

0УДК 621.373.826

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ НАКАЧКИ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ТЕА-СО₂ ЛАЗЕРОВ

Б. А. Козлов, д.ф.-м.н., профессор кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Д. С. Маханько, к.т.н., старший научный сотрудник АО «Плазма», Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

Предложен и апробирован модифицированный способ получения объемного разряда в CO₂-лазерных смесях при атмосферном давлении при использовании безэлектродного вспомогательного разряда в прикатодной области с последующей инжекцией свободных электронов в основной разрядный промежуток. Получен однородный разряд в объеме 10×10×30 см³. Достигнута максимальная плотность энергии накачки 110 мДж·см⁻³ в рабочей смеси CO₂:N₂:He = 1:1:8.

Ключевые слова: TEA-CO₂ лазер, объемный разряд, электроразрядный модуль, плотность энергии накачки, предварительная ионизация, импульсный генератор.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94

Введение

Мощные потоки ИК-излучения, генерируемые TEA-CO₂ лазерами, находят применение в технике разделения изотопов углерода (¹²C и ¹³C), ускорителях заряженных частиц, источниках когерентного рентгеновского излучения [1, 2]. Кроме этого, разработка мощных пикосекундных лазерных систем открывает возможность формирования многозарядных ионов и получения мягкого рентгеновского излучения для создания современных литографов [2, 3].

Генерация очень интенсивных потоков ИК-излучения достигается путем увеличения геометрических размеров возбуждаемой в плазме объемного разряда активной среды на основе двуокиси углерода. Типичные размеры поперечных сечений плазмы объемного разряда в этих случаях находятся в пределах 10x10÷40x40 см² [4, 5].

Формирование объемных разрядов накачки в широкоапертурных TEA-CO₂ лазерах сталкивается со значительными техническими трудностями и в первую очередь – на стадии предварительной ионизации. Использование для целей предварительной ионизации вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения вспомогательных искровых разрядов является малоэффективным в силу его 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 [6]. Введение в рабочую смесь легкоионизуемых органических примесей позволяет более эффективно использовать длинноволновую часть спектра излучения искрового разряда ($\lambda \approx 160\text{--}120$ нм). Излучение в этой области спектра почти не поглощается молекулами двуокиси углерода, но в состоянии осуществлять фотоионизацию органических примесей в рабочей смеси [6].

Важным шагом на пути развития способов возбуждения широкоапертурных TEA-CO₂ лазеров стало использование на стадии предварительной ионизации заполнения всего разрядного промежутка свободными носителями зарядов (электронов), инжектируемых из расположенного в прикатодной области вспомогательного тлеющего разряда [5]. Применение такого метода инициирования позволило формировать объемные разряды в промежутках с сечением до 40x40 см² [5]. Единственным недостатком этого метода является необходимость применения легко ионизуемых органических примесей. При создании

отпаянных широкоапертурных TEA-CO₂ лазеров введение в состав рабочих смесей CO₂-N₂-Не легкоионизуемых органических примесей является недопустимым.

В связи с этим возникает необходимость в дальнейшем развитии методов инициирования с использованием плазмы вспомогательного разряда для возбуждения широкоапертурных объемных разрядов без введения в рабочую смесь каких-либо легкоионизуемых органических примесей.

Цель настоящей работы – создание эффективного источника начальной ионизации на основе инжекции свободных электронов из плазмы вспомогательного безэлектродного разряда в основной разрядный промежуток для формирования объемных разрядов накачки в CO₂-лазерных смесях при атмосферном давлении в объеме V = 10x10x30 см³.

Условия формирования объемного разряда накачки

Формирование объемного разряда накачки в газах атмосферного и сверхатмосферного давлений осуществляется в две стадии. На первой стадии – стадии предварительной ионизации – в межэлектродном промежутке или в прикатодной его области создаются начальные носители зарядов с концентрацией не ниже 10⁶ см⁻³ [4, 7, 8]. На второй стадии – однородный пробой разрядного промежутка и протекание тока объемного разряда.

