

**ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.378.324

**АВТОЭМИССИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ КАТОДОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТЕА-СО<sub>2</sub> ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ****Б. А. Козлов**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-4747-6340, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

**Май Тхэ Нгуен**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-4360-853X, e-mail: maithenguyen.ryazan@gmail.ru

*Изучено влияние наноструктурированных углеродных покрытий на плотность тока и энергию накачки в малогабаритных отпаянных ТЕА-СО<sub>2</sub> лазерах. Установлено, что нанесение тонких слоев углеродной сажи, содержащей углерод в различных наноструктурированных формах, способствует увеличению плотности тока объемного разряда накачки в 1,5 – 2,2 раза, а плотности энергии накачки в 2 – 2,4 раза в СО<sub>2</sub>-лазерных смесях при атмосферном давлении. Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном изучении автоэлектронных характеристик катодов, покрытых углеродной сажой, и определении взаимосвязей плотности тока объемного разряда и энергии накачки в разрядных промежутках, образованных металлическими электродами и такими же электродами, покрытыми слоем углеродной сажи.*

**Ключевые слова:** наноструктурированные формы углерода, автоэлектронный ток, ток объемного разряда, плотность тока, энергия накачки, СО<sub>2</sub>-лазерная смесь.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2020-71-180-187**Введение**

Накачка ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеров осуществляется в плазме объемного разряда. Устойчивые объемные разряды с высокой плотностью энергии накачки формируются при использовании интенсивной начальной ионизации рабочих газов в газоразрядном промежутке до момента пробоя и последующим эффективным воспроизводством электронов на катоде после стадии пробоя [1-3]. Воспроизводство электронов на катоде в плазме объемного разряда обеспечивается преимущественно вторичной ион-электронной эмиссией ( $\gamma$ -процесс) и автоэлектронной эмиссией, вызываемой сильными электрическими полями в области катодного падения потенциала [3-5]. Напряженности электрических полей в области катодного падения потенциала могут достигать  $10^6$ – $10^7$  В/см. Эти две составляющие электронного тока с катода могут стать соизмеримыми при больших плотностях тока. Для увеличения автоэлектронной компоненты тока объемного разряда целесообразно покрывать рабочие поверхности катодов тонкими слоями углеродной сажи, содержащей углерод в различных наноструктурированных формах. Такие слои обеспечат достаточно однородное распределение микро- и наноавтоэлектронных эмиттеров по поверхности катода. В этих обстоятельствах достаточно сильное электрическое поле будет усиливаться на множестве распределенных микро- и наноэмиттеров и сможет привести к заметному увеличению тока накачки.

**Экспериментальная часть**

При проведении исследования применялись две различные экспериментальные установки. Первая из них предназначалась для проведения автоэлектронных измерений в вакууме, и ее структура приведена на рисунке 1. В ее состав входят вакуумный баллон (ВК) из стекла,

анод из полированного никеля (А), исследуемый катод (К) и сильфонный узел (СУ). С помощью последнего можно было изменять величину межэлектродного промежутка  $d_{AK}$  в пределах от 1 до 10 мм в вакууме без нарушения давления в вакуумном баллоне. Для откачки вакуумного баллона применялся магниторазрядный насос НЭМ–350, который обеспечивал остаточное давление газов в баллоне до  $10^{-8}$  торр.

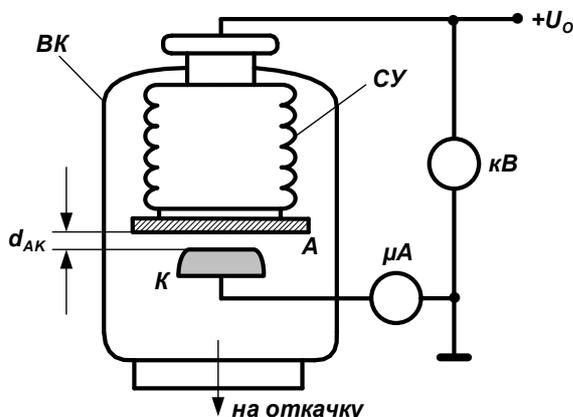


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для изучения автоэлектронных характеристик катодов

Figure 1 – Diagram of an experimental setup for studying the field-specific characteristics of cathodes

Высокое напряжение от регулируемого источника величиной до 40 кВ прикладывалось к сильфонному узлу относительно общего корпуса. Величина напряжения на промежутке «анод-катод» измерялась статическим вольтметром типа С-96. Токи автоэлектронной эмиссии при проведении опытов в пределах трех порядков измерялись с помощью стрелочных микроамперметров марки М-95.

