УДК 536.42

**Д.А. Бессонов, А.В. Конюшин, И.А. Попов,
Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко**

Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ИЗ СТЕКЛОУГЛЕРОДА МЕТОДОМ ПРОГРЕССИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ

Описаны два разных метода лазерного структурирования поверхности автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода – линейное сканирование и перекрывающиеся глухие отверстия. Показано, что метод перекрывающихся глухих отверстий обладает преимуществом перед аналогичными методами за счет увеличения поверхностной плотности острий. За счет применения прогрессивного лазерного структурирования, обеспечивающего плотность микроострий до 10^6 см^{-2} , достигнуты высокие эмиссионные характеристики.

Ключевые слова: стеклоуглерод, лазерное структурирование, автоэмиссионный катод, нанорельеф.

**D.A. Bessonov, A.V. Konushin, I.A. Popov,
T.N. Sokolova, E.L. Surmenko**

Y.A. Gagarin Saratov State Technical University,
Saratov, Russian Federation

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF FIELD-EMISSION GLASS-CARBON CATHODES WITH PROGRESSIVE METHOD OF LASER STRUCTURING

Two different approaches were described for laser structuring of the glass-carbon field-emission cathodes – linear scanning and an overlapping blind holes technique. It was showed that the overlapping blind holes technique has an advantage over similar methods by increasing the packing density of the micropeaks. High emission characteristics were achieved through the use of progressive laser structuring, providing the packing density of the micropeaks of the order of $10^5\text{--}10^6 \text{ cm}^{-2}$.

Keywords: glass-carbon, laser structuring, field-emission cathode, nanorelief.

1. Введение

Изготовление стабильных и эффективных эмитирующих структур – важная проблема электровакуумного производства. В настоящее время перспективным материалом для применения в приборах этой отрасли считается стеклоуглерод. Это неупорядоченный неграфитированный углеродный материал, продукт термической переработки сетчатых полимеров, в первую очередь фенолформальдегидной смолы и целлюлозы. Помимо физико-химических свойств, позволяющих успешно применять стеклоуглерод в электровакуумных приборах, этот материал имеет важную особенность – при воздействии лазерного излучения на его поверхности образуется самоорганизующийся нанорельеф. В связи с этим стеклоуглерод рассматривается как один из прогрессивных материалов для создания автоэмиссионных катодов (АЭК) [1].

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на эмиссионную эффективность катодов из стеклоуглерода, является количество острий на единицу поверхности катода и размер и форма острия. Для создания микроострий на поверхности стеклоуглерода применяется лазерное структурирование.

Нелазерные методы изготовления стеклоуглеродных АЭК в целом и методы их структурирования отличались сложным технологическим маршрутом [2] и внесением загрязняющих примесей из-за необходимости применять материал-катализатор. Применение лазерных технологий открыло широкие возможности для усовершенствования как методов изготовления АЭК, так и собственно их конструкции. Например, в качестве эмитирующих элементов стало возможным использование нанотрубок и нанокластеров, которые образуются на поверхности углеродных материалов под действием лазерного излучения [3–5]. Лазерное структурирование позволило улучшить и острийные структуры.

В представляемой работе рассматривается подход к лазерному структурированию стеклоуглерода как к стадии процесса изготовления АЭК. Соответственно описываются различные подходы к структурированию катодных лучей и их влияние на эмиссионные характеристики катодов.

2. Метод

Отработка режимов структурирования поверхности стеклоуглерода марки СУ-2000 проводилась на установках на базе твердотельных наносекундных лазеров Nd:YAG (длина волны 1,06 мкм) с модуляцией добротности с ламповой накачкой и с диодной накачкой.

Первоначально структурирование поверхности проводилось методом линейного сканирования, т.е. на поверхность наносилась сетка с минимально возможным шагом для данной лазерной системы. Плотность пиков на поверхности определялась количеством линий сетки. В местах пересечения линий имелись большие углубления в том направлении, линии которого наносились последними (рис. 1, а).

Следующим решением стало формирование структуры поверхности методом перекрывающихся глухих отверстий (лунок). Схема идеи представлена на рис. 1, б. В обоих случаях использовалось одномодовое излучение лазера, т.е. распределение интенсивности в поперечном сечении пучка близко к гауссовому. Как видно из рис. 1, структурирование поверхности методом нанесения лунок позволяет повысить плотность эмитирующих структур. Если количество острий, получаемых линейным методом на некоторой площади, равно N^2 , то при применении метода отверстий количество острий на той же площади будет составлять $N^2 + (N-1)^2$.