Для целей предварительной ионизации газов в электроразрядных TEA-CO₂ лазерах наиболее простыми и распространенными являются методы, основанные на использовании жесткого УФ-излучения, вызывающего фотоионизацию газов, или плазмы вспомогательного разряда [6, 7]. В последнем случае вспомогательный разряд зажигается в прикатодной области основного разрядного промежутка.

Применение жесткого ВУФ-излучения в силу очень эффективного его поглощения молекулами двуокиси углерода приемлемо в разрядных промежутках с межэлектродным расстоянием в несколько сантиметров [6]. Для предварительной ионизации рабочих газов в промежутках в 10 см и более целесообразно использовать плазму вспомогательного разряда. Вспомогательные разряды являются также и источниками ВУФ-излучения. Для более полного использования УФ-излучения в его длинноволновой части спектра ($\lambda \approx 160 \div 170$ нм) в рабочую смесь газов вводятся легкоионизируемые органические соединения (ферроцен, триэтиламин, бензиламин, толуол и т.п.) [6]. При создании отпаянных вариантов TEA-CO₂ лазеров наличие в рабочей смеси таких соединений недопустимо в силу их негативного влияния на оптические элементы резонатора.

На рисунке 1 приведены два варианта применявшихся электродных структур, в которых для целей предварительной ионизации газов использовалась плазма вспомогательных безэлектродных разрядов с последующей инжекцией электронов в основной промежуток.

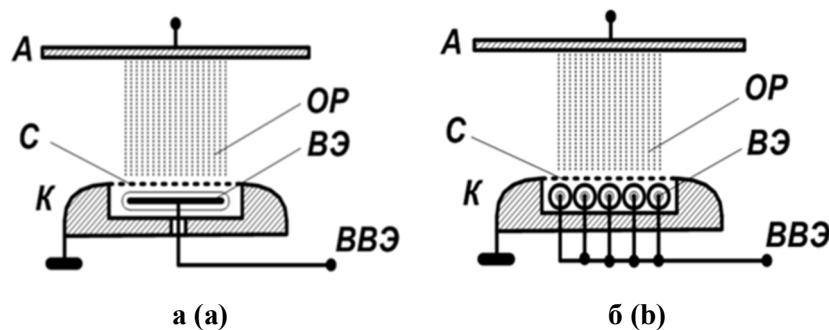


Рисунок 1 – Электродные структуры для получения объемного разряда с большой апертурой с предварительной ионизацией газов плазмой безэлектродных разрядов: A и K – анод и катод основного разрядного промежутка; C – сетка; OP – область объемного разряда; BЭ – вспомогательные электроды; BBЭ – выводы вспомогательных электродов

Figure 1 – Electrode structures for producing large-aperture volume discharge with preliminary ionization of gases by plasma of electrodeless discharges: A and K – anode and cathode of main discharge gap; C – grid; OP – volume discharge; BЭ – auxiliary electrodes; BBЭ – terminals of auxiliary electrodes

Профицированный катодный блок K был выполнен из алюминиевого сплава Д-16 с выфрезерованным в центральной части пазом шириной 12 см и глубиной 1,5 см для расположения в нем вспомогательных электродов $B\mathcal{E}$. Рабочая поверхность катода образована плоской сеткой C из нержавеющей стали с ячейками 0,8x0,8 мм и пропусканием 50 %. Площадь плоской части сетки составляла 30x12 см². Промежуток между сеткой и вспомогательными электродами $C\mathcal{E}$ мог изменяться в пределах 0÷10 мм. Ширина вспомогательных электродов $C\mathcal{E}$ в обоих вариантах составляла 10 см.

Объемный разряд накачки зажигался между сеточным катодом K и плоским анодом A . Анод был выполнен из сплава Д-16 и имел площадь 30x50 см². Объемный разряд накачки формировался в промежутке с геометрическими размерами $V = 10 \times 10 \times 30$ см³.

