

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 04.1

**Импульсный CO₂-лазер с накачкой продольным разрядом
в переменном магнитном поле**

**Li Hongda¹, И.Н. Коновалов², Ю.Н. Панченко^{2, 4}✉, А.В. Пучикин^{2, 4},
М.В. Андреев⁴, С.М. Бобровников^{3, 4*}**

¹Shenyang Ligong University, Liaoning, No. 6,
Nanping Central Road, Shenyang, 110159, P.R. China

²Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.;

после доработки 1.09.2023 г.;

принята к печати 5.10.2023 г.

Предложен и реализован оригинальный способ накачки импульсного CO₂-лазера продольным разрядом в переменном магнитном поле. На основе предложенного метода разработан малогабаритный CO₂-лазер с длиной активной среды ~200 мм, энергией в импульсе ~30 мДж и КПД 3,4%. Выявлено, что основной причиной, ограничивающей энергию генерации малогабаритных лазеров, является развитие токовых неустойчивостей в продольном разряде по сечению разрядной трубки. Отмечается, что рост неустойчивостей ускоряется с ростом давления газовой смеси CO₂:N₂:He выше 0,1 атм и удельной мощности накачки выше 3 МВт/см³. Использование внешнего переменного магнитного поля, наложенного на импульсный продольный разряд, позволяет повысить общее давление газовой смеси в лазере до 0,4 атм, при сохранении горения объемного разряда.

Ключевые слова: CO₂-лазер, продольный разряд, магнитное поле, излучение; CO₂ laser, longitudinal discharge, magnetic field, radiation.

Введение

В настоящее время электроразрядные импульсные CO₂-лазеры широко применяются в лидарных системах для обнаружения и определения источников загрязнения атмосферного воздуха [1–4]. Интерес к таким лазерам обусловлен их высоким КПД (~20%), генерацией перестраиваемого узкополосного излучения в среднем инфракрасном диапазоне спектра (9,2–11,4 мкм) и возможностью изменения длительности импульса излучения в диапазоне от нано- до миллисекунд [5, 6].

В работах [7–10] представлены результаты исследований эффективных импульсных CO₂-лазеров с возбуждением продольным разрядом длительностью от 25 нс до 200 мкс. Использовались разрядные трубки с секцией длиной 30–60 см, которые запол-

нялись смесями CO₂:N₂:He под давлением 2,6–4,6 кПа. Энергия генерируемых импульсов излучения составляла от 10 до 72 мДж при зарядном напряжении 20–25 кВ на накопительной емкости. Область горения объемного разряда в поперечном сечении и генерируемое излучение имели форму кольца. Основные проблемы, с которыми столкнулись исследователи, заключались в неустойчивом горении объемного разряда в такой газовой смеси. Как отмечалось в [7–10], в разрядных секциях длиной 30 см при удельной мощности накачки более 1 МВт/см³ и плотности вводимой энергии более 0,4 Дж/см³·атм зажигаемый диффузный разряд становился неустойчивым, что приводило к его контракции. Время формирования разряда увеличивалось с ростом давления газовой смеси. В этих условиях при низкой напряженности приложенного электрического поля дополнительным фактором, обуславливающим появление неустойчивостей в плазме, являлось начальное неоднородное формирование разряда.

В рассмотренных выше случаях устойчивое горение объемного разряда обеспечивалось малой удельной мощностью накачки и низким давлением

* Li Hongda (308544490@qq.com); Иван Николаевич Коновалов (ivan@lgl.hcei.tsc.ru); Юрий Николаевич Панченко (yu.n.panchenko@mail.ru); Алексей Владимирович Пучикин (apuchikin@mail.ru); Михаил Владимирович Андреев (andreevmv_86@mail.ru); Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru).

газовой смеси. Однако для создания таких условий требуется увеличение габаритов CO_2 -лазера из-за необходимости увеличения длины активной среды. Поэтому изучение возможности устойчивого горения объемной плазмы в смеси газов с электроотрицательными компонентами при повышенных энерговкладах и высоких давлениях газовой смеси представляет как научный, так и практический интерес.

Цели настоящей работы — изучить возможности создания компактного импульсного CO_2 -лазера для накачки продольного разряда в переменном магнитном поле и определить условия достижения удельной мощности накачки до 3 МВт/см^3 и эффективной генерации излучения.

