическую развязку цепей без применения элементов, ограничивающих токи самостоятельного и несамостоятельного разрядов.

Возбуждение комбинированного разряда (самостоятельного и несамостоятельного) производится следующим образом. В исходном состоянии накопители  $C_1$  и  $C_2$  заряжены до напряжения  $U_1$ , а  $C_0$  до напряжения  $U_0$ . После срабатывания коммутатора  $F$  к промежуткам 3–2 и 3–1 прикладывается импульс напряжения, достаточный для зажигания в них самостоятельных разрядов. На фронте нарастания напряжения происходит предварительная ионизация газовой среды в промежутках излучением разрядов, возникающих между острями 4 и электродом 3. Емкости  $C_3$  ограничивают ток этих разрядов.

Основной ввод энергии в плазму, созданную самостоятельными разрядами, происходит от емкости  $C_0$  на стадии рекомбинационного распада плазмы. Величину  $U_0$  выбирают из условия наиболее эффективной передачи энергии на верхний лазерный уровень (как в разряде, контролируемом электронным пучком).

В процессе экспериментов общий объем разрядной зоны составлял  $3,5 \times 2 \times 80 \text{ см}^3$ . Высота каждого из межэлектродных промежутков (1,5–2 см) выбиралась из условия равенства электрических полей во время подачи высоковольтного импульса, создающего плазму. Местополо-

ложение электродов предварительной ионизации относительно электродов основного разряда можно изменять в пределах  $1 \div 10$  см в обе стороны по потоку газа. Емкость конденсаторов подсветки составляла  $1 \div 2$  нФ.

Частота следования импульсов самостоятельного разряда регулировалась до 10 кГц при напряжении до 15 кВ. Емкость конденсаторов самостоятельного разряда равнялась 2,2 нФ. Источник питания несамостоятельного разряда (8 кВт) поддерживал постоянное напряжение на разряде до 3 кВ. Скорость газового потока через разрядную камеру изменялась в пределах  $0 \div 75$  м/с.

Основные детали, имеющие соприкосновение с активной средой, были выполнены из нержавеющей стали.

### Результаты экспериментов

По осциллограммам тока самостоятельного разряда определялась концентрация электронов в образованной плазме по формуле

$$n_e = I/e v S,$$

где  $I/S$  – плотность тока самостоятельного разряда;  $e$ ,  $v$  – заряд и дрейфовая скорость электронов соответственно. Значения дрейфовой скорости для азота брались из [4].

Энергия, вводимая в активную среду на стадии несамостоятельного разряда, определялась графическим интегрированием произведения тока и напряжения:

$$W_0 = \int_0^t I(t) U_0(t) dt,$$

где  $I(t)$  и  $U_0(t)$  – ток и напряжение несамостоятельного разряда.

Зависимость концентрации электронов и средней мощности несамостоятельного разряда от давления и состава газовой смеси приведена на рис. 2. При повышении давления, при прочих равных условиях, концентрация электронов снижается, так как напряжение горения самостоятельного разряда возрастает, а при сохранении энергетики разряда его ток уменьшается.

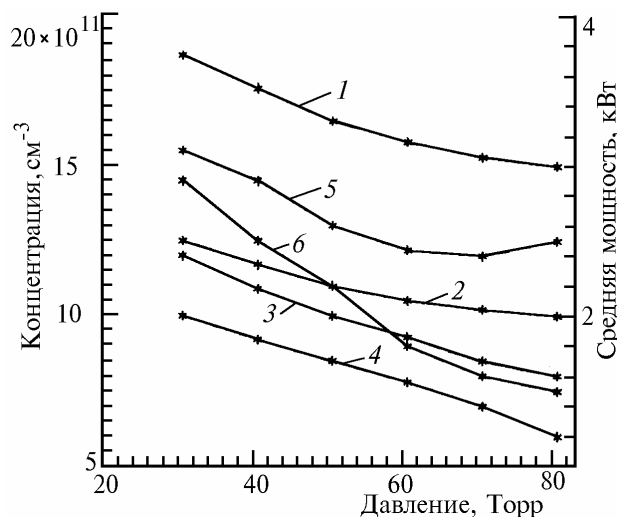


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов (1 – 4) и средней мощности разряда (5 – 6) от давления и состава газа: 1 –  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:0$ ; 3 –  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:10:10$ ; 2, 5 –  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 2:15:25$ ; 4, 6 –  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 2:25:15$

Аналогичные рассуждения можно привести для объяснения снижения концентрации при повышении парциального давления молекулярной компоненты в смеси, так как молекулярные газы наиболее существенно влияют на вольтамперную характеристику самостоятельного разряда.