Вспомогательный электрод первого варианта (рисунок 1, a) представлял собой плоскую пластину из латуни, покрытую слоем фторопластовой ленты, способной выдерживать напряжения до 70 кВ. Во втором варианте вспомогательный электрод (рисунок 1, δ) выполнен в виде набора толстостенных стеклянных капилляров с проложенными внутри них тонкими (0,2 мм) проволочками из никеля. Выводы этих проволочек так же, как и вывод вспомогательного электрода в варианте (a), подключались к вспомогательному импульсному генератору.

Ожидаемые значения напряжений пробоя промежутка с межэлектродным расстоянием в 10 см оценивались по известному соотношению Таунсенда для зажигания самостоятельного разряда [9, 10]:

$$U_{np} = \frac{Bpd}{\ln Apd - \ln \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}, \quad (1)$$

где pd – произведение давления на величину межэлектродного промежутка, Торр·см; A и B – константы, определяемые родом газа и приведенной напряженностью электрического поля E/p ; γ – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии, который также зависит от E/p .

Коэффициенты A и B так же, как и коэффициент γ , известны для большинства индивидуальных газов и материалов для изготовления катодов [10, 11]. Для газовых смесей значения этих коэффициентов неизвестны. Неизвестны также и закономерности, по которым можно их определить.

На рисунке 2 представлены зависимости напряжений пробоя, вычисленные по соотношению (1), от величины межэлектродного промежутка для индивидуальных газов CO₂, N₂ и He при давлении в одну атмосферу. Значение коэффициента γ принималось равным 10⁻² и не зависящим от рода газа.

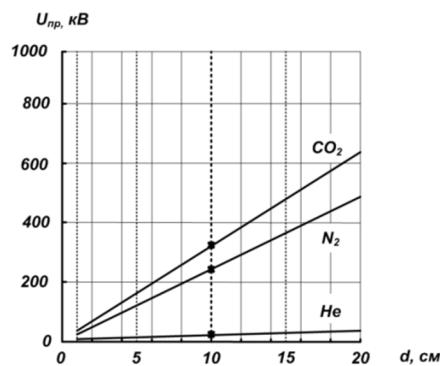


Рисунок 2 – Расчетные зависимости напряжений пробоя в индивидуальных газах при атмосферном давлении от величины межэлектродного промежутка

Figure 2 – Calculated dependencies of breakdown voltages in individual gases at atmospheric pressure on interelectrode gap value

Наибольшие значения напряжений пробоя характерны для двуокиси углерода и азота. В чистой двуокиси углерода для межэлектродного промежутка в $d = 10$ см напряжение пробоя имеет значение ≈ 340 кВ. В азоте для такого же промежутка напряжение пробоя достигает 260 кВ. В чистом гелии напряжение пробоя в десятисантиметровом промежутке значительно меньше и находится на уровне 30 кВ. В промежутках с $d_{AK} = 20$ см напряжения пробоя имеют следующие значения: -640, 490 и 56 кВ.

Для типичной лазерной смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ концентрации двуокиси углерода и азота, чьи парциальные давления составляют по 5 – 10 % от общего давления и эти газы сильно «разбавлены» гелием, следует ожидать значительного снижения уровня напряжений пробоя. Напряжение пробоя в таких смесях определяется парциальными давлениями молекулярных компонентов, и в первом приближении оно будет определяться суммой соответствующих значений напряжений пробоя применительно к каждой газовой компоненте при давлении в 0,1 атмосферы, т.е. находится на уровне $\approx (34 + 26)$ кВ.

Экспериментальная установка. Газоразрядная камера и высоковольтные импульсные генераторы

В состав экспериментальной установки входили газоразрядная камера (активный элемент TEA- CO_2 лазера), три высоковольтных импульсных генератора, синхронизатор, делители напряжения и измерители тока, импульсный осциллограф С1-104. Откачка и наполнение газоразрядной камеры исследуемыми газами производились традиционными методами вакуумных технологий.