Экспериментальная установка и методики измерений

Используемая в экспериментах электрическая схема накачки CO_2 -лазера позволяла зажигать продольный разряд с возможностью наложения внешнего переменного магнитного поля в разные моменты времени относительно импульса напряжения, приложенного к электродам разрядной трубки [11]. Вихревое электрическое поле, создаваемое магнитным полем, генерировалось соленоидом, навитым на разрядную трубку лазера [12, 13].

Схематичное изображение конструкции лазера и электрическая схема накачки представлены на рис. 1.

Кварцевая разрядная трубка длиной 200 мм и внутренним диаметром 17 мм заполнялась смесями газов с соотношением компонентов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$ или $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{He} = 1:1:0,2:3$ до давления $p = 0,03\text{--}0,4$ атм. Кольцевые острийные электроды устанавливались внутри разрядной трубки. Двухступенчатая схема возбуждения лазера состояла из трехступенчатого генератора высоковольтных импульсов (ГИН) с накопительными емкостями $C_1 = C_2 = C_3 = C_{\text{HVG}}$ и обостряющей емкости C_4 , подключенной к разрядной трубке. Емкости были собраны из конденсаторов марки TDK UNV-6A 30 кВ; ГИН соединялся с обостряющей емкостью и катодом разрядной трубки малоиндуктивной шиной или протяженным коаксиальным кабелем РК 50-4-11. Емкость ступеней ГИН изменялась от 0,2 до 5,4 нФ, зарядное напряжение U_0 на них варьировалось от 15 до 25 кВ. Использование ГИН и изменение индуктивности L_1 позволяло варьировать в широких пределах длительность переднего фронта и амплитуду импульса напряжения на разрядной трубке.

Магнитное поле внутри соленоида L_2 обеспечивалось протеканием через него импульса тока при разрядке емкости $C_L = 0,2$ нФ коммутируемым разрядником первой ступени ГИН. Разрядный ток регистрировался с помощью токового шунта $R_{\text{sh}}^{\text{т}}$, напряжение на трубке и на соленоиде — с помощью резистивных делителей напряжения $R_1\text{--}R_4$. Импульс лазерного излучения формировался с помощью оптического резонатора, образованного плоским зеркалом с коэффициентом отражения $R \sim 95\%$ и плоскопараллельной выходной пласти-

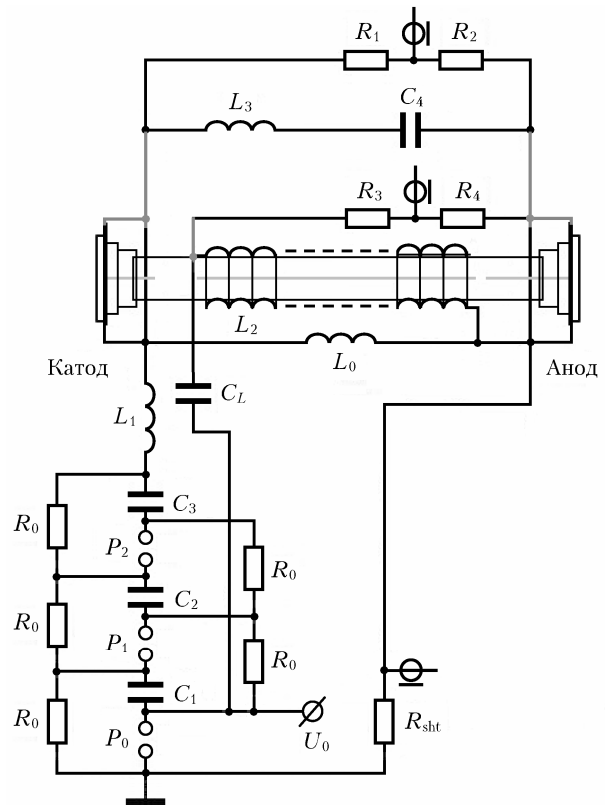


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции лазера и электрическая схема накачки: накопительные емкости $C_1 = C_2 = C_3 = 0,2\text{--}5,4$ нФ; зарядное напряжение $U_0 = 15\text{--}25$ кВ; зарядная емкость, подключенная к соленоиду, $C_L = 0,2$ нФ; индуктивности $L_1 = 500$ нГн, $L_2 = 1\text{--}3$ мкГн, $L_3 = 100$ нГн; обостряющая емкость $C_4 = 0,2$ нФ; $R_{\text{sh}}^{\text{т}}$ — тоновый шунт; $R_1\text{--}R_4$ — резистивные делители напряжения; $R_0 = 4$ кОм — зарядное сопротивление ступеней ГИН; $P_0\text{--}P_2$ — искровые зарядники

ной ZnSe с $R \sim 75\%$. Распределение энергии генерируемого излучения по сечению разрядной трубки оценивалось по пятну, создаваемому на ИР-детекторе VRC6S.

