

УДК 621.373.826

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА НАКАЧКИ НА ОГРАНИЧЕНИЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕА-СО<sub>2</sub> ЛАЗЕРА

**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

**Е. А. Козлов**, к.т.н., доцент кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.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

*При возбуждении ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеров на частотах повторения импульсов более 300 – 500 Гц в разрядном промежутке образуются зоны с повышенной яркостью свечения – «макронеоднородности» плазмы. Их образование инициирует перерождение объемного разряда накачки в сильноточный локальный и срыв генерации лазерного излучения. Устранение макронеоднородностей плазмы обеспечивает увеличение частоты повторения импульсов в 1,5 – 2 раза и уровня средней мощности излучения в 1,3 раза.*

***Ключевые слова:** ТЕА-СО<sub>2</sub> лазер, накачка, объемный разряд, предионизация, макронеоднородности плазмы, локализация объемного разряда, частота повторения импульсов, средняя мощность излучения.*

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-263-269

### Введение

Проблема увеличения частоты повторения импульсов и достижения более высоких уровней средней мощности излучения в ТЕА-СО<sub>2</sub> лазерах связана, в первую очередь, с сохранением пространственной однородности плазмы объемного разряда накачки [1-3]. Плотность энергии накачки и время жизни объемного разряда ограничиваются его перерождением в сильноточный локальный канал. Процесс локализации объемного разряда может происходить в результате развития целого ряда плазменных неустойчивостей под влиянием продуктов плазмохимических реакций, неточностей изготовления и установки основных электродов, тепловых неустойчивостей и снижения уровня начальных электронов на стадии предварительной ионизации в результате их прилипания к электроотрицательным соединениям [4-9].

При работе ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера на частотах повторения импульсов в сотни герц появляются дополнительные факторы, приводящие к локализации объемного разряда и срыву генерации лазерного излучения, например, под воздействием ударных волн от самого объемного разряда и локального разогрева поверхности электродов локальными разрядами [4, 5]. В этих случаях нарушения пространственной однородности плазмы объемного разряда могут носить характер «макронеоднородностей», т. е. областей с повышенной и пониженной яркостью свечения.

В настоящей работе приводятся результаты изучения причин образования макронеоднородностей плазмы объемного разряда накачки и их влияния на параметры малогабаритного отпаянного импульсно-периодического ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера.

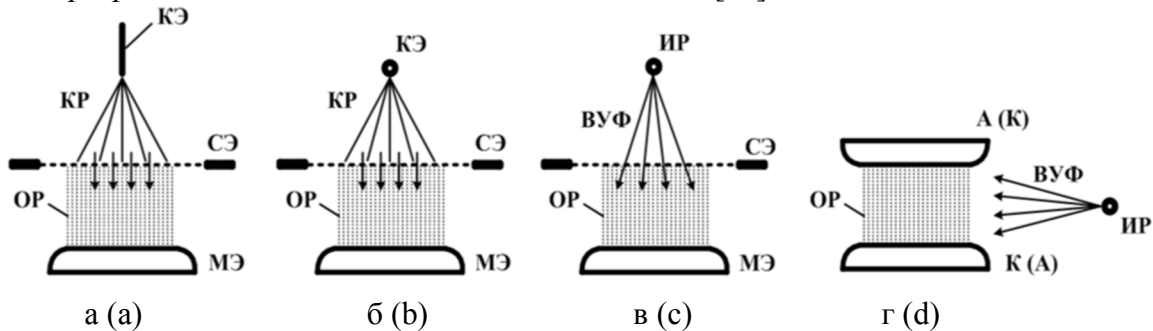
### Экспериментальная установка и электродные структуры

В состав экспериментальной установки входили ТЕА-СО<sub>2</sub> лазер с объемом активной среды  $V = 42 \times 1,5 \times 0,8 \text{ см}^3 \approx 50 \text{ см}^3$ , высоковольтные импульсные генераторы накачки, система

откачки и наполнения активного элемента рабочими газами с заданными парциальными давлениями при полном давлении в 1 атмосферу и измеритель средней мощности лазерного излучения ИМО-2Н с механическим ослабителем.

Варианты электродных структур, применявшихся для зажигания объемного разряда накачки, приведены на рисунке 1.

