

# Эффективный способ накачки широкоапертурных ТЕА-СО<sub>2</sub>-лазеров

Б.А. Козлов<sup>1</sup>, Д.С. Маханько<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, Рязань, Россия, ул. Гагарина 59/1, kozlov.ge.ryazan@mail.ru

<sup>2</sup> АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА»  
390023, Рязань, Россия, Циолковского, 24

Предложен и апробирован эффективный способ получения объемного разряда для накачки широкоапертурных ТЕА-СО<sub>2</sub>-лазеров без введения в рабочую смесь легкоионизируемых органических примесей. Основной разрядный промежуток перед пробоем заполняется свободными электронами, инжектируемыми через общий сеточный электрод из области зажигания вспомогательного безэлектродного коронного разряда. Осуществлено возбуждение объемного разряда накачки в промежутке с сечением до  $10 \times 10$  см и удельной плотностью энергии накачки до  $100\div 120$  мДж/см<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** широкоапертурный ТЕА-СО<sub>2</sub>-лазер, предварительная ионизация, заполнение газоразрядного промежутка свободными электронами, безэлектродный коронный разряд, СО<sub>2</sub> лазерные смеси, импульсные трансформаторы; TEA-CO<sub>2</sub> laser, pre-ionization, initial electrons, volume pumping discharges, pulse transformers, breakdown voltage.

## Введение

Формирование объемных разрядов накачки в широкоапертурных ТЕА-СО<sub>2</sub>-лазерах сталкивается со значительными техническими трудностями и в первую очередь — на стадии предварительной ионизации. Использование для целей предварительной ионизации ВУФ-излучения вспомогательных искровых разрядов является малоэффективным в силу значительного поглощения молекулами двуокиси углерода. Кроме этого — сами источники ВУФ-излучения обладают крайне малой эффективностью преобразования электрической энергии в ионизирующее излучение в области длин волн  $\lambda = 110\text{--}120$  нм [1–3]. Введение в рабочую смесь легкоионизируемых органических примесей позволяет более эффективно использовать длинноволновую часть спектра излучения искрового разряда ( $\lambda \approx 160$  нм) [1]. Излучение в этой области спектра почти не поглощается молекулами двуокиси углерода, но в состоянии осуществлять фотоионизацию органических примесей [1, 4].

Важным шагом на пути возбуждения широкоапертурных активных сред стало заполнение всего разрядного промежутка свободными носителями зарядов, которые извлекались из области зажигания слаботочного вспомогательного тлеющего разряда [4]. Применение такого метода инициирования позволило формировать объемные разряды в промежутках до  $40 \times 40$  см [4]. Единственным недостатком этого метода является введение в рабочую смесь легко ионизируемых органических примесей.

При создании отпаянных широкоапертурных ТЕА-СО<sub>2</sub>-лазеров введение в состав рабочих смесей СО<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>–He легкоионизируемых органических примесей является недопустимым.

В настоящей работе приводится описание модифицированного способа возбуждения объемного разряда в СО<sub>2</sub>-лазерных смесях в промежутках с сечением до  $10 \times 10$  см с использованием плазмы и ВУФ-излучения вспомогательного маломощного безэлектродного коронного разряда при заполнении основного межэлектродного промежутка свободными электронами без применения легкоионизируемых примесей.

## Экспериментальная установка. Активные элементы и импульсные генераторы

Условия формирования объемных разрядов в СО<sub>2</sub>-лазерных смесях атмосферного давления изучались с использованием двух вариантов активных элементов. Первый имел геометрические размеры возбуждаемой плазмы  $V_1 = 5 \times 5 \times 40$  см<sup>3</sup>, второй —  $V_2 = 10 \times 10 \times 30$  см<sup>3</sup>.

Схема электроразрядного модуля и импульсных генераторов для возбуждения вспомогательного и основного объемного разрядов приведена на рис. 1.

В обоих случаях объемный самостоятельный разряд накачки в СО<sub>2</sub>-лазерных смесях зажигался между плоским анодом (А) и сеточным катодом (К). Катод представляет собой профилированный электрод из дюралюминия с выфрезерованным в центральной части пазом для расположения в нем вспомогательных электродов (ВЭ). Рабочая поверхность катода образована плоской сеткой из нержавеющей стали с пропусканием 50%. Внутри стеклянных капилляров вспомогательного электрода прокладывались тонкие проволоочки из никеля или молибдена с диаметром 0,2 мм. Выводы этих проволоочек и выводы катода подключались к вспомогательному импульсному трансформатору ИТ<sub>2</sub>, который вырабатывал цуг затухающих высоковольтных импульсов. Первый импульс достигал 60 кВ, период колебаний составлял  $T \leq 1,2$  мкс.