Принципиальная электрическая схема газоразрядного модуля и импульсных генераторов приведена на рисунке 3. Геометрические размеры плазмы объемного разряда составляли $30 \times 10 \times 10 \text{ см}^3 = 3 \text{ дм}^3$.

Анод A и катод K основного разрядного промежутка, в котором формируется объемный разряд накачки, подключены к импульсному трансформатору IT_1 . Основной накопительный конденсатор $C_1 = 0,5 \text{ мкФ}$ коммутировался на основной разрядный промежуток с помощью двух тиаратронов T_1 и T_2 . В работе использовались тиаратроны марки ТГИ1-2500/50. Емкость обостряющего конденсатора C_2 варьировалась в пределах от одной до десяти нанофарад.

Первый тиаратрон T_1 запускался одновременно с запуском тиаратрона T_3 , а тиаратрон T_2 – спустя $5 \div 10 \text{ мкс}$. При этом в цепи первого коммутатора находился резистор R , который ограничивал ток в первичной цепи импульсного трансформатора.

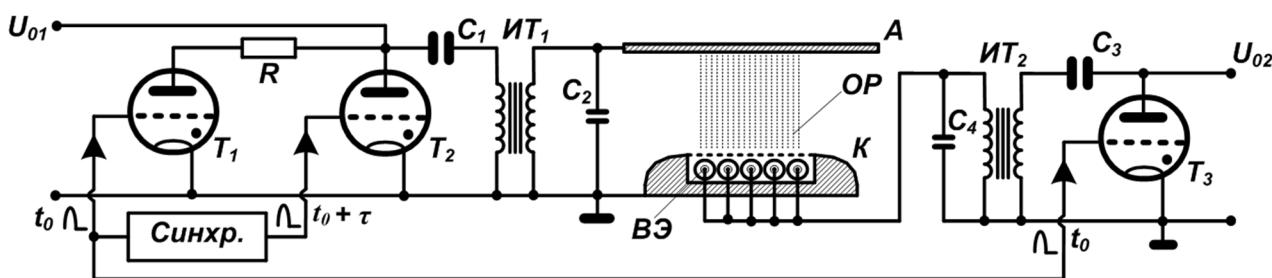


Рисунок 3 – Структура газоразрядного модуля и электрическая схема генераторов для формирования объемных разрядов в промежутках с сечением до $10 \times 10 \text{ см}^2$

Figure 3 – Structure of gas-discharge module and electrical circuit of generators for volume discharges formation in gaps with cross-section of up to $10 \times 10 \text{ cm}^2$

В течение начального периода времени ($\tau = 5 \div 10 \text{ мкс}$) к основному разрядному промежутку прикладывается напряжение, не достаточное для его пробоя. В течение $5 \div 10 \text{ мкс}$ происходит формирование плазмы вспомогательного разряда в прикатодной области, а также диффузия и дрейф части свободных электронов в основной разрядный промежуток под воздействием напряжения отрицательной полярности на промежутке «сетка – вспомогательный электрод». В течение этого же времени происходит заполнение

значительной части основного межэлектродного промежутка свободными электронами. Спустя время задержки τ запускается тиатрон T_2 , и напряжение на основном разрядном промежутке за время $\tau \approx 0,4\div0,5$ мкс достигает пробойного значения.

Тиатрон T_3 запускается одновременно с тиатроном T_1 , и генератор на основе IT_2 вырабатывает затухающий цуг высоковольтных колебаний, вызывающих возбуждение вспомогательного разряда в промежутке «сетка – вспомогательный электрод».