Инициирование объемного разряда во всех структурах осуществлялось в результате облучения основного межэлектродного промежутка и поверхности катода вакуумным ультрафиолетовым излучением (ВУФ-излучением) и создания свободных носителей зарядов после реакций объемной фотоионизации и фотоэффекта. В качестве импульсных генераторов для зажигания вспомогательных и объемных разрядов использовались импульсные трансформаторы или генераторы Маркса с использованием в качестве коммутаторов импульсных водородных тиратронов типа ТГИ2-500/20 или ТГИ1-1000/25 [11].



**Рисунок 1 – Электродные системы для формирования объемных разрядов в  $\text{CO}_2$ -лазерных смесях атмосферного давления (поперечные сечения). Стрелками отображено направление распространения ВУФ-излучения; СЭ, МЭ – сеточный и монокристаллический электроды; ОР – объемный разряд накачки; КР, ИР – вспомогательные коронные и искровые источники ВУФ-излучения**

**Figure 1 – Electrode systems for generation volume discharges in atmospheric-pressure  $\text{CO}_2$ -laser mixtures (cross-sections). Arrows indicate the directions of VUV radiation propagation; GE-, ME-grid and monolithic electrodes; VD – pumping volume discharge; CS, SS – auxiliary corona and spark VUV radiation sources**

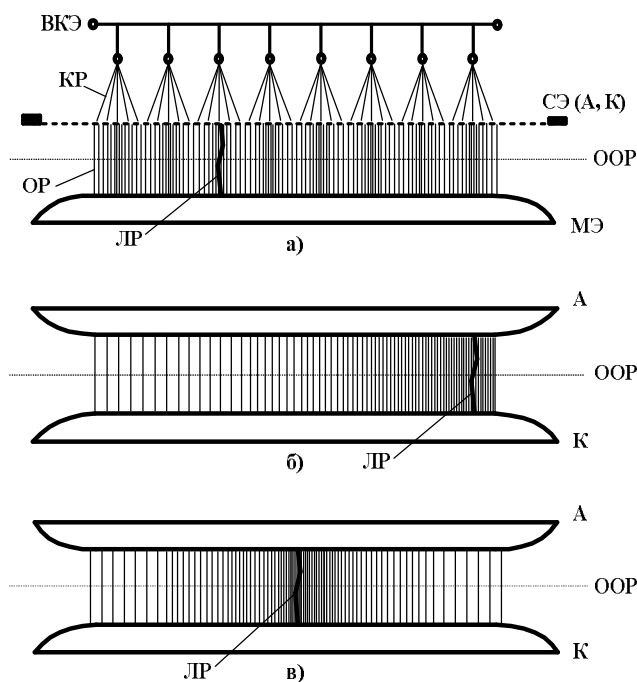
Объемный разряд накачки в приведенных структурах формировался между монокристаллическим профилированным и плоским сеточным (а, б, в) электродами или между двумя монокристаллическими электродами (г). Предварительная ионизация газа в структуре с двумя монокристаллическими электродами осуществляется с помощью протяженного искрового источника (ИР), расположенного сбоку вдоль основных электродов. В зависимости от полярности импульса напряжения, который прикладывается к основным электродам, функции катода или анода может выполнять любой из этих электродов. Коронирующими электродами в вариантах на рисунке 1, а и б являются набор острий или тонкая металлическая нить. Предионизация газа в варианте рисунка 1, в осуществляется с помощью протяженного искрового разряда, электроды которого расположены над сеточным электродом. ВУФ-излучение в вариантах на рисунке 1, а, б, в проникает в основной промежуток через ячейки сетки. Пропускание сеток имело значение на уровне  $\sigma \approx 50\%$ . Величина каждого искрового промежутка составляла 2 мм. Типичные значения плотностей накачки в «типичных» лазерных смесях  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8 - 1 : 1 : 6$  при атмосферном давлении находились в пределах  $120 - 150 \text{ мДж} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Формирование объемного разряда осуществлялось с помощью двух импульсных генераторов с плавно регулируемой задержкой между моментами запуска  $\tau = 0 - 10 \text{ мкс}$ . В течение этого времени задержки в основном промежутке происходит наработка свободных носителей зарядов с концентрацией не менее  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . В зависимости от исходного химического состава рабочей смеси и параметров вспомогательных разрядов время наработки свободных зарядов изменяется. В этих условиях целесообразно иметь возможность подавать напряжение на основные электроды в момент достижения максимального уровня предионизации.