Рис. 1. Схема обработки поверхности: а – метод линейного сканирования, темные линии 1 – линии реза, желтые квадраты 2 – острия; б – метод перекрывающихся отверстий: темные точки 1 – отверстия (лунки), желтые точки 2 – острия

В зависимости от времени воздействия, интенсивности, частоты следования импульсов, средней мощности лазерного излучения структура поверхности имеет различный вид. Наиболее предпочтительна поверхность, получаемая на установке с твердотельным лазером Nd:YAG с диодной накачкой и длиной волны 1,064 мкм со средней мощностью 0,8 Вт, частотой следования импульсов 5 кГц, длительностью импульса 50 нс (рис. 2).

Рис. 2. Структура на поверхности стеклоуглерода СУ-2000, полученная методом перекрывающихся глухих отверстий, ширина основания пирамиды 10 мкм, высота пика 10 мкм

Рис. 3. Структура на поверхности стеклоуглерода СУ-2000, полученная методом перекрывающихся глухих отверстий, ширина основания пирамиды 10 мкм, высота пика 20 мкм

На рис. 3 представлена фотография структуры поверхности, полученной при условиях: средняя мощность лазерного излучения 1 Вт, частота следования импульсов 10 кГц, длительность импульса 50 нс.

Плотность упаковки микроострийной эмитирующей структуры составила порядка $5 \cdot (10^5 - 10^6) \text{ см}^{-2}$. Выступы по форме близки к четырехгранным пирамидам высотой 15 мкм и основанием $10 \times 10 \text{ мкм}$. Время структурирования поверхности площадью 1 мм^2 составляет 8 с.

Необходимо отметить, что многоострийная монолитная стеклоуглеродная структура имеет не только микроострия, расположенные в строго определенном порядке, но, как видно из рис. 4, на вершинах микроострий существует нанорельеф, по форме напоминающий микроострийную решетку, но с нерегулярным распределением наноострий.

Наблюдаемый нанорельеф естественным образом влияет на распределение электростатического поля на поверхности вершин микроострий автоэммиттеров и определяет автоэмиссионные характеристики АЭК. Изображение (рис. 4) было получено с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Геометрический нанорельеф на поверхности вершин микроострий по STM-диаграмме имеет следующие размеры: средний радиус кривизны $r_n = 0,5$ нм, средняя высота $h_n = 7$ нм и усредненное значение шага наноструктуры – 80 нм, что соответствует плотности упаковки $N_n = 1,56 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Рис. 4. STM-диаграмма структуры поверхности на вершинах микроострий

Рекомендуемые параметры излучения для получения микроострийных структур лежат в диапазонах: средняя мощность излучения 0,5–1 Вт; частота следования импульсов 5–12 кГц; длительность импульса 10–50 нс; длина волны излучения 1,064 мкм; задержка луча в одной точке 20–30 мс; скорость перемещения луча 10 мм/с.

При превышении указанной мощности или уменьшении частоты следования импульсов структура на поверхности становится неравномерной как по высоте, так и по форме. Острые принимают форму цилиндров, имеющих куполообразные вершины, разница по высоте цилиндрических игл достигает 30 мкм, средняя высота игл около 20 мкм, диаметры различаются от 7 до 15 мкм (рис. 5).

Рис. 5. Игольчатая микроструктура на поверхности стеклоуглерода СУ-2000

Проведенные испытания катодов в диодном режиме показали, что в непрерывном режиме при максимальных напряжениях устойчивой работы катода (до пробоя) достигнуты токи порядка 400 мА при напряженности электрического поля $E = 6 \cdot 10^5$ В/см. В импульсном режиме за счет выхода на участок больших токов и, соответственно, больших плотностей тока возможно достичь крутизны ВАХ на два порядка выше, чем при непрерывном. Достигнутая плотность тока при этом составляла порядка 10 А/см^2 [6].

На рис. 6 представлены фотографии готовых АЭК, изготовленных с применением лазерных технологий из монолитного стеклоуглерода СУ-2000.