Одними из важных элементов возбуждения объемного разряда являются импульсные трансформаторы IT_1 и IT_2 . Трансформатор IT_1 передает энергию из накопительного конденсатора C_1 в основной газоразрядный промежуток $A-K$. Магнитопровод этого трансформатора Ш-образной формы изготавливался из трансформаторного железа толщиной 0,3 мм. Сечение внутреннего магнитопровода имело размеры 6х6 см при высоте окна 18 см. Первичная обмотка была рассчитана на напряжения до 50 кВ, вторичная – до 180 кВ. Импульсный трансформатор монтировался в баке с маслом. С помощью этого импульсного генератора формировались высоковольтные импульсы с максимальной амплитудой до 180 кВ и временем нарастания до 2 мкс.

В трансформаторе IT_2 использовался разомкнутый магнитопровод из ферритовых колец с внешним диаметром 65 мм. Этот импульсный трансформатор вырабатывал цуг затухающих высоковольтных колебаний продолжительностью до 24 мкс.

Форма импульсов напряжений и токов контролировалась с помощью емкостных делителей и низкоиндуктивных шунтов тока (на рисунке 3 не приведены) [12].

Результаты измерений

На начальном этапе проведения исследований определялась эффективность каждого из электроразрядных модулей, представленных на рисунке 1. В качестве критериев эффективности выступали такие параметры, как пространственная однородность плазмы объемного разряда, устойчивость зажигания объемного разряда от импульса к импульсу и плотность энергии накачки. Результаты таких предварительных исследований показали, что вариант газоразрядного модуля, представленный на рисунке 1, б, более предпочтителен и все последующие измерения проводились на нем.

Визуальные наблюдения за пространственной структурой плазмы объемного разряда показали, что основной разрядный промежуток представляет собой однородное свечение, равномерно распределенное по всему промежутку, за исключением прикатодной области, обладавшей большей интенсивностью свечения. Разряд в прикатодной области на протяжении $\approx 0,8\div1,2$ см в сторону анода представляет собой плотный набор яркосветящихся каналов с диаметром менее 1 мм, которые затем сливаются в однородный плазменный столб. Обращает на себя внимание факт неизменности положения индивидуальных нитевидных каналов на поверхности сеточного катода. Это может означать, что объемный разряд в данных условиях формируется в результате не только развития электронных лавин из начальных электронов, но и наличия на поверхности катодных нитей достаточно эффективных эмиссионных центров. Природа этих центров может быть непосредственно связана с автоэлектронными процессами на микронеоднородностях на поверхности катода [4, 13].

Для повышения эффективности работы предионизатора осуществлялось варьирование зазора «вспомогательный электрод – сетка». Было установлено, что оптимальное значение этого промежутка находится в пределах $2,5\div3$ мм.

Заметное влияние на пространственную структуру плазмы объемного разряда оказывает содержание гелия в CO₂-лазерной смеси. Так, например, объемный разряд в смеси CO₂:N₂:He = 0,5:0,5:9 (90 % гелия в смеси) более однороден, чем разряд в смеси с содержанием гелия 80 % (смесь CO₂:N₂:He = 1:1:8). При снижении доли гелия в смеси до 75 % в основном разрядном промежутке на фоне однородного разряда начинают

формироваться локальные искровые каналы, частично или полностью перекрывающие основной промежуток $A-K$.

На рисунке 4 приведены зависимости плотностей накачки (энергии, вводимой в единицу объема плазмы, $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}$) от напряжения заряда основного емкостного накопителя C_1 для двух составов рабочей смеси – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$ и $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ при полном давлении в одну атмосферу. Кривые построены из расчета, что в плазму объемного разряда переводится не вся запасенная в накопителе C_1 энергия, а только 75 %. Диапазон рабочих напряжений ограничен «снизу» отсутствием однородного пробоя, «сверху» – электрической прочностью тиратронов ТГИ1–2500/50.