### Результаты исследований

На рисунке 2 приведены качественные изображения распределений плотности свечения плазмы объемного разряда для двух типов электроразрядных структур – трехэлектродной с общим сеточным электродом (рисунок 2, а) и двух вариантов с двумя монолитными электродами и боковым расположением искровых предионизаторов (рисунок 2 б, в). Жирными линиями в областях с повышенной яркостью свечения – макронеоднородностями – отражены сильноточные локальные разряды (ЛР).

В варианте на рисунке 2, а в качестве вспомогательного разряда используются вспомогательные коронирующие электроды (ВКЭ) в виде ряда острий с шагом 1 – 1,5 см. Величина зазора между набором острий и сеточным электродом составляла 1,5 см. Импульсный коронный разряд (КР) зажигался между набором этих острий и общим плоским сеточным электродом. Образующееся в области острий ВУФ-излучение проникает в основной разрядный промежуток и приводит к образованию свободных электрон-ионных пар в объеме в результате реакций объемной фотоионизации и свободных электронов в результате фотоэффекта из поверхности катода. При этом структура объемного разряда повторяет структуру вспомогательного разряда. В одной из таких областей с течением времени происходит трансформация объемного разряда в сильноточный искровой канал.



**Рисунок 2 – Образование макронеоднородностей плазмы объемного разряда в основном разрядном промежутке под воздействием вспомогательного разряда (а), неточной юстировки основных электродов (б), термической деформации основных электродов (в);**

**ЛР – сильноточные локальные разряды; ООР – оптическая ось резонатора лазера**

**Figure 2 – Formation of macroinhomogeneities of volume discharge plasma in main discharge gap under the influence of an auxiliary discharge (a), inaccurate alignment of the main electrodes (b) and thermal deformation of main electrodes (c);**

**LD – high-current local discharges; OAR – optical axis of laser resonator**

Применение в качестве вспомогательного коронирующего электрода тонкой металлической нити исключает образование неоднородностей, вызываемых коронирующими электродами, в виде набора острий. В этом случае образование макронеоднородностей плазмы объемного разряда происходит на более высоких частотах повторения импульсов по сравнению с вариантом электродной структуры с коронирующими электродами в виде набора острий.

Неточности в изготовлении или в установке основных электродов в десятки микрометров также приводят к заметному перераспределению свечения плазмы объемного разряда. На рисунке 2, б приведено распределение плотности свечения, характерное для незначительного «перекося» в установке электродов друг относительно друга. Локальные разряды возникают именно в областях с повышенной яркостью свечения плазмы объемного разряда, т.е. в области образования макронеоднородностей. В ряде случаев в основном разрядном промежутке вдоль его длины формируется несколько макронеоднородностей. При этом локальные каналы образуются преимущественно в тех макронеоднородностях, которые обладают максимальной яркостью свечения.

В [11] было показано, что изменение величины межэлектродного промежутка на 50 мкм при самом промежутке в 5 см инициирует формирование искрового разряда.

При расположении искровых источников ВУФ-излучения в потоке газа, входящего в основной разрядный промежуток, возникающие тепловые возмущения переносятся в основной промежуток и инициируют образование макронеоднородностей, повторяющих расположение искровых промежутков ВУФ-предионизатора вдоль основных электродов.

При работе ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера на частотах повторения импульсов ниже 300 – 500 Гц макронеоднородности плазмы очень слабо выражены или не наблюдаются совсем.

Представленное на рисунке 2, в распределение плотности свечения плазмы объемного разряда соответствует условиям наиболее точной юстировки электродов. Образование макронеоднородности в центральной части разрядного промежутка в этих условиях может быть связано с термической деформацией электродов в результате их нагрева собственным теплом газового разряда. На это указывает также исчезновение макронеоднородности при заметном снижении частоты повторения импульсов.

