

## ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СТЕКЛОУГЛЕРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭМИТИРУЮЩИХ СТРУКТУР

Д. А. БЕССОНОВ<sup>1</sup>, И. А. ПОПОВ<sup>1</sup>, Т. Н. СОКОЛОВА<sup>1</sup>, Е. Л. СУРМЕНКО<sup>1</sup>,  
Ю. В. ЧЕБОТАРЕВСКИЙ<sup>1</sup>, В. И. ШЕСТЕРКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина,  
410054, Саратов, Россия  
E-mail: zmeev90@mail.ru*

<sup>2</sup>*Научно-производственное предприятие „Алмаз“,  
410033, Саратов, Россия*

Описаны специальные приемы и алгоритмы для технологических процессов лазерного формирования эмитирующих структур на поверхности стеклоуглерода марки СУ-2000. Рассмотрены структуры с полукруглой формой вершин в виде столбцов и структуры в виде отдельных острых выступов с высоким аспектным отношением. Формирование выступов на пластине осуществлялось в несколько этапов, на каждом из которых использовалась отдельная программа обхода лазерным лучом обрабатываемой поверхности и разные параметры обработки. Для создания выступов в виде столбцов осуществлялось многослойное последовательное лазерное фрезерование поверхности пластины: на первом этапе формировался усеченный конус с плоской вершиной, на втором — создавалось закругление, на третьем — производилось микроструктурирование поверхности сферических выступов. Формирование выступов игольчатого типа также осуществлялось в три этапа: на первом — грубая фрезеровка цилиндра острия, на втором — тонкая обработка с фрезеровкой игольчатого выступа, на третьем — лазерная очистка его поверхности. В результате получены матрицы микровыступов с плотностью упаковки  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$  на сферических вершинах микрикатодов и выступы игольчатого типа с аспектным отношением около 500.

**Ключевые слова:** *лазерное фрезерование, очистка, стеклоуглерод, автоэмиссионный катод, остря, столбчатая и игольчатая форма, эмиссия*

**Введение.** Одним из перспективных направлений современной вакуумной электроники является создание безнакальных источников электронов для приборов с наносекундным временем готовности, устойчивых к температурному и радиационному воздействию. Создание таких приборов возможно на основе применения автоэмиссионных катодов (АЭК) [1] вместо традиционных, работающих по принципу термоэлектронной эмиссии. Как правило, такие катоды изготавливаются из кремния [2, 3] или стеклоуглерода [4, 5]. В качестве эмитирующих центров применяются выступы в форме столбцов [2] или заостренной формы [6], реже используются другие вариации.

Существуют разные способы получения эмитирующих структур, из которых наиболее распространены термохимический [7], электроискровой [5] и лазерный [8] методы. Структуры, изготовленные по термохимической и электроискровой технологии, имеют ряд недостатков: длительный процесс изготовления (несколько дней), поскольку необходимо применять различные технологические операции и оборудование, расположенное на разных производственных площадках; влияние посторонних химических элементов на поверхность; ограничения по геометрическим размерам. Указанные недостатки удастся устранить при лазерном структурировании [9], поэтому лазерное формирование эмитирующих структур становится все более распространенным методом.

Выделяют два подхода к изготовлению эмитирующих структур на поверхности материалов [10]: использование процессов самоорганизации структур в материале при воздейст-

вии лазерного излучения [11, 12] и изготовление структур специальными методами с применением лазера в качестве инструмента обработки [10, 13, 14]. Самоорганизованные структуры могут иметь меньшие размеры, но отследить их стабильность достаточно сложно [10]. Для эмиссионных приборов стабильность и воспроизводимость эмитирующих структур является важнейшим фактором эффективной работы, поэтому для формирования поверхности АЭК предпочтительно выбирать второй подход.

Авторами настоящей статьи ведутся работы по изготовлению АЭК из стеклоуглерода [14—16]. Это неупорядоченный неграфитированный углеродный материал — продукт термической переработки сетчатых полимеров, в первую очередь, фенолформальдегидной смолы и целлюлозы. Катодные структуры из монолитного стеклоуглерода отличаются повышенной механической прочностью, стабильностью тока автоэмиссии, способны выдерживать интенсивную бомбардировку ионами остаточных газов и пондеромоторные нагрузки [17]. Кроме того, стеклоуглерод обладает пониженной адсорбцией остаточных газов по сравнению с другими катодными материалами.