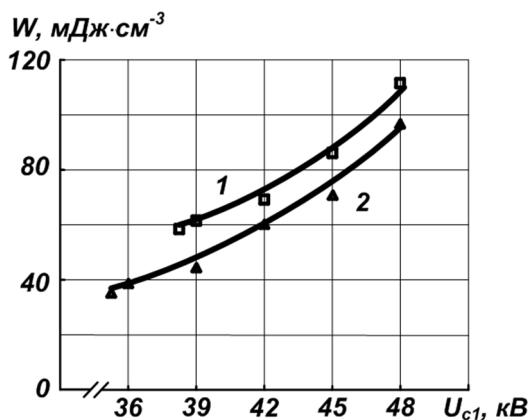


Рисунок 4 – Зависимости плотности энергии накачки от напряжения заряда накопительного конденсатора C_1 для двух составов рабочих смесей: $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ (1), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$ (2)

Figure 4 – Dependencies of pumping energy density on charging voltage of storage capacitor C_1 for two mixture compositions $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ (1), $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$ (2)

Плотности энергии накачки в рабочем диапазоне зарядных напряжений 35–48 кВ нарастают с уровня 60 $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}$ до 110 $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}$ для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$. Более низкие значения плотностей энергии накачки (40–90 $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}$) соответствуют смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$. Для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ плотность энергии накачки превышает все значения, которые характерны для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$, на $\approx 10\div 15\%$. Минимальные значения плотностей накачки соответствуют минимальным значениям напряжений пробоя, при которых формируется пространственно однородный объемный разряд. При максимальных значениях напряжений заряда накопительного конденсатора C_1 (на уровне ≈ 48 кВ) достигаются плотности энергии накачки 95 и 110 $\text{мДж}\cdot\text{см}^{-3}$ (смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 0,5:0,5:9$ и 1:1:8). Такие значения характерны для эффективного возбуждения рабочих уровней молекул двуокиси углерода и молекулярного азота в плазме объемного разряда [6–8, 14].

Заключение

1. Продемонстрирована возможность применения плазмы вспомогательного безэлектродного разряда, формируемого в прикатодной области, с одновременной инжекцией свободных электронов в основной разрядный промежуток для эффективного возбуждения объемного разряда накачки в промежутке с межэлектродным расстоянием 10 см и полным объемом плазмы $30 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ в CO_2 -лазерных смесях при атмосферном давлении без применения каких-либо легкоионизируемых органических примесей. Предложенный метод накачки очень важен при создании отпаянных широкоапертурных TEA CO_2 -лазеров.

2. В рабочей смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ при атмосферном давлении достигнута максимальная плотность энергии накачки $W_{уд} = 110 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$, соответствующая

эффективному возбуждению СО₂-лазеров высокого давления и получению когерентного излучения в десятимикронной области спектра.

3. Оптимизация параметров возбуждающих импульсов открывает путь к дальнейшему увеличению сечений разрядных промежутков и увеличению объемов возбуждаемой активной среды с повышенной плотностью энергии накачки.

Библиографический список

1. Баранов Г.А., Астахов А.В., Зинченко А.К. и др. Технологический комплекс для лазерного разделения изотопов // Российский химический журнал (Журнал Росс. Хим. Общества им. Д.И. Менделеева). 2001. Т. XLV. № 5-6. С.89-95.
2. Баранов Г.А., Кучинский А.А. Мощные импульсные СО₂-лазеры высокого давления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 3. С. 219-229.
3. Чхало Н.И., Голубев С.В., Красильник З.Ф. Проблемы и перспективы развития рентгеновской литографии // Материалы Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. 17-21 марта 2025. С.45.
4. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука. 2004.
5. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. Формирование объемного разряда для накачки СО₂-лазеров // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 1. С. 135-145.
6. Газовые лазеры / Под ред. И. Мак-Даниеля и У. Нигена. М.: Мир, 1986. 550 с.
7. Ямщиков В.А., Хомич В.Ю. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных СО₂-, N₂- и F₂-лазеров. М.: Физматлит, 2015.
8. Карнишин В.Н., Солоухин Р.И. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атоимиздат, 1981.
9. Гапонов В.И. Электроника. Т. I. М.: ГИФМЛ, 1960.
10. Куффель Е., Цаенгль В., Куффель Дж. Техника и электрофизика высоких напряжений. – Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект». 2011.
11. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы. Санкт–Петербург: Издательство Политехнического университета. 2010.
12. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Мир. 1986.
13. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука. 1991.
14. Виттеман В.Дж. СО₂-лазер. Пер. с англ. В.В. Соковикова, Ю.Б. Удалова; под ред. Н.Н. Соболева. М.: Мир. 1990.