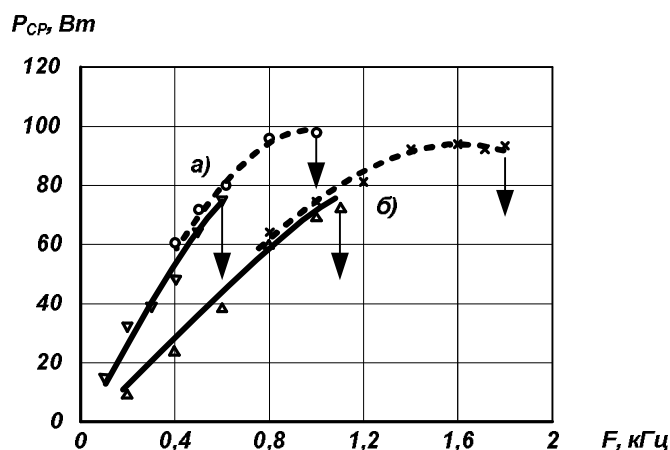
Как было установлено в работе [2], макронеоднородности плазмы объемного разряда образуются не сразу после включения лазера, а спустя некоторое время, которое зависит от исходного химического состава, уровня накачки, точности изготовления и установки электродов, местоположения подогреваемых твердотельных катализаторов и применяемой электродной структуры. Эти факты указывают на решающую роль тепловых процессов в перераспределении плотности тока объемного разряда накачки и образования макронеоднородностей плазмы. Это может проявляться в локальных нагревах общего сеточного электрода (рисунок 2, а), преимущественном нагреве одной из областей межэлектродного промежутка (рисунок 2, б) или наличии термической деформации электродов под воздействием тепла, выделяющегося в основном разрядном промежутке [2]. Термическая деформация наиболее заметна при изготовлении электродов из алюминия, никеля и меди. Наименьшие значения прогиба характерны для электродов из вольфрама.

Устранение причин образования макронеоднородностей плазмы объемного разряда способствует существенному повышению частоты повторения импульсов, выше которой происходит перерождение объемного разряда накачки в локальный канал. Эти меры приводят также к увеличению средней мощности лазерного излучения.

На рисунке 3 приведены характерные зависимости средней мощности лазерного излучения от частоты повторения импульсов для двух составов рабочих смесей. Объемный разряд накачки возбуждался между плоским сеточным и монолитным профилированным электродами. В качестве источника ионизирующего излучения для целей предионизации использовался искровой разряд (вариант электродов из рисунка 1, в). Частично прозрачный для ВУФ-излучения электрод был выполнен из сетки (нержавеющая сталь) с геометрическими размерами ячеек 0,8 × 0,8 мм.

Профилированный монолитный электрод был выполнен из алюминия и электролитически покрыт слоем никеля. Межэлектродный зазор составлял 1,5 см. Газовая смесь с исходным химическим составом СО<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He = 1 : 1 : 6 – 1 : 1 : 8 прокачивалась через основной межэлектродный промежуток скоростными электроventиляторами со скоростью 25 м/с. Такой скорости прокачки газов было достаточно для обеспечения условий зажигания объемно-

го разряда на частотах повторения импульсов до 1,5 – 2 кГц. Общее давление газовой смеси составляло одну атмосферу.



**Рисунок 3 – Зависимости средней мощности лазерного излучения от частоты повторения импульсов при использовании смесей CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>: He = 1:1:6 (а) и 1:1:8 (б). Сплошные линии – в разрядном промежутке имеются макронеоднородности плазмы объемного разряда; штриховые линии – макронеоднородности плазмы устранены**

**Figure 3 – Dependences of average laser radiation power on pulse repetition rate when using mixtures of CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>: He = 1:1:6 (a) and 1:1:8 (b). Solid lines – macroinhomogeneities of volume discharge plasma present in discharge gap; dashed lines – macroinhomogeneities of plasma are eliminated**

Зависимости средней мощности излучения от частоты повторения импульсов носят нарастающий характер с переходом в режим насыщения на наиболее высоких частотах. Стрелками на графиках отражены граничные значения частот повторения импульсов, выше которых объемный разряд накачки трансформируется в локальный.