Результаты экспериментов

В экспериментах с малогабаритным CO_2 -лазером изучались условия зажигания и горения продольного разряда в переменном магнитном поле [11] и без него [14]. В обоих режимах использовалась газовая смесь с соотношением компонентов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2 = 1:1:0,2$, зарядное напряжение на емкостях ГИН $U_0 = 22$ кВ. В первом случае для эффективного формирования разряда на стеклянной трубке размещался металлический экран длиной 150 мм, соединенный с катодом. В такой конструкции разряд при $p \leq 0,02$ атм зажигался вблизи внутренней поверхности камеры, в поперечном сечении имел форму кольца шириной ~ 2 мм. При добавлении гелия в газовую смесь в соотношении $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{H}_2:\text{He} = 1:1:0,2:3$ в диапазоне давлений до 0,1 атм ширина кольцевой области горения разряда увеличивалась, при этом уменьшалось

сопротивление сформированной плазмы и возрастал разрядный ток.

Для зажигания продольного разряда в переменном магнитном поле с внешней стороны разрядной трубки устанавливался соленоид длиной 150 мм с индуктивностью $L_2 = 2,2$ мкГн. В этом случае сформированная плазма равномерно заполняла трубку, при этом амплитуда импульса тока была в 4 раза (без гелия в смеси) и 2 раза (при добавлении гелия) больше, чем при зажигании продольного разряда без магнитного поля.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на трубке U_{tube} и тока разряда I_{tube} , ЭДС электромагнитной индукции U_{solenoid} , создаваемой соленоидом.

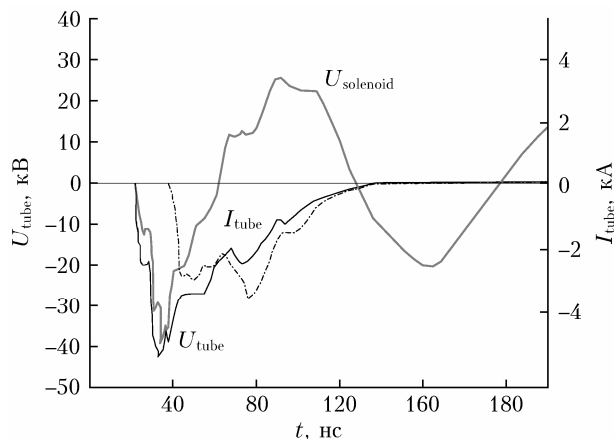


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, тока и ЭДС индукции в разрядной трубке при $C_{\text{HVG}} = 2,7$ нФ, $C_4 = 0,2$ нФ, $U_0 = 25$ кВ, $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{H}_2 : \text{He}$, $p = 0,06$ атм

На динамику зажигания объемного разряда, а также на энергию генерируемого излучения существенно влияла скорость нарастания напряжения на трубке. При уменьшении U_0 на ГИН длительность горения объемного разряда увеличивалась до 500 нс, генерируемое излучение начинало приобретать форму кольца.

Горение однородного объемного разряда и генерация лазерного излучения возникали в диапазоне давлений исследуемых смесей газов $p = 0,03$ – $0,4$ атм. Однако в условиях нашего эксперимента при зарядных напряжениях на ступенях ГИН до 25 кВ оптимальное давление смеси газов $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{H}_2 : \text{He}$, при котором достигалась максимальная энергия излучения, составляло 0,06 атм (рис. 3).

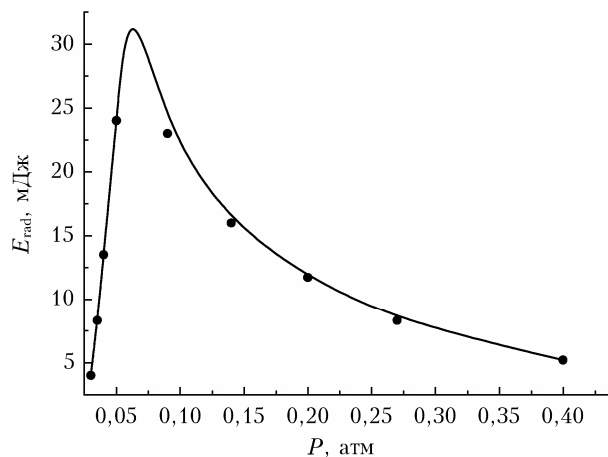


Рис. 3. Зависимость энергии импульсов излучения E_{rad} от давления p газовой смеси при $C_{\text{HVG}} = 2,7$ нФ, $C_4 = 0,2$ нФ, $U_0 = 25$ кВ