Изначально была выбрана форма эмитирующих структур в виде устойчивой равнобедренной пирамиды или конуса. Такая форма достигалась такими методами, как линейное сканирование и метод перекрывающихся глухих отверстий (лунок) [14]. Эмитирующие структуры по форме были близки к четырехгранным пирамидам с высотой 10—20 мкм и основанием  $10 \times 10$  мкм. На вершинах микровыступов формировался самоорганизованный нанорельеф, по форме напоминающий решетку с нерегулярным распределением нановыступов. Параметры нанорельефа: средний радиус кривизны 0,5 нм, средняя высота 7 нм, усредненное значение шага наноструктуры 80 нм, что соответствует плотности упаковки  $1,56 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

При испытании подобных катодов выявлено, что даже при стабильной эмиссии таких структур получение высокого значения напряженности электрического поля на вершине выступов связано с подачей высоких значений потенциалов на сетку катодно-сеточного узла, т.е. подобная конструкция является высоковольтной. Единственный способ увеличения напряженности электрического поля — увеличение аспектного отношения выступов катодов [9, 18, 19], т.е. отношения высоты выступа катода к радиусу кривизны вершины.

В работе [19] представлены предварительные расчеты параметров автоэмиссионных катодов и предложены варианты их исполнения — с игольчатыми выступами [20] с высоким аспектным отношением и с выступами в виде столбцов с закругленной поверхностью. В настоящей статье рассмотрены технологические приемы реализации выполненных расчетов в виде процесса лазерного микроразмерного фрезерования катодных структур из стеклоуглерода.

**Создание катодов с микровыступами в виде столбцов.** Исследования по выбору режимов лазерного излучения и способу формирования выступов проводились на исследовательском стенде с использованием Nd:YAG-лазера с диодной накачкой в режиме модулированной добротности; длина волны излучения 1064 нм, средняя мощность 4 Вт, длительность импульса 70 нс.

Формирование выступов на пластине из стеклоуглерода марки СУ-2000 осуществлялось в несколько этапов, на каждом из которых использовалась отдельная программа. На первом этапе формировались столбцы в форме прямой усеченной пирамиды с плоской вершиной. Для этого применялось многослойное последовательное лазерное фрезерование поверхности пластины. Экспериментально установлены следующие оптимальные параметры лазерного фрезерования: плотность 35 линий/мм, мощность излучения на выходе фокусирующей системы  $P=1,6$  Вт, скорость фрезерования  $v=40$  мм/с, частота следования импульсов  $f=30$  кГц, фокусное расстояние объектива сканатора 180 мм. На втором этапе на вершинах каждого из столбцов формировалась сферическая поверхность. Фрезерование осуществлялось послойно перемещением луча лазера по окружностям столбцов с центрами на оси выступа, радиус которых увеличивался до размеров радиуса выступа. Экспериментально установлено, что за

один полный азимутальный проход луча лазера удалялся слой материала толщиной около 5 мкм. Реализуемое программой послойное фрезерование (рис. 1) осуществлялось таким образом, чтобы радиус каждого последующего слоя  $x_i$  изменялся в соответствии с выражением

$$x = \sqrt{r^2 - y^2},$$

где  $r$  — радиус формируемой полусферы вершины столбца,  $y = \frac{r(q-i)}{q}$  — высота слоя,  $q$  — количество срезаемых слоев,  $i$  — номер удаляемого слоя.

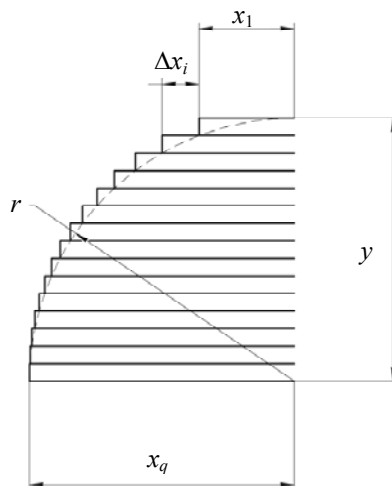


Рис. 1

Для столбца диаметром 150 мкм необходимо выполнить 15 азимутальных проходов (последовательно снималось 15 слоев) с изменяющимся углом  $\alpha$  направления лазерного сканирования поверхности. Процесс программируемого формирования 1, 6 и 15-го слоев схематически представлен на рис. 2, где стрелками показано направление рабочего хода лазерного излучения, а пунктир соответствует холостому ходу.