UDC 621.373.826

EFFICIENT METHOD OF PUMPING WIDE-APERTURE TEA-CO₂ LASERS

B. A. Kozlov, Dr. in physics and mathematical sciences, full professor, department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5957-3688, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

D. S. Makhanko, senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

A modified method for producing a volumetric discharge in CO₂ laser mixtures at atmospheric pressure using electrode-free discharge in cathode region with subsequent injection of free electrons into the main discharge gap is proposed and tested. A homogeneous discharge with the volume of 10×10×30 cm³ was obtained. Maximum pumping energy density of 110 mJ·cm⁻³ in CO₂:N₂:He = 1:1:8 working mixture was achieved.

Keywords: TEA-CO₂ laser, volume discharge, electric discharge module, pumping energy density, preionization, pulse generator.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-196-203

References

1. Baranov G.A., Astahov A.V., Zinchenko A.K. at all. Tehnologicheskij kompleks dlya lazernogo razdeleniya izotopov. Rossijskij himicheskij zhurnal (*Zhurnal Ross. Him. Obshchestva im. D.I. Mendeleva*). 2001. vol. XLV, no. 5-6, pp. 89-95. (in Russian).
2. Baranov G.A., Kuchinskij A.A. Moshnye impulsnye CO₂-lazery vysokogo davleniya i ih primenenie. *Kvantovaya elektronika*. 2005, vol. 35, no. 3, pp. 219-229. (in Russian).
3. Chhalo N.I., Golubev S.V., Krasilnik Z.F. Problemy i perspektivy razvitiya rentgenovskoj litografii. *Materialy Mezhdunarodnoj (Zvenigorodskoj) konferencii po fizike plazmy i UTS*. 17-21 marta 2025, p. 45. (in Russian).
4. Mesjac G.A. Impul'snaja jenergetika i jelektronika. M.: Nauka. 2004. (in Russian)
5. Apollonov V.V., Bajcur G.G., Prohorov A.M., Firsov K.N. Formirovanie ob'emnogo razrjada dlja nakachki CO₂-lazerov. *Kvantovaja jelektronika*. 1987, vol. 14, no 1, pp.135-145. (in Russian)
6. Gazovye lazery / Pod red. I. Mak – Danielja i U. Nigena. M.: Mir. 1986, p. 550. (in Russian)
7. Yamshikov V.A., Homich V.Yu. Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo vozbuždeniya moshnyh CO₂–, N₂– i F₂–lazerov. M.: Fizmatlit. 2015. (in Russian).
8. Karnyushin V.N., Solouhin R.I. Makroskopicheskie i molekuljarnye processy v gazo-vyh lazerah. M.: Atoimizdat. 1981. (in Russian).
9. Gaponov V.I. *Jelektronika*. T. I. M.: GIFML, 1960. (in Russian)
10. Kuffel' E., Caengl' V., Kuffel' Dzh. Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. Dolgoprudnyj: Izdat. dom «Intellekt», 2011. (in Russian).
11. Smirnov B.M. Svojstva gazorazradnoj plazmy. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta. 2010. (in Russian).
12. Shvab A. Izmerenija na vysokom naprjazhenii. M.: Mir. 1986. (in Russian).
13. Korolev Yu.D., Mesjac G.A. Fizika impulsnogo proboya gazov. M.: Nauka. 1991. (in Russian)
14. Vitteman V.Dzh. CO₂-lazer. Per. s angl. V.V. Sokovikova, Ju.B. Udalova; pod red. N.N. Soboleva. M.: Mir. 1990. (in Russian).