Из зависимости рассеянной мощности от состава газа видно снижение энергокладов почти в два раза при работе на смесях, содержащих  $\text{CO}_2$ . Наличие молекул  $\text{CO}_2$ , сильно по-

глошающих в ультрафиолетовом диапазоне, ухудшает процесс предварительной ионизации УФ-излучением. При этом снижается концентрация электронов в разряде и ухудшается устойчивость разряда. Это подтверждает зависимость концентрации электронов и рассеянной мощности от давления газовой смеси при различном расположении электродов подсветки относительно электродов основного разряда и от емкости конденсаторов подсветки (рис. 3). Чем ближе расположена подсветка к основному разряду, тем больше мощность, вложенная в несамостоятельном разряде.

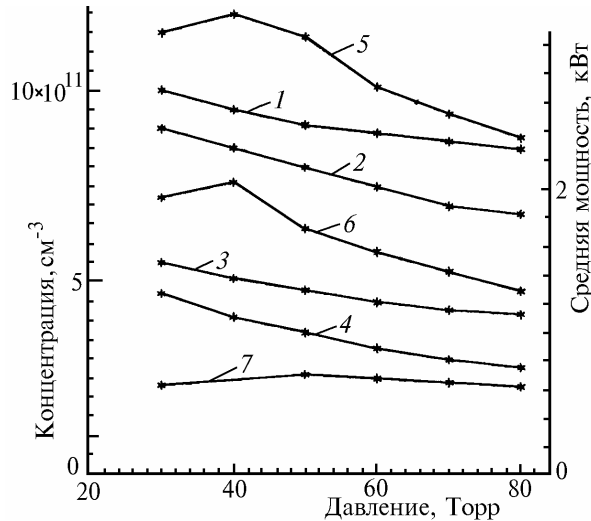


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов (1 – 4) и средней мощности разряда (5 – 7) от давления смеси, местоположения электродов и емкости конденсаторов подсветки: 1, 5 – подсветка перед электродами (2 см), емкость 2 нФ; 2, 6 – подсветка перед электродами (2 см), емкость 1 нФ; 3 – подсветка с двух сторон от электродов (10 см), емкость 2 нФ; 4, 7 – подсветка за электродами (4 см), емкость 2 нФ

В случае, если электроды предварительного разряда расположены по потоку газа за электродами основного разряда, а концентрация электронов, получаемая на стадии самостоятельного разряда, уменьшается. Это можно объяснить тем, что плазма, созданная подсветкой за предыдущие импульсы, не заносится в разрядную зону. Увеличение выхода УФ-излучения путем увеличения емкости конденсаторов подсветки приводит к возрастанию предварительной концентрации электронов в разрядном промежутке, увеличению их концентрации в самостоятельном разряде, улучшению устойчивости разряда и, следовательно, дает возможность работать на более высокой частоте следования импульсов накачки.