Катод с полусферической вершиной, единичный столбец, показан на рис. 3.

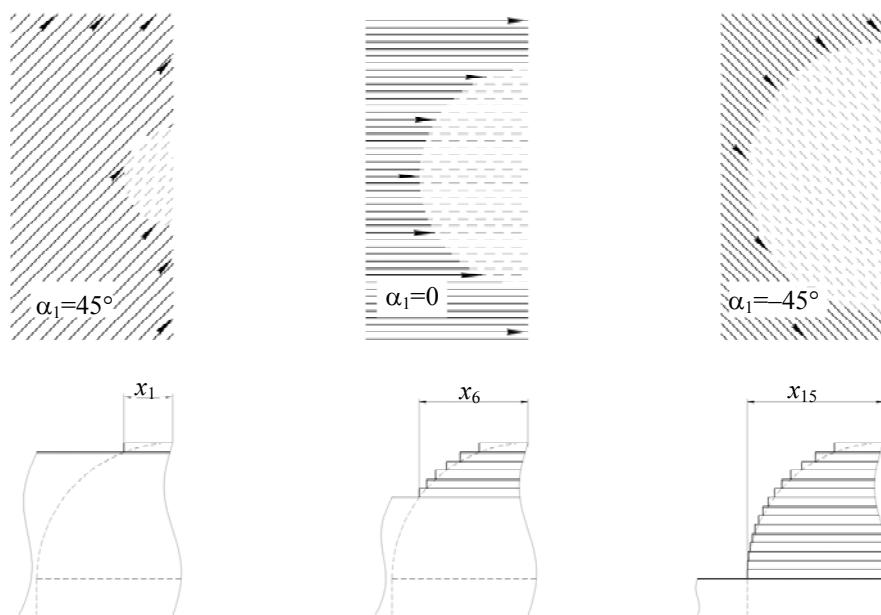
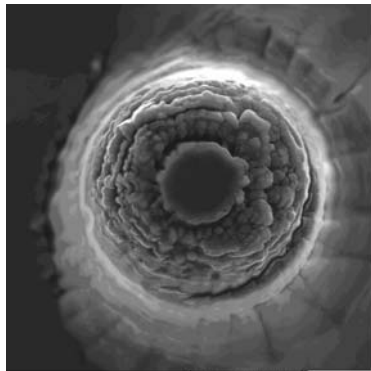


Рис. 2

На третьем этапе формировались микровыступы на сферических вершинах столбцов. По программе осуществлялось нанесение фасеточного узора (рис.4), в результате чего на

сферической поверхности столбцов появлялись игольчатые структуры. Экспериментально были определены следующие параметры:  $P=0,78$  Вт,  $v=23$  мм/с, плотность 35 линий/мм.



100 мкм

Рис. 3

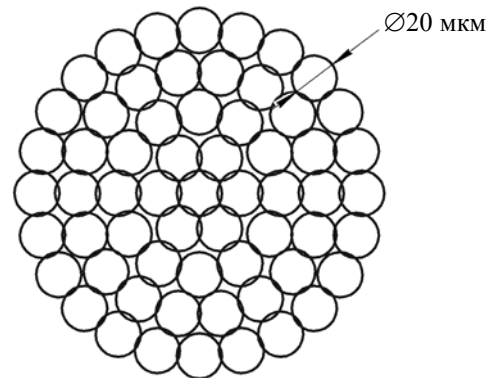
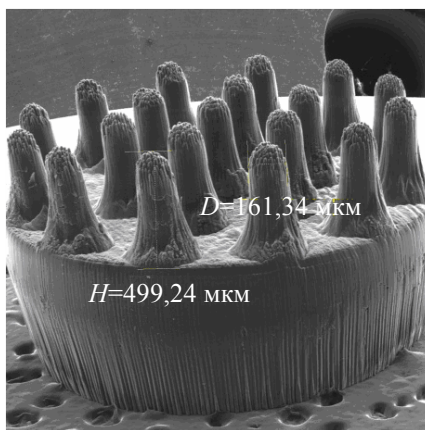