Микроструктура рабочих поверхностей электродов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL-MSD-6604.

Углеродная сажа для проведения опытов получилась в отдельном электродуговом реакторе в плазме сильноточного дугового разряда в атмосфере гелия.

На рабочую поверхность катода сажа наносилась пульверизатором из ее взвеси в этиловом спирте или в воде. Вольт-амперные характеристики автоэлектронных токов, получаемые в процессе проведения исследований, отражались далее в специфических координатах Фаулера-Нордгейма, которые по известным значениям работы выхода электронов из исследуемого материала могли давать информацию о значениях коэффициентов усиления электрического в области эмиттера, а также величину площади эмитирующей поверхности.

Вторая секция экспериментальной установки состояла из малогабаритного отпаянного ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера с кварцевой оболочкой диаметром 86 мм и импульсного источника накачки. Структурная схема активного элемента лазера (в разрезе) приведена на рисунке 2.

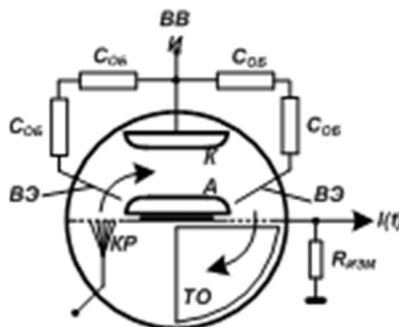


Рисунок 2 – Структурная схема активного элемента малогабаритного ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера

Figure 2 – Structure scheme of small-sized TEA-CO<sub>2</sub> active element

Основные электроды А-К для зажигания объемного разряда изготовлены из никеля и имеют следующие геометрические размеры:  $V_A=18 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$ . Длина кварцевой оболочки активного элемента составляла 38 см, длина резонатора 44 см. С двух сторон относительно анода с шагом в 1,5 см располагались вспомогательные электроды (ВЭ).

Между ними зажигались вспомогательные искровые разряды. УФ-излучение этих искровых разрядов осуществляет начальную ионизацию рабочего газа в промежутке А-К. Величина энергии в каждом из искровых промежутков ограничивалась последовательностью высоковольтных обостряющих импульсных конденсаторов  $C_{об}$ . Высоковольтный импульс от генератора накачки одновременно прикладывается в точке ВВИ к основному разрядному промежутку А-К и к множеству вспомогательных искровых промежутков. Поскольку вспомогательные промежутки имеют протяженности от 2 до 3 мм, а основной промежутков  $d_{AK}=8 \text{ мм}$ , то искровые промежутки пробиваются на переднем фронте импульса накачки и к моменту достижения напряжения пробоя основного промежутка рабочая смесь в нем уже подвергнута предварительной ионизации. Такая задержка во времени обеспечивает однородный пробой основного разрядного промежутка. Параметры импульсов напряжения и тока накачки контролировались с помощью резистивного делителя (на рисунке 2 он не приведен), который подключался к точке ВВИ (высоковольтный импульс), и резистивного шунта тока  $R_{изм}$ . Напряжение, вырабатываемое на этом резисторе при протекании тока, пропорционально величине разрядного тока.

Вспомогательный коронный разряд (КР), зажигаемый между коронирующим и сеточным электродами, формирует внутри активного элемента «электрический ветер», что позволяет увеличить частоту повторения импульсов с единиц герц до десятков герц [6]. Водоохлаждаемый малогабаритный теплообменник (ТО) из медных пластин обеспечивает температуру рабочей смеси внутри активного элемента на уровне 25 – 40 °С. Последнее оказывает заметное влияние на энергетические параметры малогабаритных ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеров [7].