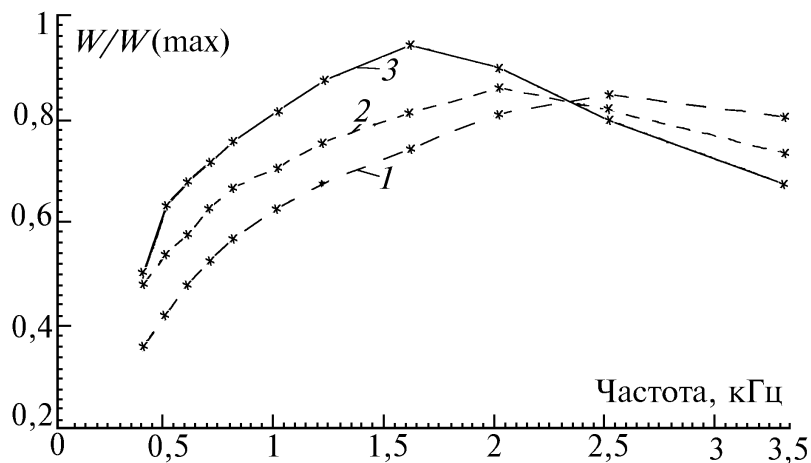


Рис. 4. Зависимость энерговклада от частоты самостоятельного разряда и скорости потока газа: 1 – 75 м/с; 2 – 60 м/с; 3 – 40 м/с

В ходе экспериментов были проведены исследования зависимости максимального энерговклада от частоты следования импульсов самостоятельного разряда при различной скорости прокачки газовой смеси (рис. 4). На данной электродной системе максимальную мощность в несамостоятельный разряд удавалось вводить только тогда, когда на стадии самостоятельного разряда свечение было более ярким в первой по потоку газа половине электродной системы. Причем картина свечения зависела как от частоты самостоятельного разряда, так и от скорости прокачки газовой смеси через разрядный промежуток, что, видимо, связано с конфигурацией электродной системы и разрядной камеры. Поэтому, хотя принципиальных ограничений на удельный энерговклад не обнаружено, средняя мощность, рассеиваемая на стадии несамостоятельного разряда при устойчивой работе лазера (без контрагирования объемного разряда), оказалась меньше ожидаемой. В смеси без  $\text{CO}_2$  она равнялась 7,8 кВт, что соответствует удельному энерговкладу  $14 \text{ Вт/см}^3$ . В присутствии  $\text{CO}_2$  средняя мощность объемного разряда уменьшалась почти в два раза.

Максимальные энерговклады были получены в следующих экспериментальных условиях: состав газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:8:12$  при давлении 40 Торр, скорость прокачки газовой смеси в зоне разряда 75 м/с, частота следования импульсов самостоятельного разряда 3,5 кГц.

Необходимо отметить, что за все время работы лазерной установки (порядка 1000 ч) не замечено износа электродов как основного разряда, так и подсветки, и не потребовалась дополнительная обработка поверхности электродов.

Полученные экспериментальные результаты показали эффективность предложенного метода накачки и позволяют надеяться на создание лазера для технологических целей.

1. Nagai H., Hishii M., Tanaka M., Myoi Y., Wakata H., Yagi T., Tabata N. // IEEE J. Quant. Electr. 1993. V. 29. N 12. P. 2898–2909.
2. Burchov Yu. J., Osipov V. V., Telnov V. A. // J. de Physique. 1979. V. 40. P. C7-161-162.
3. Тельнов В. А. Исследования энергетических характеристик активной среды  $\text{CO}_2$ -лазера с высоким уровнем накачки. Дис. ... канд. ф.-м. наук. Свердловск, 1988. 153 с.
4. Sierra R. A., Brooks H. L., Sommers A. J., Foltin S. R., Nygaard K. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1981. V. 14. P. 1791–1801.

Институт электрофизики УрО РАН,  
Екатеринбург

Поступила в редакцию  
15 апреля 1995 г.

**M. G. Ivanov, S. V. Mukhachev, V. V. Osipov. Combined Excitation System of High Energy  $\text{CO}_2$  Laser.**

The paper reports about experimental model of processing  $\text{CO}_2$  laser developed on the basis of original technique of space discharge excitation. Active volume of discharge gap in experiments was  $560 \text{ cm}^2$ . Stable operation of laser was obtained under following experimental conditions: gas composition was  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:8:12$  at pressure of 40 Torr; flow rate in discharge gap was 75 m/s; self-maintained discharge frequency was 3,5 kHz. Average power input in active volume was 4,5 kW on the stage of non-self-maintained discharge which corresponded to specific input power of  $8 \text{ W}\cdot\text{cm}^3$ . The results of investigation of energetic characteristics of the laser in continuous and pulse-repetitious operation regimes are presented.