Рис. 4

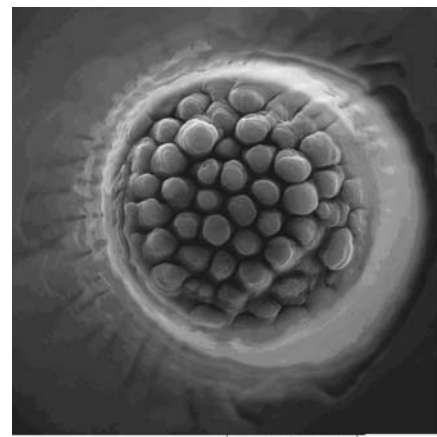
Результатом выполнения программы было формирование миникатодов с закругленными вершинами. Количество миникатодов и топология их размещения определяются конструкцией электронно-оптической системы. В данном случае на цилиндрической заготовке диаметром 3,1 мм было сформировано 19 миникатодов, которые располагались на двух концентрических окружностях диаметрами 1,25 и 2,5 мм по 6 и 12 миникатодов соответственно; один миникатод расположен в центре; высота миникатодов  $H \approx 500$  мкм: см. рис. 5, где *a* — общий вид АЭК (*D* — диаметр вершины); *б* — вершина миникатода, вид сверху. На вершинах миникатодов сформированы матрицы микровыступов с радиусом закругления вершин  $\approx 5$  мкм и плотностью упаковки  $2 \times 10^5$  см<sup>-2</sup>.

а)



500 мкм

б)



100 мкм

Рис. 5

**Создание катодов с игольчатыми микровыступами.** Формирование игольчатых микровыступов проводилось на той же лазерной установке в два этапа многослойного последовательного лазерного фрезерования.

На первом этапе „грубой фрезеровки“ на катодном диске формировались столбцы в форме прямого цилиндра диаметром  $\approx 200$  мкм и высотой до 700 мкм. Опытным путем были выбраны параметры фрезерования:  $P=3,9$  Вт,  $v=343$  мм/с. Далее запускалась программа „тонкой фрезеровки“, представляющая собой алгоритм, согласно которому луч лазера перемещался по радиусу от периферии каждого столбца к его центру. Каждое последующее перемещение луча осуществлялось под углом  $30^\circ$  к предыдущему. Общее число линий 720.

Для каждого столбца перемещение луча лазера осуществлялось таким образом, что в конечной точке перемещения центр луча находился на окружности диаметром 5 мкм

с центром на оси острого выступа. Поскольку плотность энергии лазерного излучения распределена по закону Гаусса, то удаление материала в центре столбца было минимальным. В результате диаметр пятна в центре выступа составлял 2—5 мкм. При каждом последующем азимутальном перемещении луча лазера диаметр окружности его перемещения увеличивался на 5 мкм. В результате после каждого полного оборота луча формировался игольчатый выступ, диаметр которого увеличивался к его основанию. Программируемая траектория перемещения луча лазера при формировании единичного выступа показана на рис. 6. Экспериментально определены следующие параметры фрезерования:  $P=1,15$  Вт,  $v=171$  мм/с.

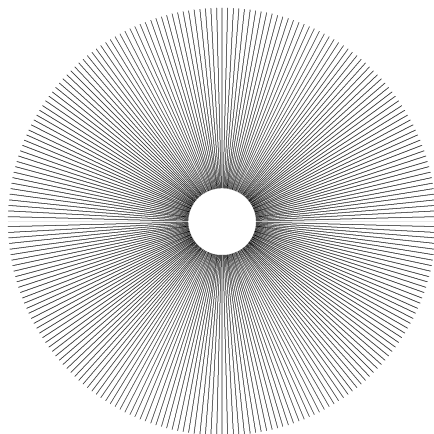
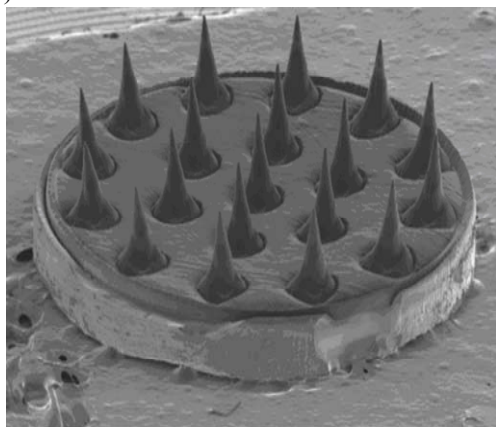


Рис. 6

После выполнения программ фрезерования запускалась программа очистки поверхности катода, на котором размещены основания игл, при следующих параметрах:  $P=1,3$  Вт,  $v=1150$  мм/с. Далее выполнялась программа очистки поверхности игл, аналогичная программе тонкой фрезеровки с измененными энергетическими параметрами излучения:  $P=0,65$  Вт,  $v=630$  мм/с.