### Результаты исследований

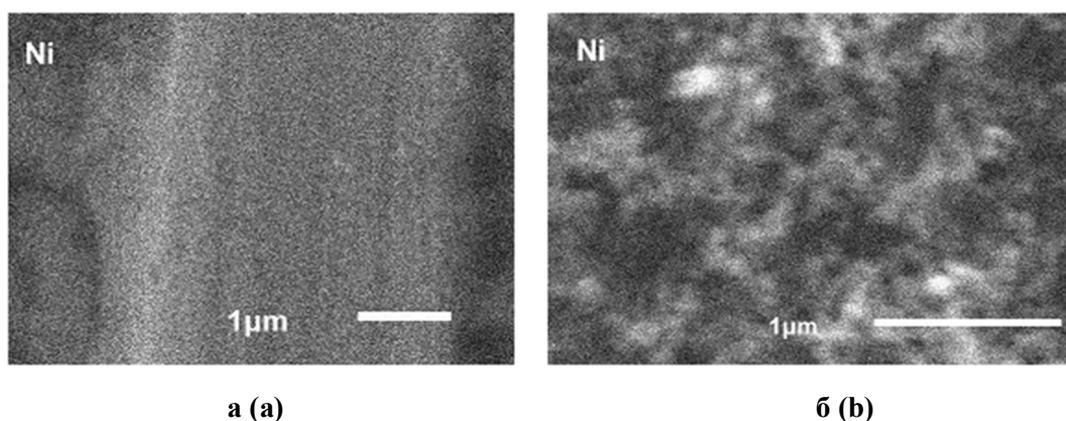


Рисунок 3 – Фотографии рабочих поверхностей катода из никеля (а) и из никеля, покрытого тонким слоем углеродной сажи (б)

Figure 3 – Photographs of the cathode working surfaces made of nickel (a) and nickel coated with a thin layer of carbon soot (б)

На рисунке 3 приведены фотографии рабочих поверхностей катода из никеля (а) и из никеля, покрытого тонким слоем углеродной сажи (б). Из фотографий видно, что микрорельеф поверхности катода, покрытого слоем сажи, выглядит более неоднородным. Такие неоднородности являются потенциальными источниками усиленной по величине автоэлектронной эмиссии, поскольку вблизи всех микровыступов происходит значительное (иногда на порядки) [4, 5, 8] усиление напряженности электрического поля  $\beta$ .

Поэтому наличие множества микроэмиттеров может внести заметный вклад в величину тока накачки.

На рисунке 4 приведены вольт-амперные характеристики автоэлектронных токов в координатах Фаулера-Нордгейма для катода из никеля (а) и катода, покрытого углеродной сажей (б). Согласно методике изучения автоэлектронных эмиттеров [1, 5, 9], по углу наклона характерной «прямой» и по известному значению работы выхода электронов можно определить коэффициент локального усиления электрического поля  $\beta$ . Согласно приведенным на рисунке 4 данным соответствующие значения коэффициентов усиления электрического поля составляют:  $\beta_{Ni} \approx 340$  и  $\beta_{Ni+C} \approx 1340$ .

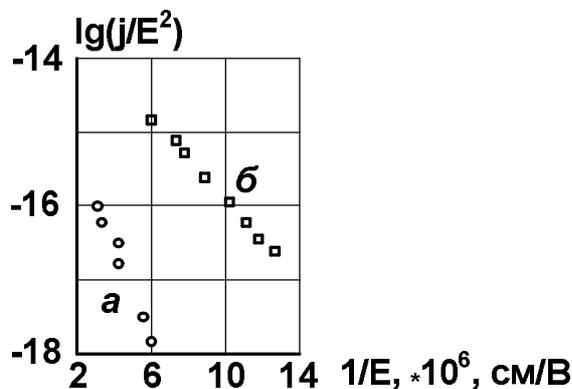


Рисунок 4 – Вольт-амперные характеристики автоэлектронных токов для катода из никеля (а) и из никеля, покрытого тонким слоем углеродной сажи (б)  
 Figure 4 – Current-voltage characteristics of field currents for a cathode made of nickel (a) and nickel coated with a thin layer of carbon soot (b)

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные относительно влияния напряжения, прикладываемого к межэлектродному промежутку, на величину тока объемного разряда накачки при использовании «чистых» электродов из никеля и тех же электродов, покрытых слоем углеродной сажи.