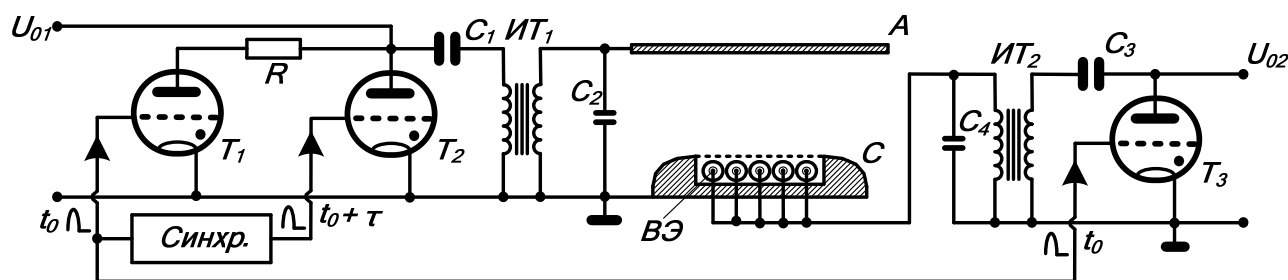


Рис. 1. Структура газоразрядного модуля и электрическая схема генераторов для формирования объемного разряда в промежутках с сечением разряда до  $10 \times 10$  см с инициированием от коронного разряда

Анод и катод основного разрядного промежутка подключались к импульсному генератору накачки на основе импульсного трансформатора  $ИТ_1$ . Основной накопительный конденсатор ( $C_1 = 0,5$  мкФ) коммутировался на импульсный трансформатор с помощью двух тириستоров. Емкость обостряющего конденсатора  $C_2$  варьировалась в пределах от одной до десяти нанофард.

Первый тиристор  $T_1$  запускался одновременно с запуском тиристора  $T_3$ , а тиристор  $T_2$  — спустя 5–10 мкс. При этом в цепи первого коммутатора находился резистор  $R$ , который ограничивает ток в первичной цепи импульсного трансформатора и формирует пологий импульс напряжения с амплитудой недостаточной для пробоя основного газоразрядного промежутка. В течение начального периода времени ( $\tau = 5 \div 10$  мкс) на основном разрядном промежутке формируется напряжение, не достаточное для пробоя основного разрядного промежутка. В течение 5÷10 мкс происходит формирование плазмы вспомогательного разряда в прикатодной области и диффузия части свободных электронов в основной промежуток. В течение этого же времени происходит заполнение значительной части основного межэлектродного промежутка электронами. Начальные носители зарядов в основном промежутке формируются не только за счет дрейфа в слабом электрическом поле, но и под воздействием ВУФ-излучения коронных разрядов. Спустя время задержки  $\tau$  запускается тиристор  $T_2$  и напряжение на основном промежутке за  $\approx 1,4 \div 1,5$  мкс достигает пробойного значения.

Одними из важных элементов возбуждения объемного разряда являются импульсные трансформаторы  $ИТ_1$  и  $ИТ_2$ . Трансформатор  $ИТ_1$  передает энергию из накопительного конденсатора  $C_1$  в основной газоразрядный промежуток А–К. Магнитопровод этого трансформатора Ш-образной формы изготавливался из трансформаторного железа толщиной 0,3 мм. Сечение внутреннего магнитопровода имело размеры  $6 \times 6$  см при высоте окна 18 см. Первичная обмотка была рассчитана на напряжения до 50 кВ, вторичная — до 250 кВ. Импульсный трансформатор монтировался в баке с маслом. С помощью этого импульсного генератора формировались высоковольтные импульсы с максимальной амплитудой до 250 кВ и временем нарастания до 2 мкс.

В трансформаторе  $ИТ_2$  использовался разомкнутый магнитопровод из ферритовых колец с внешним диаметром 65 мм. Этот импульсный трансформатор вырабатывал цуг затухающих высоковольтных импульсов продолжительностью до 20 мкс. В качестве коммутаторов  $T_1$  и  $T_2$  применялись импульсные водородные тиристоры типа ТГИ1-2500/50. Коммутатором  $T_3$  вспомогательного импульсного генератора служил импульсный водородный тиристор марки ТГИ2-500/20.

Форма импульсов напряжений и токов контролировались с помощью емкостных делителей и измерительных трансформаторов тока (на рис.1 не приведены) [5]. Энергия, вводимая в плазму объемного разряда, определялась путем интегрирования произведения напряжения на ток в течение времени протекания тока объемного разряда.

