

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СТЕКЛОУГЛЕРОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭМИТИРУЮЩИХ СТРУКТУР

Д. А. БЕССОНОВ¹, И. А. ПОПОВ¹, Т. Н. СОКОЛОВА¹, Е. Л. СУРМЕНКО¹,
Ю. В. ЧЕБОТАРЕВСКИЙ¹, В. И. ШЕСТЕРКИН²

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

²*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 10×10 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.

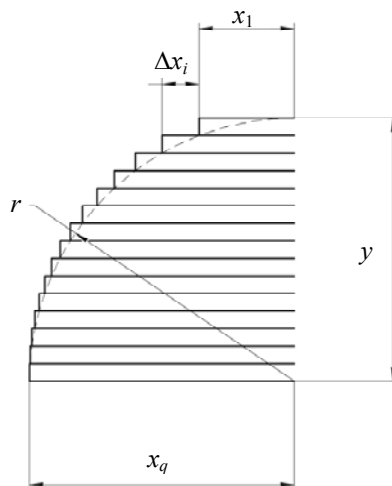


Рис. 1

Для столбца диаметром 150 мкм необходимо выполнить 15 азимутальных проходов (последовательно снималось 15 слоев) с изменяющимся углом α 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.

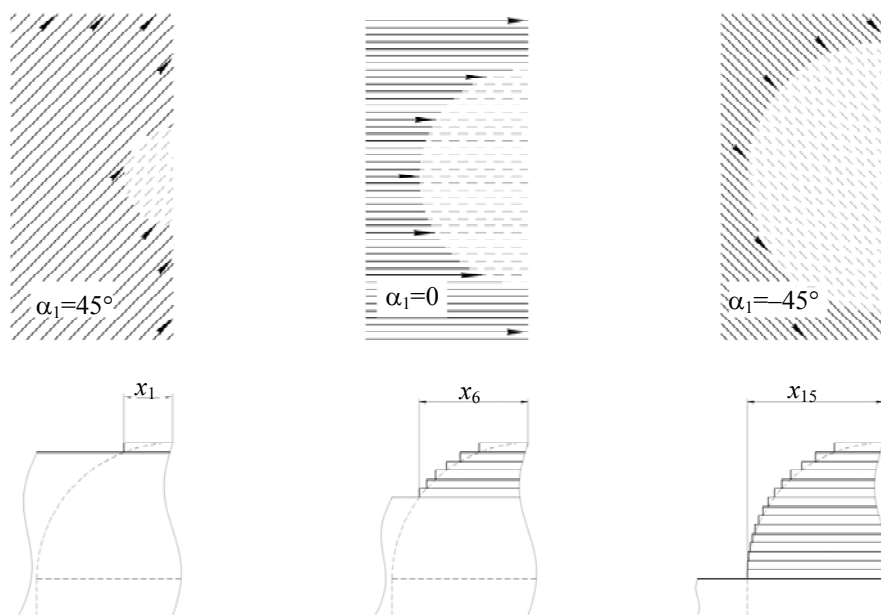
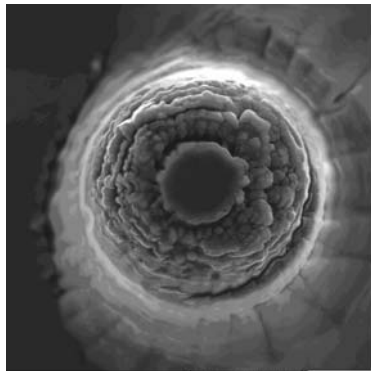


Рис. 2

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

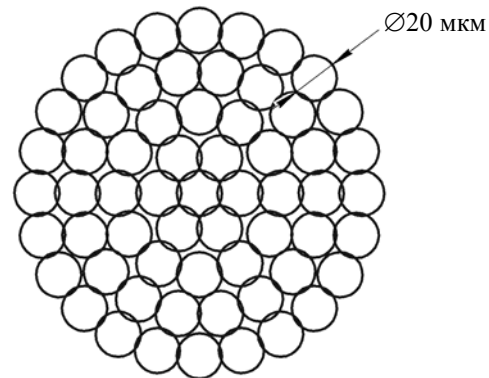
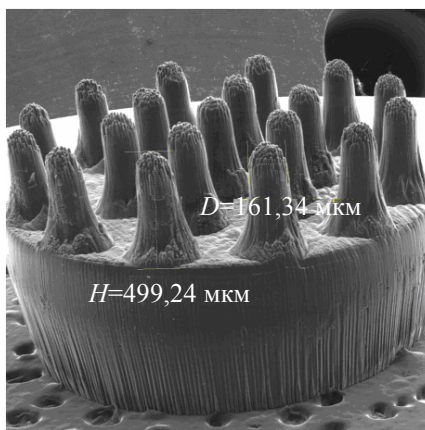