Снижение скорости нарастания средней мощности излучения на повышенных частотах повторения обусловлено такими факторами, как увеличение степени диссоциации молекул двуокиси углерода и снижение их концентрации как рабочих молекул под воздействием плазмы объемного разряда накачки, так и некоторым нагревом активной среды.

Образование в разрядном промежутке макронеоднородностей плазмы ограничивает максимальные значения частоты зажигания объемного разряда на уровне 0,6 – 1,1 кГц при использовании смесей CO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>: He = 1 : 1 : 6 (а) и 1 : 1 : 8 (б) и средних мощностей излучения на уровне 75 – 70 Вт соответственно. Изготовление электродов с непараллельностями рабочих поверхностей на уровне 10 мкм, тщательная юстировка основных электродов ( $\delta_{\text{мин}} \leq 20$  мкм) и предварительный «прогиб» монолитного электрода в центральной его части на величину термической деформации обеспечивают увеличение максимальной частоты повторения импульсов в  $\approx 1,5 - 2$  раза и уровня средней мощности излучения в  $\approx 1,3$  раза.

### Заключение

Образующиеся в разрядном промежутке макронеоднородности плазмы являются одной из первопричин локализации объемного разряда накачки и ограничивают частоту зажигания объемного разряда на уровне 0,6 – 1,1 кГц.

Основными причинами образования макронеоднородностей плазмы объемного разряда являются следующие:

- тепловое воздействие вспомогательных коронных разрядов предионизации в электродных структурах с общим сеточным электродом;
- расположение искровых источников начальной ионизации в газовом потоке, входящем в основной разрядный промежуток;
- неточности изготовления и установки основных электродов на уровне  $\approx 20$  мкм;

– термические деформации электродов под воздействием тепла, выделяющегося в плазме объемного разряда.

Изготовление и установка основных электродов с непараллельностями порядка 20 мкм и изначальный погиб основных монокристаллических электродов в центральной части до 50 мкм обеспечивает увеличение максимальных частот повторения импульсов с 0,6 – 1,1 кГц до 1 – 1,8 кГц в разрядном промежутке с геометрическими размерами  $V_{\text{ор}} = 42 \times 1,5 \times 0,8 \text{ см}^3 \approx 50 \text{ см}^3$  в рабочих смесях  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 6 - 1 : 1 : 8$  при давлении в одну атмосферу.

#### Библиографический список

1. **Kozlov V.A.** TEA-CO<sub>2</sub> laser with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications, St.-Petersburg, Russia, 27 June - 1 July 2016, Laser Optics. 17th International Conference. Publisher: IEEE DOI: 10.1109/LO.2016.7549705.
2. **Козлов Б.А.** Формирование объемных самостоятельных разрядов в отпаянных импульсно-периодических ТЕА-СО<sub>2</sub> лазерах: специальность 01.04.04 «Физическая электроника»: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Козлов Борис Алексеевич, Рязань, 1999, 286 с. EDN QDANTJ.
3. **Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.** Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных СО<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>- и F<sub>2</sub>-лазеров. М.: Физматлит, 2015. 256 с.
4. **Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старостин А.Н.** Импульсные СО<sub>2</sub>-лазеры и их применение для разделения изотопов. М.: Наука, 1983. 304 с.
5. **Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И.** Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981. 200 с.
6. Газовые лазеры. Под ред. И. Мак-Даниэля и У.Нигена. М.: Мир, 1986. 552 с.
7. **Norris B., Smith A.L.S.** Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA CO<sub>2</sub> lasers. J. Phys.D: Appl. Phys. 1977. Vol. 10. P. 237-240.
8. **Смит К., Томсон Р.** Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир. 1981. 516 с.
9. **Баранов В.Ю., Малюта Д.Д., Межевов В.С., Напартович А.П.** Перегревно-акустическая неустойчивость в импульсно-периодических лазерах. Физика плазмы. 1989. Т.6. Вып. 4. С. 785-792.
10. **Горячкин Д.А., Иртуганов В.М., Калинин В.П.** О влиянии электродной системы на равномерность газового разряда ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера. ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 46-50.
11. **Kozlov V.A., Payurov A.Ya.** Super-atmospheric CO<sub>2</sub> laser with pulse repetition rate up to 2 kHz, Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 113220F (11 December 2019). DOI:10.1117/12.2550676.