3. Выводы

Проведены предварительные исследования возможности создания микро- и наноострийных катодных структур из стеклоуглерода, показаны особенности взаимодействия лазерного излучения со стеклоуглеродом, определена возможность структурирования поверхности методом лазерной микрогравировки последовательными лунками с целью получения поля микроострий пирамидальной формы с размерами основания одного острия от 10×10 мкм и высотой от 15 мкм.

Рис. 6. Фотографии полученных АЭК: *а* – слева для сравнения – головка спички, справа шестилучевой АЭК из стеклоуглерода СУ-2000, диаметр основания 2,2 мм, высота 2 мм, высота выступов 0,5 мм, диаметр 250 мкм; *б* – 19-лучевой АЭК из стеклоуглерода СУ-2000, диаметр основания 3,2 мм, высота 2 мм, высота выступов 1 мм, диаметр выступов 250 мкм

Исследование образцов АЭК, изготовленных с использованием лазерной фрезеровки и структурирования, показало, что на всех этапах изготовления отсутствуют изменения элементного состава образца и независимо от среды, в которой проводилась лазерная обработка, – инертный газ, технический вакуум или воздух – состав катода не отличается от исходного.

На основе экспериментальных результатов и анализа технологических возможностей современного лазерного оборудования можно сделать вывод о целесообразности применения комплекса лазерных технологических операций для изготовления АЭК из стеклоуглерода и о достижимости более высоких значений плотности токоотбора с катода за счет увеличения плотности упаковки микроострий более $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ и увеличения тока с одного острия.

Список литературы

1. Lewellen J.W., Noonan J. Field-emission cathode gating for rf electron guns // *Phys. Rev. ST – Accel.* – 2005. – Beams, 8, 033502-1-9.
2. Патент РФ №1738013. Н01J 9/02. Способ формирования топологии преимущественно многоострийного катода / Ю.А. Григорьев, С.В. Васильковский, В.И. Шестёркин, З.А. Явцева. Опубл. 12.02.93.
3. Исследование возможностей построения новых вакуумных индикаторов и дисплеев на основе углеродных нанотрубных и нанокластерных автокатодов / Н.И. Сеницын, Г.В. Торгашов, И.Г. Торгашов [и др.] // *Радиотехника.* – 2005. – № 4. – С. 35–40.

4. 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, 083103-1-4.

5. Диодная многолучевая автоэмиссионная электронная пушка / Н.А. Бушуев, Ю.А. Григорьев, П.Д. Шалаев [и др.] // *Нанотехника.* – 2006. – № 3. – С. 3–6.

6. Лазерные технологии и современное оборудование при изготовлении автоэмиссионных катодов из монолитного стеклоглерода / А.В. Конюшин, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко, И.А. Попов // *Вакуумная техника и технология.* – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 95–98.

References

1. Lewellen J.W., Noonan J. Field-emission cathode gating for rf electron guns. *Phys. Rev. ST – Accel*, 2005, beams 8, 033502-1-9.

2. Grigor'ev Iu.A., Vasil'kovskii S.V., Shesterkin V.I., Iavtseva Z.A. Sposob formirovaniia topologii preimushchestvenno mnogoostriinogo katoda [A method of topology forming of the preferentially multipeak cathode]. *Patent RF N1738013. H01J 9/02, published 12.02.93.*

3. Sinitsin N.I., Torgashov G.V., Torgashov I.G. [et al.] Issledovanie vozmozhnostei postroeniia novykh vakuumnnykh indikatorov i displeev na osnove uglerodnykh nanotrubnykh i nanoklasternykh avtokatodov [Examination of opportunities of build-up of new vacuum indicators and displays on the basis of carbon nanotube and nanocluster autocathodes]. *Radio-tekhnika*, 2005, no. 4, pp. 35-40.

4. 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, 083103-1-4.

5. Bushuev N.A., Grigor'ev Iu.A., Shalaev P.D. [et al.] Diodnaia mnogoluchevaia avtoemissionnaia elektronnaia pushka [Diode multibeam field-emission electronic gun]. *Nanotechnics*, 2006, no. 3, pp. 3-6.

6. Koniushin A.V., Sokolova T.N., Surmenko E.L., Popov I.A. Lazernye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie pri izgotovlenii avtoemissionnykh katodov iz monolitnogo steklougleroda [Laser technologies and modern equipment in manufacture of autoemissive cathodes from monolithic glass-carbon]. *Vakuumnaia tekhnika i tekhnologiya*, 2011, vol. 21, iss. 2, pp. 95-98.

Получено 17.10.2014