Рис. 4

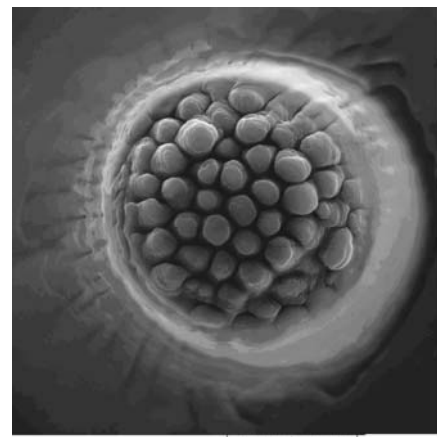
Результатом выполнения программы было формирование миникатодов с закругленными вершинами. Количество миникатодов и топология их размещения определяются конструкцией электронно-оптической системы. В данном случае на цилиндрической заготовке диаметром 3,1 мм было сформировано 19 миникатодов, которые располагались 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 ≈ 5 мкм и плотностью упаковки 2×10^5 см⁻².

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 ≈ 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° 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.

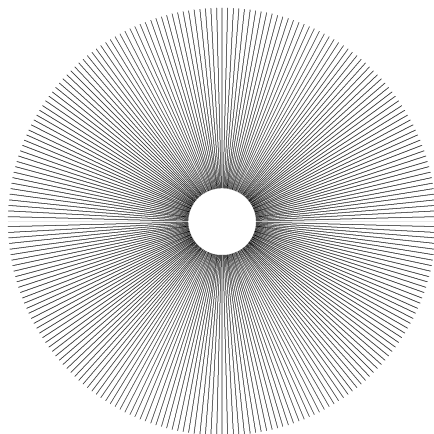
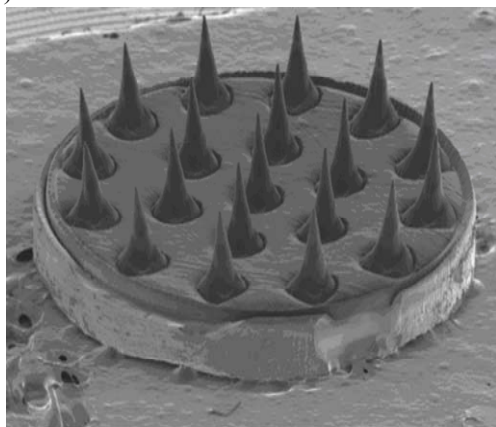


Рис. 6

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)

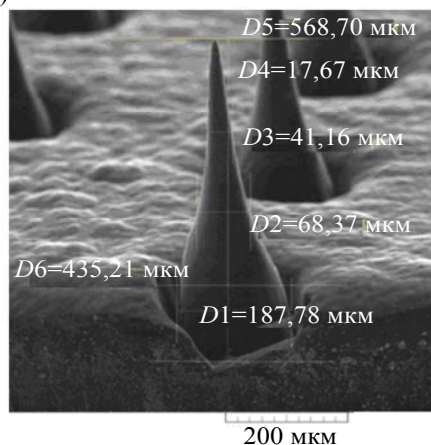


Рис. 7

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 прямооточных 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., Дышловенко 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

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

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. Bessonov¹, I. A. Popov¹, T. N. Sokolova¹, E. L. Surmenko¹,
Yu. V. Chebotarevsky¹, V. I. Shesterkin²**¹*Gagarin Saratov State Technical University,
410054, Saratov, Russia
E-mail: zmeev90@mail.ru*²*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

- | | |
|------------------------------|---|
| Dmitry A. Bessonov | — Post-Graduate Student; Gagarin Saratov State Technical University, Department of Instrument Making; E-mail: zmeev90@mail.ru |
| Ivan A. Popov | — PhD; Gagarin Saratov State Technical University, Interfaculty Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology; Engineer; E-mail: antaresrock@yandex.ru |
| Tatiana N. Sokolova | — 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 |
| Elena A. Surmenko | — 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 |
| Yury V. Chebotarevsky | — Dr. Sci., Professor; Gagarin Saratov State Technical University, Department of Applied Mathematics and System Analysis; E-mail: uvich@sstu.ru |
| Vasiliy I. Shesterkin | — 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