При более высоких давлениях газа в трубке амплитуда импульса разрядного тока снижалась, уменьшение мощности накачки лазера приводило к уменьшению энергии импульсов излучения и кольцевой форме области горения разряда. При уменьшении длины разрядной трубки до 117 мм и возбуждении лазера продольным разрядом в переменном магнитном поле порог генерации достигался при давлении смеси 0,2 атм, оптимальное давление смеси составило 0,27 атм. При уменьшении габаритов CO_2 -лазера путем уменьшения длины разрядной трубки для эффективного развития фотонной лавины нужна более плотная активная среда. Для увеличения мощности накачки лазера необходимо повышать давление смеси газов.

Зависимость энергетических характеристик лазера приведена в таблице.

При $C_{\text{HVG}} = 0,7$ – $5,4$ нФ и $U_0 = 15$ – 25 кВ зависимости мощности накачки P_{pump} и энергии импульсов излучения E_{rad} от плотности вводимой энергии W_{sp} представлены на рис. 4. Состав и давление газовой смеси те же самые.

При $C_{\text{HVG}} = 0,7$ нФ и $p = 0,03$ – $0,3$ атм энергия импульсов излучения не превышала 3,5 мДж. Низкий уровень вводимой энергии оказывал влияние и на равномерность распределения плазмы по сечению трубки. При $C_{\text{HVG}} = 2,7$ нФ энергия генерируемых импульсов излучения достигала 32 мДж с равномерным распределением интенсивности излучения по сечению пучка. При дальнейшем увеличении емкости в ступенях ГИН энергия генерируемых

Энергетические характеристики CO_2 -лазера в зависимости от зарядного напряжения

U_0 , кВ	U_{tube} , кВ	I_{tube} , кА	E/P , кВ/см $\cdot$ атм	J , кА/см 2	P_{pump} , мВт/см 3	W_{sp} , Дж/см $^3 \cdot$ атм	E_{rad} , мДж
19	28	2,0	21,5	0,88	1,14	0,49	8,83
22	37	2,5	28,4	1,10	1,93	0,66	10,9
23	39	2,6	30,0	1,15	2,13	0,72	11,9
24	45	2,7	34,6	1,19	2,40	0,79	19,1
25	46	2,9	35,3	1,28	2,70	0,86	32,0

Примечание. E/P – приведенная напряженность электрического поля в разрядном промежутке; J – плотность тока разряда.

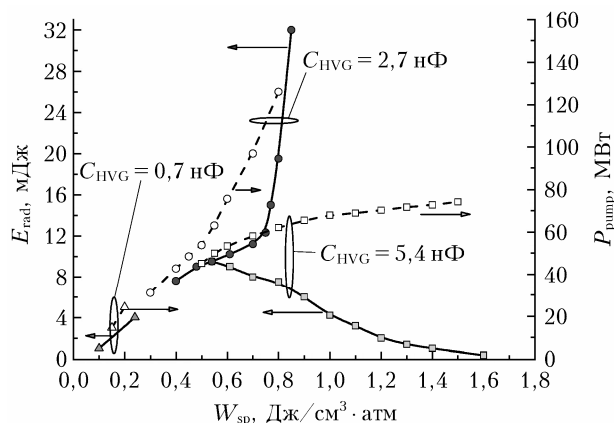


Рис. 4. Зависимости мощности накачки и энергии генерируемых импульсов излучения от плотности энергии, вводимой в разрядную трубку, при $C_{HVG} = 0,7; 2,7; 5,4$ нФ и от зарядных напряжений на них от 15 до 25 кВ

импульсов излучения ограничивалась уровнем 10 мДж. Вследствие ограничения уровня вводимой энергии увеличение емкости ступеней ГИН более 2,7 нФ приводило к необходимости уменьшения зарядного напряжения на них. Однако при этом снижалась мощность импульса накачки и уменьшалась эффективность генерации лазерного излучения. Максимальная мощность излучения в первом пике генерируемого импульса составила 0,5 МВт при длительности ~ 30 нс на уровне половины интенсивности.