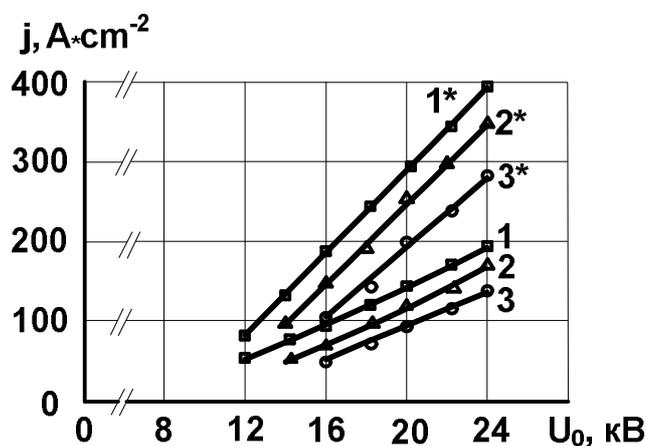


Рисунок 5 – Зависимости плотности тока объемного разряда от напряжения заряда накопительного конденсатора для катода из никеля (кривые 1–3) и катода, покрытого слоем углеродной сажи (кривые 1\*–3\*).

Рабочие смеси  $CO_2:N_2:He = 1:1:8$  (1, 1\*);  $1:1:6$  (2, 2\*);  $1:1:4$  (3, 3\*)

Figure 5 – Dependencies of current density from charging voltage of pulse generator capacitor for cathodes from Ni (1 – 3) and Ni with carbon soot (1\* – 3\*).

The working mixtures  $CO_2:N_2:He = 1:1:8$  (1, 1\*);  $1:1:6$  (2, 2\*);  $1:1:4$  (3, 3\*)

Полученные результаты однозначно указывают на увеличение токов накачки в случае нанесения на рабочую поверхность катода углеродной сажи для всех применявшихся составов рабочих смесей. Покрытие катода углеродной сажей при одних и тех же эксперимен-

тальных условиях способствует увеличению тока объемного разряда (тока накачки) почти в два раза.

На рисунке 6 приведены зависимости плотности энергии накачки от напряжения заряда накопительного конденсатора (два значения  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$ ) для использования рабочей смеси  $CO_2:N_2:He = 1:1:1$  при полном давлении в одну атмосферу при использовании катода из никеля (кривые до вертикальных линий, области «а») и катода из никеля, покрытого слоем углеродной сажи (кривые после вертикальных линий, области «б»).