UDC 621.373.826

### ANALYSIS OF PUMPING DISCHARGE PLASMA MACROINHOMOGENEITIES INFLUENCE ON THE LIMITATIONS OF TEA-CO<sub>2</sub> LASER AVERAGE RADIATION POWER

**V. 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

**E. A. Kozlov**, PhD (technical sciences), associate professor, department of industrial electronics RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2038-6732, e-mail: ewg.kozlov2015@yandex.ru

**D. S. Makhanko**, PhD (technical sciences), senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;

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

*When TEA-CO<sub>2</sub> lasers are excited at pulse repetition frequencies exceeding 300 – 500 Hz, the zones with increased glow brightness – plasma «macroinhomogeneities» are formed in the discharge gap. Their*

formation initiates the transformation of pumping volume discharge into a high-current local discharge and the breakdown of laser radiation generation. Eliminating plasma macroinhomogeneities enables an increase in pulse repetition frequency by 1,5 – 2 times and in average radiation power level by 1,3 times.

**Keywords:** TEA CO<sub>2</sub>-laser, pumping, volume discharge, preionization, plasma macroinhomogeneities, volume discharge localization, pulse repetition frequency, average radiation power.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-263-269

### References

1. **Kozlov B.A.** TEA-CO<sub>2</sub> laser with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications. St.-Petersburg, Russia, 27 June - 1 July 2016, *Laser Optics. 17th International Conference*. Publisher: IEEE DOI: 10.1109/LO.2016.7549705.
2. **Kozlov B.A.** Formirovanie ob'emnyh samostoyatel'nyh razryadov v otpayannyh impul'sno-periodicheskikh TEA-SO<sub>2</sub> lazerah: special'nost' 01.04.04 «Fizicheskaya ehlektronika»: *dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk*. Kozlov Boris Alekseevich, Ryazan', 1999, 286 s. EDN QDAHTJ.
3. **Homich V.Yu., Yamshchikov V.A.** Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo возбуждениya moshchnykh CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>- i F<sub>2</sub>-lazerov. Moscow, *Fizmatlit*, 2015, 256 p. (in Russian).
4. **Velihov E.P., Baranov V.Yu., Letohov V.S.** and others. Impul'snye CO<sub>2</sub> lazery i ih primeneniye dlya razdeleniya izotopov. Moscow, *Nauka*, 1983, 304 p. (in Russian).
5. **Karnyushin V.N., Solouhin R.I.** Makroskopicheskie i molekulyarnye processy v gazovykh lazerah. Moscow. *Atoimizdat*. 1981. 200 p. (in Russian).
6. Gazovye lazery. Pod red. I.Mak-Danielya i U.Nigena. Moscow. *Mir*. 1986, 552 p. (in Russian).
7. **Norris B., Smith A.L.S.** Attachment loss of photo-ionization electrons in TEA CO<sub>2</sub> lasers. *J. Phys.D: Appl. Phys.* 1977, vol. 10, pp. 237-240.
8. **Smit K., Tomson R.** Chislennoe modelirovanie gazovykh lazerov. Moscow. *Mir*. 1981. 516 p. (in Russian).
9. **Baranov V.Yu., Malyuta D.D., Mezhevov V.S., Napartovich A.P.** Peregreveno-akusticheskaya neustojchivost' v impul'sno-periodicheskikh lazerah. *Fizika plazmy*. 1989, vol. 6, no. 4, pp. 785-792. (in Russian).
10. **Kline L.E., Denes L.J.** Investigations of glow discharge formation with volume preionization. *J. Appl. Phys.* 1975, vol. 46, pp. 1567-1574.
11. **Goryachkin D.A., Irtuganov V.M., Kalinin V.P.** O vliyaniy elektrodnoj sistemy na ravnomernost' gazovogo razryada TEA-CO<sub>2</sub> lazera. *ZhTF*. 1989, vol, 59, no. 6, pp. 46-50. (in Russian).
12. **Kozlov B.A., Payurov A.Ya.** Super-atmospheric CO<sub>2</sub>- laser with pulse repetition rate up to 2 kHz, Proc. SPIE 11322, *XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, 113220F (11 December 2019). DOI: 10.1117/12.2550676.