Обсуждение результатов

С нашей точки зрения, результаты, полученные при работе CO_2 -лазера с накачкой продольным разрядом в переменном магнитном поле, можно объяснить следующим образом. При подаче импульса напряжения на трубку в начальной стадии зажигания разряда в резко неоднородном электрическом поле около электродов происходила предварительная ионизация газа за счет формирующихся стримеров и высокоэнергетических электронов [15]. В последующем встречное развитие скользящего разряда по внутренней поверхности трубки от катода и плазменных стримеров от анода обеспечивали ионизацию газа генерируемым УФ-излучением с экспоненциальным уменьшением его интенсивности в направлении к оси трубки. С ростом амплитуды разрядного тока с поверхности острейного катода начинался интенсивный отбор электронов, протекавший в режиме взрывной эмиссии. Около обоих электродов формировалось множество диффузных каналов. При отсутствии магнитного поля каналы, расширяясь на расстоянии до 1,5 см от электродов, образовывали кольцевую область разряда с однородным распределением плазмы. С ростом давления выше 0,1 атм область разряда в кольце начинала сужаться, стягиваясь к внутренней поверхности трубки [15].

Формирование плазменного столба с равномерным распределением плазмы в разрядной трубке обеспечивалось переменным магнитным полем, соз-

даваемым соленоидом. При зарядке обостряющей емкости C_4 от ГИН емкость C_L начинала создавать ток в соленоиде, генерирующем вихревое электрическое поле с ЭДС самоиндукции $-L_2 \cdot dI/dt \approx 20$ кВ. При магнитной индукции, достигающей 0,6 Тл, возникали круговое движение и ускорение начальных электронов. При индукционном нагреве электронов до 20 эВ их скорость нарастала до $\sim 2,6 \cdot 10^8$ см/с. Под действием напряжения, приложенного к электродам разрядной трубки, скорость дрейфа электронного облака вдоль трубки составила $(2-4) \cdot 10^7$ см/с. В промежутках между столкновениями с газом многократно ускорялось вращение и нарастал суммарный заряд электронов, индуцировались циркулярные электрические токи, повышая концентрацию электронов в газе до $\sim 10^{10}$ см $^{-3}$ и обеспечивая более равномерное распределение начальных электронов в трубке в предпробойной стадии формирования разряда. При достижении пробивного напряжения и зажигании объемного разряда в трубке соленоид под действием продольного разрядного тока генерировал ЭДС взаимной индукции до 25–37 кВ. Суперпозиция вихревых электрических полей обеспечивала формирование объемного разряда с однородным распределением плазмы в разрядной трубке.

Таким образом, при возбуждении CO_2 -лазера импульсным продольным разрядом в переменном магнитном поле с длиной разрядной трубки 200 мм получены энергия генерируемых импульсов излучения 32 мДж, эффективность преобразования запасаемой энергии в излучение 3,4%. Устойчивость горения и однородность объемного разряда достигнуты при следующих энергетических характеристиках лазера: $E/P = 20-30$ кВ/см $\cdot$ атм; $J \sim 1$ кА/см 2 ; $P_{\text{пумп}} = 2-2,7$ МВт/см 3 ; $W_{\text{сп}}$ — до 0,86 Дж/см $^3 \cdot$ атм.

При работе лазера в этих условиях наблюдалось близкое к равномерному распределение интенсивности излучения по сечению пучка. При удельной мощности накачки менее 1 МВт/см 3 на осевой линии плазменного столба снижалась плотность разрядного тока, что приводило к снижению интенсивности излучения в центральной части лазерного пучка. Поперечная модовая структура излучения на выходе из лазера не проявлялась, что, по-видимому, было обусловлено ограничением длительности горения разряда из-за возникающих неустойчивостей в плазме.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование оригинального импульсного CO_2 -лазера, предназначенного для лидарных систем, исследующих состояние загрязнения атмосферного воздуха. Показана возможность эффективной накачки лазера продольным разрядом в переменном магнитном поле. Изучено влияние параметров схемы питания лазера и вольт-амперных характеристик разряда на энергию генерируемых импульсов. Определены условия горения однородной объемной плазмы

в газовой смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{H}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 0,2 : 3$ для диапазона давлений от 0,03 до 0,4 атм при удельной мощности накачки в интервале 1–2,7 МВт/см³. Разработан малогабаритный CO_2 -лазер с разрядной трубкой длиной 200 мм, генерирующий излучение с энергией в импульсе 32 мДж; полный КПД лазера составляет 3,4%.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030) и в рамках государственного задания ФНИ СО РАН (№ FWRM-2021-0014).