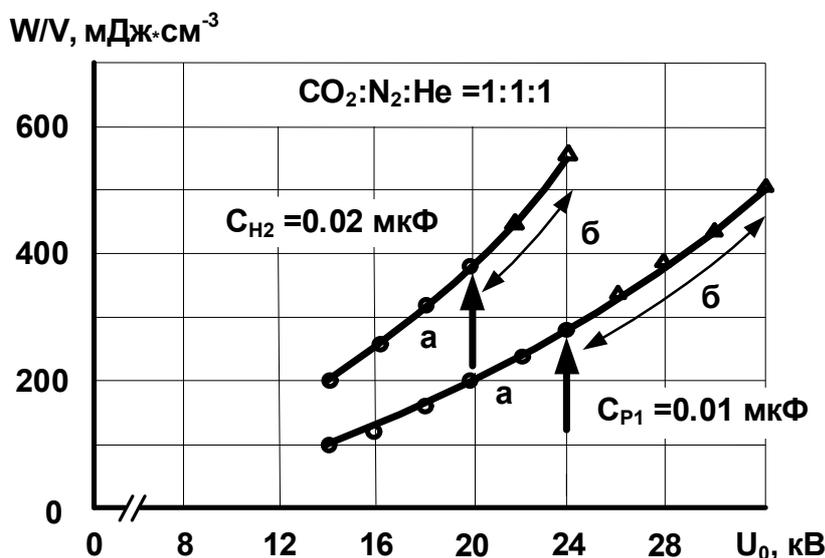


Рисунок 6 – Зависимости плотности энергии накачки от напряжения заряда накопительного конденсатора импульсного генератора ( $C_{H1} = 0.01$  and  $C_{H2} = 0.02$  μF) для катода из никеля [кривые до вертикальных линий (области «а»)] и катода, покрытого слоем углеродной сажи [кривые после вертикальных линий (области «б»)]. Исходный состав рабочей смеси  $CO_2:N_2:He = 1:1:1$  при полном давлении в 1 атмосферу

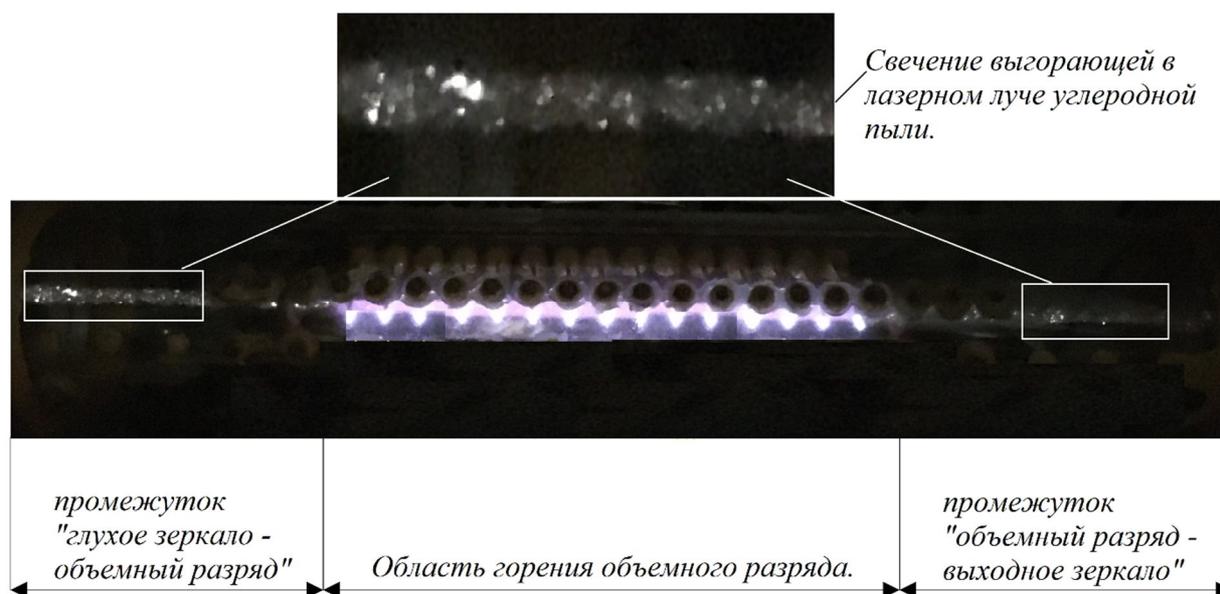
Figure 6 – Dependencies of pumping energy density from capacitor charging voltage of pulse generator for nickel cathode surfaces without carbon layer (a) and with carbon layer (b). The values of storage capacitor of pulse generator  $C_{H1} = 0.01$  and  $C_{H2} = 0.02$  μF and initial gas mixture  $CO_2:N_2:He = 1:1:1$  at  $P_{\Sigma} = 1$  Atm

Нанесение углеродной сажи способствует увеличению плотности энергии, вводимой в плазму объемного разряда накачки. При этом до нанесения углеродной сажи на поверхность электродов максимальные значения плотности накачки имеют значения до 300 и до 400 мДж·см<sup>-3</sup> при рабочих напряжениях 20 и 24 кВ и значениях емкостей накопительных конденсаторов  $C_{H1} = 0,01$  и  $C_{H2} = 0,02$  мкФ.