На рис. 7 представлен катод диаметром 3,1 мм с 19 игольчатыми выступами, расположенными на двух concentric окружностях диаметрами 1,25 и 2,5 мм по 6 и 12 выступов соответственно (*a* — общий вид, *b* — размеры одиночных выступов). Одно острие расположено в центре. Высота выступов на некоторых образцах достигала 700 мкм. Радиусы кривизны вершин составляют от 0,8 до 3,0 мкм. Аспектное отношение — 500...600. Вершины всех выступов расположены на одной плоскости. Поверхность вершин гладкая, что при воздействии лазерного излучения свидетельствует о наличии расплавленного стеклоглерода, который состоит из объемных полостей — глобул размером примерно 50 нм, разделенных перегородками толщиной 5 нм [7]. Это согласуется с результатами наблюдений при лазерной обработке углеродных материалов [11].

а)



б)

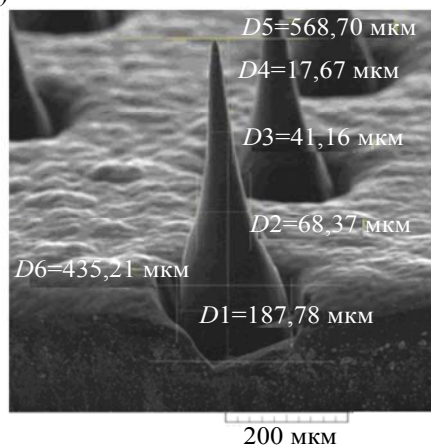


Рис. 7

**Заключение.** В результате исследований, выполненных на оборудовании Поволжского ЦКП „Лазерные и оптические технологии“, выбраны параметры излучения Nd:YAG-лазера с диодной накачкой в режиме модулированной добротности, разработаны алгоритмы и программы для технологических процессов формирования автоэмиссионных катодов различной геометрии, а также определена топология их размещения на подложках из стеклоуглерода марки СУ-2000. Рассмотрены процессы изготовления АЭК с выступами в виде столбцов с закругленной структурированной поверхностью и катодов с игольчатыми микровыступами.

В результате создания АЭК с выступами в виде столбцов сформирована матрица микровыступов с плотностью упаковки  $2 \times 10^5 \text{ см}^{-2}$  на сферических вершинах миникатодов из стеклоуглерода для многолучевых прямоочных электронно-оптических систем СВЧ-приборов О-типа.

При создании катодов с выступами игольчатого типа сформирована матрица микровыступов с высоким аспектным отношением (около 500).

Достоинством данной технологии является ее высокая производительность: так, время изготовления одного катода с 19 выступами составляет не более 45 мин; изготовление катодов методом микроразмерного лазерного фрезерования, в отличие от ранее известных, осуществляется на одном оборудовании, установленном на одной производственной площадке.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы“, госконтракт № 02.552.11.7021 (08.05.2007).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Н. В., Шешин Е. П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. Долгопрудный: Изд. дом „Интеллект“, 2011. 704 с.
2. Velásquez-García L. F., Akinwande A. I. Fabrication of large arrays of high-aspect-ratio single-crystal silicon columns with isolated vertically aligned multi-walled carbon nanotube tips // *Nanotechnology*. 2008. Vol. 19, N 40. 405305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/19/40/405305>.
3. Górecka-Drzazga A., Cichy B. J., Szczepańska P., Walczak R., Dziuban J. A. Field-emission light sources for lab-on-a-chip microdevices // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2012. Vol. 60, N 1. P. 13—17. DOI: 10.2478/v10175-012-0003-z.
4. Lewellen J. W., Noonan J. Field-emission cathode gating for rf electron guns // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2005. Vol. 8, iss. 3. 033502-1-9. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.8.033502>.
5. Бушуев Н. А., Глухова О. Е., Григорьев Ю. А. и др. Исследование эмиссионных характеристик многолучевой электронной пушки с автоэмиссионным катодом из стеклоуглерода // *ЖТФ*. 2016. Т. 86, вып. 2. С. 134—139.
6. Lawrowski R. D., Prommesberger C., Langer C., Dams F., Schreiner R. Improvement of homogeneity and aspect ratio of silicon tips for field emission by reactive-ion etching // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014, Art. ID 948708. DOI:10.1155/2014/948708.
7. Пат. 1738013 РФ, МКИ H01j1/30. Способ формирования топологии преимущественно многоострийного автокатаода / Ю. А. Григорьев, С. В. Васильковский, В. И. Шестеркин, З. А. Ярцева. Опубл. 06.04.93.
8. Zhao Q. Z., Ciobanu F., Wang L. J. Self-organized regular arrays of carbon nanocones induced by ultrashort laser pulses and their field emission properties // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, iss. 8, 083103. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3097391>
9. Kuhnke M., Lippert Th., Ortelli E., Scherer G. G., Wokaun A. Microstructuring of glassy carbon: comparison of laser machining and reactive ion etching // *Thin Solid Films*. 2004. Vol. 453—454. P. 36—41. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.11.156.
10. Чесноков Д. В., Чесноков В. В. Лазерное формирование наноразмерных структур // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2009. Т. 52, № 6. С. 69—74.