Список литературы

1. Webber M.E., Pushkarsky M., Patel C.K. Optical detection of chemical detection of chemical warfare agents and toxic industrial chemicals: Simulation // J. Appl. Phys. 2005. V. 97, N 11. P. 113–124.
2. Иващенко М.В., Шерстов И.В. Дальность действия лидара дифференциального поглощения на основе CO_2 -лазера // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 4. С. 747–752.
3. Горобец В.А., Петухов В.О., Тоцицкий С.Я., Чураков В.В. Перестраиваемый по линиям обычных и нетрадиционных полос TE CO_2 -лазер для лидарных систем // Квант. электрон. 1995. Т. 22, № 5. С. 514–518.
4. Panchenko Yu.N., Losev V.F., Puchikin A.V., Jun Y. The TEA CO_2 lasers with high output emission intensity // Russ. Phys. J. 2014. V. 56, N 11. P. 1246–1249.
5. Chung H.J., Lee D.H., Hong J.H., Joung J.H., Sung Y.M., Park S.J., Kim H.J. A simple pulsed CO_2 laser with long milliseconds pulse duration // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73, N 2. P. 484–485.
6. Uno K., Nakamura K., Goto T., Jitsuno T. Longitudinally excited CO_2 laser with short laser pulse like TEA CO_2 laser // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2009. V. 30, N 11. P. 1123–1130.
7. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. Discharge lasers pumped by generators with inductive energy storage // IEEE J. Quant. Electron. 1999. V. 35, N 3. P. 261–266.
8. Bethel J.W., Baker H.J., Hall D.R. A new scalable annular CO_2 laser with high specific output power // Opt. Commun. 1998. V. 125. P. 352–358.
9. Uno K., Nakamura K., Goto T., Jitsuno T. Simple short-pulse CO_2 laser excited by longitudinal discharge without high-voltage switch // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2012. V. 33, N 5. P. 485–490.
10. Uno K., Dobashi K., Akitsu T. Simple short-pulse CO_2 laser excited by longitudinal discharge without high-voltage switch // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2012. V. 33, N 5. P. 485–490.
11. Газоразрядное устройство с продольно-поперечным разрядом: Пат. RU 206537 U1. Россия, МПК H01S 3/0975. I.N. Konovalov, Yu.N. Panchenko, V.F. Losev, A.V. Puchikin; 2021113333, 2021.05.11.
12. Манучарян Р.Г., Мхитарян В.М., Геворкян Г.С. Импульсно-периодические индукционные газовые лазеры с поперечным разрядом // Сб. трудов конференции «Лазерная физика-2004». Аштарак, Армения, 2005. С. 83–84.
13. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. MW peak-power UV inductive nitrogen laser // Appl. Phys. B. 2020. V. 126, N 6.
14. Азотный лазер, возбуждаемый продольным электрическим разрядом: Пат. RU 2664780 C1, Россия, МПК H01S 3/038. Yu.N. Panchenko, I.N. Konovalov, V.F. Losev, A.V. Puchikin, 2017139170, 2017.11.10.
15. Alekseev S.B., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Tkachev A.N., Yakovlenko S.I. Electron beam formation in atmospheric pressure gases and its application for discharge preionization in a CO_2 laser // Laser Phys. 2004. V. 14, N 6. P. 795–808.

Li Hongda, I.N. Konovalov, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin, M.V. Andreev, S.M. Bobrovnikov.
Pulsed CO_2 laser pumped by a longitudinal discharge in an alternating magnetic field.

An original technique for pumping a pulsed CO_2 laser with a longitudinal discharge in an alternating magnetic field is proposed and implemented. Based on this technique proposed technique, a small CO_2 laser with an active medium length of ~200 mm, a pulse energy of ~30 mJ, and an efficiency of 3.4% is designed. It is revealed that the main factor which limits the generation energy of small lasers is the development of current instabilities in a longitudinal discharge across a cross section of the discharge tube. It is noted that the growth of instabilities accelerates with increasing pressure of a $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{H}_2 : \text{He}$ gas mixture to more than 0.1 atm and the specific pump power to more than 3 MW/cm³. The use of an external alternating magnetic field superimposed on a pulsed longitudinal discharge makes it possible to increase the total pressure of the gas mixture in the laser to 0.4 atm while maintaining the combustion of the volume discharge.