После нанесения на поверхность катода слоя углеродной сажи при формировании объемного разряда плотность энергии, которая может быть введена в плазму до образования в разрядном промежутке локальных разрядов заметно увеличивается. При этом для рабочего напряжения в 24 кВ для емкостей накопительных конденсаторов  $C_{H1} = 0,01$  и  $C_{H2} = 0,02$  мкФ это увеличение имеет почти двукратное значение. При формировании объемного разряда от генератора с накопительным конденсатором  $C_{H1} = 0,01$  мкФ рабочее напряжение могло достигать значения в 30 кВ. Сравнение максимальных значений плотности энергии накачки для применявшихся двух накопительных конденсаторов показывает, что при 30 кВ плотность энергии накачки при использовании конденсатора с  $C_{H1} = 0,01$  мкФ достигает значения в 500 мДж·см<sup>-3</sup>, тогда как для накопительного конденсатора  $C_{H2} = 0,02$  мкФ максимальное значение плотности энергии накачки ( $U_{МАКС} = 24$  кВ) достигает 560 мДж·см<sup>-3</sup>. Кроме этого, в промежутках с углеродным покрытием катода возможно формирование объемных разрядов в рабочих смесях без гелия с любым соотношением молекулярных компонентов  $CO_2:N_2$ .

Измерения значений энергии лазерного излучения в импульсе показали, что при формировании объемного разряда накачки в промежутке с катодом, покрытым углеродной сажей, приводит к увеличению в 1,5 – 2 раза.

Проведенные исследования показали, что в результате чрезвычайно слабой связи слоя углеродной сажи с металлической поверхностью катода, удерживаемого, по-видимому, посредством сил Ван Дер Ваальса, сажа под воздействием импульсов накачки слетает с поверхности катода и заполняет все внутреннее пространство активного элемента лазера. На рисунке 7 приведена фотография свечения газоразрядного промежутка и выгорающей в лазерном луче инфракрасного диапазона углеродной пыли.



**Рисунок 7 – Фотография свечения вспомогательных (очень ярких) искровых разрядов и объемного разряда и выгорающей в лазерном луче внутри резонатора углеродной пыли**  
**Figure 7 – Photo of luminescence preliminary spark discharges and luminescence of carbon dust in inner laser beam**

После 20 – 40 часов непрерывной работы ТЕА-СО<sub>2</sub> лазера углеродная сажа полностью слетает с поверхности катода и параметры объемного разряда, так же как и параметры импульсов лазерного излучения, «возвращаются» к тем значениям, которые характерны для промежутка с «чистым» катодом.

Проведенные экспериментальные исследования влияния углеродной сажи на электрические параметры объемного разряда (плотность тока и плотность энергии накачки) показали почти двукратное увеличение этих параметров. В то же время, невозможность жесткой фиксации углеродной сажи на поверхности металлов, из которых изготавливают катоды ТЕА-СО<sub>2</sub> лазеров, исключает применение полезных свойств автоэлектронных покрытий на основе углеродной сажи для увеличения параметров импульсов лазерного излучения. В связи с этим возникает настоятельная необходимость в поиске способов жесткой фиксации углеродной сажи на поверхности катодов без применения каких-либо органических соединений.

### Заключение

Нанесение на поверхность катода слоя углеродной сажи, полученной электродуговым способом, приводит к следующим новым результатам:

- увеличению автоэлектронных токов с такой поверхности в 2 – 10 раз;
- увеличению плотности тока объемного разряда с максимальных значений 120–190 А·см<sup>-2</sup> до значений 280 – 400 А·см<sup>-2</sup>;
- максимальные плотности энергии накачки увеличиваются с 280 – 380 мДж·см<sup>-3</sup> до 500 – 560 мДж·см<sup>-3</sup>;

- возможно формирование объемных разрядов в рабочих смесях без гелия с любым соотношением молекулярных компонентов  $\text{CO}_2:\text{N}_2$ .
- энергия лазерного излучения в импульсе увеличивается в 1,5 – 2 раза.