11. Абрамов Д. В., Аракелян С. М., Кучерик А. О., Кутровская С. В., Прокошев В. Г. Пространственные структуры, образующиеся на поверхности углеродных материалов в процессе затвердевания расплава, созданного под действием лазерного импульсно- периодического излучения // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 11. С. 1051—1054.
12. Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Кочкарев Д. В. Исследование лазерно-индуцированных процессов формирования микростолбиковых структур на поверхности кремниевой пластины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: IX Междунар. науч. конгресс. Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. С. 130—142.
13. Вейко В. П., Дышлошенко С. С., Скворцов А. М. Лазерное микроструктурирование поверхности кремния // Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов: Науч.-техн. сб. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. Ч. 2. С. 138—153.
14. Бессонов Д. А., Конюшин А. В., Попов И. А., Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л. Улучшение характеристик автоэмиссионных катодов из стеклоглерода методом прогрессивного лазерного структурирования // Прикладная фотоника. 2014. Т. 1. С. 112—119.
15. Sokolova T. N., Surmenko E. L., Chebotarevsky Yu. V. et al. Ultrafast laser processing of glass-phase materials — mathematical simulation // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 9065. 90650O. DOI: 10.1117/12.2053522.
16. Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л., Попов И. А., Чеботаревский Ю. В. Численное моделирование напряжений, генерируемых при воздействии лазерных ультракоротких импульсов на стеклоглеродные материалы // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 6. С. 47—53.
17. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: МФТИ, 2001. 287 с.
18. Smith R. C., Carey J. D., Forrest R. D., Silva S. R. P. Effect of aspect ratio and anode location on the field emission properties of a single tip based emitter // J. of Vacuum Science Technology. B. 2005. Vol. 23, iss. 2. P. 632—635. DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.1880072>.
19. Шестеркин В. И., Соколова Т. Н., Бессонов Д. А. и др. Улучшение свойств автоэмиссионных ячеек из стеклоглерода при формировании острий с высоким аспектным отношением методом лазерного фрезерования // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 9. С. 896—904.
20. Bessonov D. A., Sokolova T. N., Surmenko E. L. et al. Laser formation of tip emitting structures with high aspect ratio on glass-carbon field-emission cathodes // J. of Physics Conf. Series. 2016. Vol. 741(1). 012166. DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012166.

#### **Сведения об авторах**

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Дмитрий Александрович Бессонов</b> | — аспирант; СГТУ, кафедра приборостроения;<br>E-mail: <a href="mailto:zmeev90@mail.ru">zmeev90@mail.ru</a>  |
| <b>Иван Андреевич Попов</b>           | — канд. техн. наук; СГТУ, межфакультетская учебно-исследовательская лаборатория лазерной техники и технологии; инженер;<br>E-mail: <a href="mailto:antaresrock@yandex.ru">antaresrock@yandex.ru</a>                         |
| <b>Татьяна Николаевна Соколова</b>    | — канд. техн. наук; СГТУ, межфакультетская учебно-исследовательская лаборатория лазерной техники и технологии; зав. лабораторией;<br>E-mail: <a href="mailto:sokolova@pribor-t.ru">sokolova@pribor-t.ru</a>                 |
| <b>Елена Львовна Сурменко</b>         | — канд. физ.-мат. наук; СГТУ, межфакультетская учебно-исследовательская лаборатория лазерной техники и технологии; кафедра сварки и металлургии; доцент; E-mail: <a href="mailto:surmenko@yandex.ru">surmenko@yandex.ru</a> |
| <b>Юрий Викторович Чеботаревский</b>  | — д-р техн. наук, профессор; СГТУ, кафедра прикладной математики и системного анализа; E-mail: <a href="mailto:uvich@sstu.ru">uvich@sstu.ru</a>   |
| <b>Василий Иванович Шестеркин</b>     | — канд. физ.-мат. наук; НИП „Алмаз“; вед. научный сотрудник;<br>E-mail: <a href="mailto:shesterkin.v@mail.ru">shesterkin.v@mail.ru</a>  |