## Результаты измерений

Условия формирования объемных разрядов в СО<sub>2</sub>-лазрных смесях атмосферного давления изучались с использованием двух вариантов газоразрядных модулей. Первый имел геометрические размеры возбуждаемой плазмы  $V_1 = 5 \times 5 \times 40$  см<sup>3</sup>, второй —  $V_2 = 10 \times 10 \times 30$  см<sup>3</sup>.

Значения напряжений зажигания объемного разряда оценивались согласно [6–8] для смесей газов на основе СО<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>–He:

$$U_{пр} = Bpd / [\ln Apd - \ln(1 + 1/\gamma)], \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  — константы, определяемые родом газа и значением приведенной напряженности электрического поля;  $pd$  — произведение давления на величину межэлектродного промежутка, Торр · см;  $\gamma$  — коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии материала катода.

Экспериментально измеренные значения напряжений пробоя и рассчитанные по (1) отличаются друг от друга не более, чем на 10%.

Оптимизация параметров предионизатора на основе импульсного безэлектродного коронного разряда заключалась в определении минимального зазора между поверхностью сеточного катода и стеклянными капиллярами с тонкими проволоками. Оптимальным оказалось расстояние в 2 мм.

Поведение объемной плотности энергии накачки в зависимости от напряжения заряда накопительного конденсатора  $C_1$  для двух вариантов разрядного промежутка приведено на рис. 2. В качестве рабочей среды применялась типичная смесь газов  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$  при полном давлении  $P = 1$  атм.

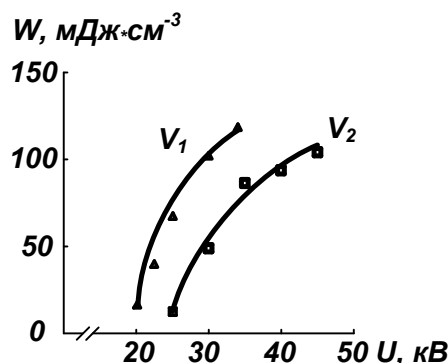


Рис. 2. Зависимость плотности энергии накачки от напряжения заряда накопительного конденсатора для газоразрядных промежутков  $V_1$  и  $V_2$  в смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$

Имеет место монотонное нарастание плотностей энергии накачки от  $\approx 20$  мДж·см $^{-3}$  до 100–120 мДж·см $^{-3}$ . Наибольшая плотность энергии накачки достигается в промежутке с  $d_{\text{AK}} = 5$  см. Ее максимальное значение составляет 120 мДж·см $^{-3}$ . В промежутке с сечением  $10 \times 10$  см плотность энергии накачки не превышает 100 мДж·см $^{-3}$ .

При переходе к смесям с повышенным содержанием гелия в смеси ( $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$ ) плотность энергии накачки уменьшается. Одновременно с этим пространственная повышается однородность плазмы объемного разряда.

### Заключение

В результате выполнения данной работы продемонстрирована возможность применения слаботочного импульсного безэлектродного коронного разряда в совокупности с инъекцией свободных электродов в основной разрядный промежуток для успешного формирования объемного разряда накачки в промежутках до 10 см без применения каких-либо леглионизируемых присадок. Данный метод формирования объемного разряда имеет важное значение при создании отпаянных широкоапертурных TEA- $\text{CO}_2$ -лазеров.

### Список литературы

1. Газовые лазеры. Под ред. Мак-Даниеля и Нигена. М.: Мир, 1986, 550 с.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
3. Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атоимиздат, 1981.
4. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. Формирование объемного разряда для накачки  $\text{CO}_2$ -лазеров // Квантовая электроника. 1987. Т. 14, № 1. С. 135–145.
5. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Мир, 1986.
6. Гапонов В.И. Электроника. Т. I. М.: ГИФМЛ, 1960.
7. Куффель Е., Цаенгл В., Куффель Дж. Техника и электрофизика высоких напряжений. Издат. дом «Интеллект», Долгопрудный, 2011.
8. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010.

*B.A. Kozlov, D.S. Makhanko. Efficient method of pumping wide-aperture TEA- $\text{CO}_2$  lasers.*

The initiation of volume pumping discharges in TEA- $\text{CO}_2$  lasers with beam cross-section up to  $10 \times 10$  cm is most expediently carried out using plasma and VUV radiation of auxiliary high-voltage and low-current discharges. The present work describes a modified method of excitation of the volume pumping discharges in wide-aperture TEA- $\text{CO}_2$  lasers using a low-power auxiliary corona discharge. Application of this method allowed to excite volume discharges in intervals  $V_1 = 5 \times 5 \times 40 = 1000$  cm $^3$  and  $V_2 = 10 \times 10 \times 30 = 3000$  cm $^3$  with energy pumping density in working mixtures  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:8 - 1:1:8$  at atmospheric pressure up to  $100\div 120$  mJ·cm $^{-3}$ .