#### Библиографический список

1. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 256 с.
2. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения молекулярных  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{F}_2$ -лазеров. М.: Физматлит, 2015. 168 с.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
4. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982. 266 с.
5. Месяц Г. А. Эктоны. Екатеринбург: Наука, 1993, часть I. 184 с.
6. Kozlov B. A., Solovuyov V. I. Formation of gas flow in active media of small-sized sealed-off TEA-lasers by an «electrical wind» // Proceedings of SPIE. 1998, vol. 3574, pp. 519-525.
7. Козлов Б. А., До Куанг Мань, Ястребков А. Б. О влиянии метода охлаждения на энергетические параметры импульсов излучения малогабаритных TEA- $\text{CO}_2$  лазеров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2015, №53, С. 139-143.
8. Сливков И. Н. Процессы при высоких напряжениях в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
9. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматлит, 1958. 272 с.

UDC 621.378.324

### EFFECTIVE AUTO-EMISSION COATINGS OF CATHODES OF SMALL-SIZED TEA-CO<sub>2</sub> LASERS BASED ON NANOSTRUCTURED CARBON MATERIALS

**B. A Kozlov**, Dr. Sc. (Phys. and Math.), professor, department of electronic devices RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0000-0003-4747-6340, e-mail: kozlov.qe.ryazan@mail.ru

**Mai The Nguyen**, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0002-4360-853X, e-mail: maithenguyen.ryazan@gmail.ru

*The effect of nanostructured carbon coatings on current density and pump energy in small-sized sealed-off TEA – CO<sub>2</sub> lasers is studied. It has been established that the deposition of thin layers of carbon soot containing carbon in various nanostructured forms contributes to the increase in current density of pumped volume discharge by 1,5 – 2,2 times and pump energy density by 2 – 2,4 times in CO<sub>2</sub> laser mixtures at atmospheric pressure. The aim of this work was to experimentally study field-specific characteristics of cathodes coated with carbon soot and to determine the relationship between volume density of current and pump energy in discharge gaps formed by metal electrodes and the same electrodes coated with a layer of carbon soot.*

**Keywords:** nanostructured forms of carbon, field electron emission, volume discharge current, current density, pump energy, CO<sub>2</sub> laser mixture.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2020-71-180-187

#### References

1. Mesyats G. A., Osipov V. V., Tarasenko V. F. *Impul'snyye gazovyye lazery*. Moscow: Nauka. 1991, 256 p. (in Russian).
2. Khomich V. Yu., Yamshchikov V. A. *Osnovy sozdaniya sistem elektrorazryadnogo vzbuzhdeniya molekulyarnykh CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i F<sub>2</sub>-lazerov*. Moscow: Fizmatlit, 2015. 168 p. (in Russian).
3. Mesyats G. A. *Impul'snaya energetika i elektronika*. Moscow: Nauka. 2004, 704 p. (in Russian).
4. Korolev Yu. D., Mesyats G. A. *Avtoemissionnyye i vzryvnyye protsessy v gazovom razryade*. Novosibirsk, Nauka. 1982, 266 p. (in Russian).
5. Mesyats G. A. *Ektony*. Yekaterinburg, Nauka. 1993, chapter 1, 184 p. (in Russian).

6. **Kozlov B. A., Solovyov V. I.** Formation of gas flow in active media of small-sized sealed-off TEA-lasers by an «electrical wind». *Proceedings of SPIE*. 1998, vol. 3574, pp. 519-525. (in Russian).
7. **Kozlov B. A., Do Kuang Manh, Yastrebkov A. B.** O vliyaniy metoda okhlazhdeniya na energeticheskiye parametry impul'sov izlucheniya malogabaritnykh TEA-CO<sub>2</sub> lazerov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 53, pp. 139-143. (in Russian).
8. **Slivkov I. N.** *Protsessy pri vysokikh napryazheniyakh v vakuume*. Moscow: Energoatizdat. 1986, 256 p. (in Russian).
9. **Yelinson M. I., Vasil'yev G. F.** *Avtoelektronnaya emissiya*. Moscow: Fizmatlit. 1958, 272 p. (in Russian).