Рекомендована кафедрой  
сварки и металлургии

Поступила в редакцию  
23.01.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Бессонов Д. А., Попов И. А., Соколова Т. Н., Сурменко Е. Л., Чеботаревский Ю. В., Шестеркин В. И. Лазерная обработка стеклоглерода для получения эффективных эмитирующих структур // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 5. С. 474—481.

**LASER PROCESSING OF GLASSY CARBON  
TO OBTAIN THE EFFECTIVE EMITTING STRUCTURES****D. A. Bessonov<sup>1</sup>, I. A. Popov<sup>1</sup>, T. N. Sokolova<sup>1</sup>, E. L. Surmenko<sup>1</sup>,  
Yu. V. Chebotarevsky<sup>1</sup>, V. I. Shesterkin<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Gagarin Saratov State Technical University,  
410054, Saratov, Russia  
E-mail: zmeev90@mail.ru*<sup>2</sup>*Scientific-Production Enterprise "Almaz" JSC,  
410033, Saratov, Russia*

Special techniques and algorithms of laser forming of emitting structures on the glassy carbon SU-2000 surface are described. The structures of pillar-shaped tips with semicircular apexes and the structures of separate needle-shaped tips with a high aspect ratio are considered. Formation of the tips on the plate is carried out in several stages, each of which used a separate bypass program of the treated surface by the laser beam and different processing parameters. To create the pillar-shaped tips the sequential layer-by-layer laser milling is carried out: on the first stage a truncated cone with a flat top is formed, on the second a rounding is created, on the third micro-structuring of the surface of spherical tips is performed. Formation of needle-shaped tips is carried out also in three stages: firstly, the rough milling of the tip cylinder is carried out, on the second stage of thin processing the needle-shaped tip is milled, and on the third stage laser cleaning of the tip surface is implemented. As a result, the matrixes of microtips are obtained with packing density  $N \approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$  on the spherical apexes of field-emission cathodes and the needle-shaped tips with an aspect ratio about 500.

**Keywords:** laser milling, cleaning, glassy carbon, field-emission cathodes, tip, pillar, needle-shaped, emission

**Data on authors**

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Dmitry A. Bessonov</b>    | — Post-Graduate Student; Gagarin Saratov State Technical University, Department of Instrument Making; E-mail: zmeev90@mail.ru   |
| <b>Ivan A. Popov</b>         | — PhD; Gagarin Saratov State Technical University, Interfaculty Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology; Engineer; E-mail: antaresrock@yandex.ru   |
| <b>Tatiana N. Sokolova</b>   | — PhD; Gagarin Saratov State Technical University, Interfaculty Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology; Head of the Laboratory; E-mail: sokolova@pribor-t.ru                                  |
| <b>Elena A. Surmenko</b>     | — PhD; Associate Professor; Gagarin Saratov State Technical University, Interfaculty Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology; Department of Welding and Metallurgy; E-mail: surmenko@yandex.ru |
| <b>Yury V. Chebotarevsky</b> | — Dr. Sci., Professor; Gagarin Saratov State Technical University, Department of Applied Mathematics and System Analysis; E-mail: uvich@sstu.ru   |
| <b>Vasiliy I. Shesterkin</b> | — PhD; Scientific-Production Enterprise "Almaz" JSC; Leading Scientist; E-mail: shesterkin.v@mail.ru  |

**For citation:** Bessonov D. A., Popov I. A., Sokolova T. N., Surmenko E. L., Chebotarevsky Yu. V., Shesterkin V. I. Laser processing of glassy carbon to obtain the effective emitting structures // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 474—481 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-474-481