

## УДК 621.383.2

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЕВОГО КАТОДА НА ОСНОВЕ ИНВЕРСНОЙ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ**

Нгуен Мань Кьонг

*Студент 4 курса**кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана**Научный руководитель: Е.В.Панфилова,**кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Автоэлектронная эмиссия - это процесс извлечения электронов с поверхности твердого тела в электрическом поле без предварительного возбуждения этих электронов, то есть без дополнительных затрат энергии. Суть явления состоит в туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер вблизи поверхности тела. Такое туннелирование становится возможным за счёт искривления потенциального барьера при приложении внешнего поля [1].

Применение полевых эмиттеров представляется перспективным для создания систем формирования электронных потоков во многих устройствах вакуумной электроники. Преимущества полевых эмиттеров перед термокатодами очевидны, так как они не требуют накала и безинерционны. Кроме того, полевые эмиссионные устройства особенно актуальны для космических применений благодаря их устойчивости к высокой радиации и высокой температуре окружающей среды [2,3].

Известные к настоящему времени многоострийные структуры, пригодные для создания полевых эмиттеров, изготавливаются обычно из молибдена, углеродных нанотрубок (УНТ) и других содержащих углерод материалов, а также из разного типа полупроводников.

Опаловые структуры используются для создания инверсных массивов металлических острий, которые обладают желаемыми геометрическими характеристиками и необходимой проводимостью для эмиссии электронов, но с улучшенными механическими характеристиками и термостойкостью по сравнению с катодами на основе УНТ [4].

Для изготовления полевых катодов инверсный монослой коллоидных микросфер служит шаблоном для создания однородного набора проводящих острий, который получается при осаждении на монослой металла и последующего вытравливания микросфер. Коллоидные микросферы из полистирола позволяют получать большие однородные области с плотной гексагональной упаковкой. Структуры формируемых на их основе инверсных острий показаны на рис. 1 и 2 [5,6,7,8].

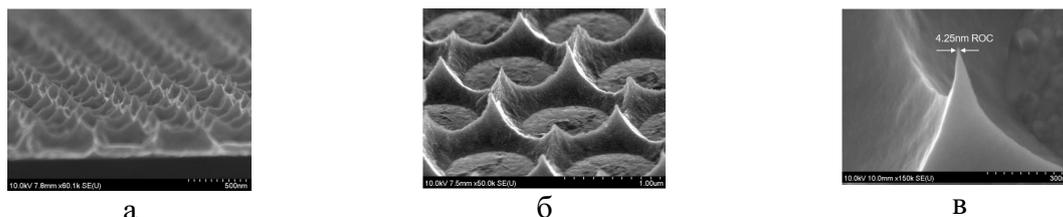


Рисунок 1. Структура инверсных опаловых эмиттеров: а – с диаметром частиц опала  $d = 600$  нм; б -  $d = 1000$  нм; в – острие эмиттера

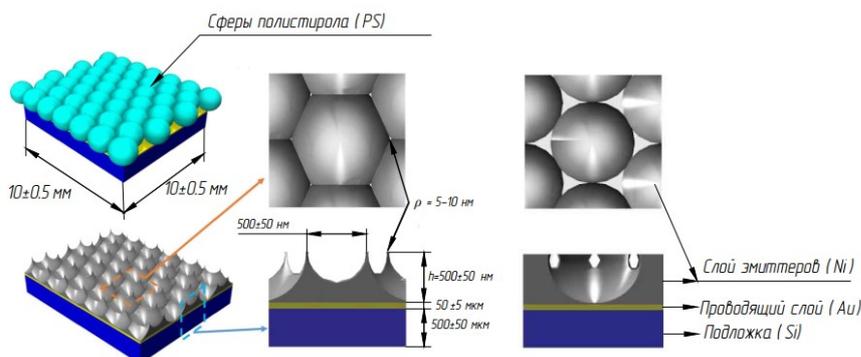


Рисунок 2. Полевой катод на основе инверсной опаловой эмиттеры с диаметром частиц опала  $d = 600$  нм

Технологический маршрут изготовления полевого катода представлен на схеме, изображенной на рис.3.

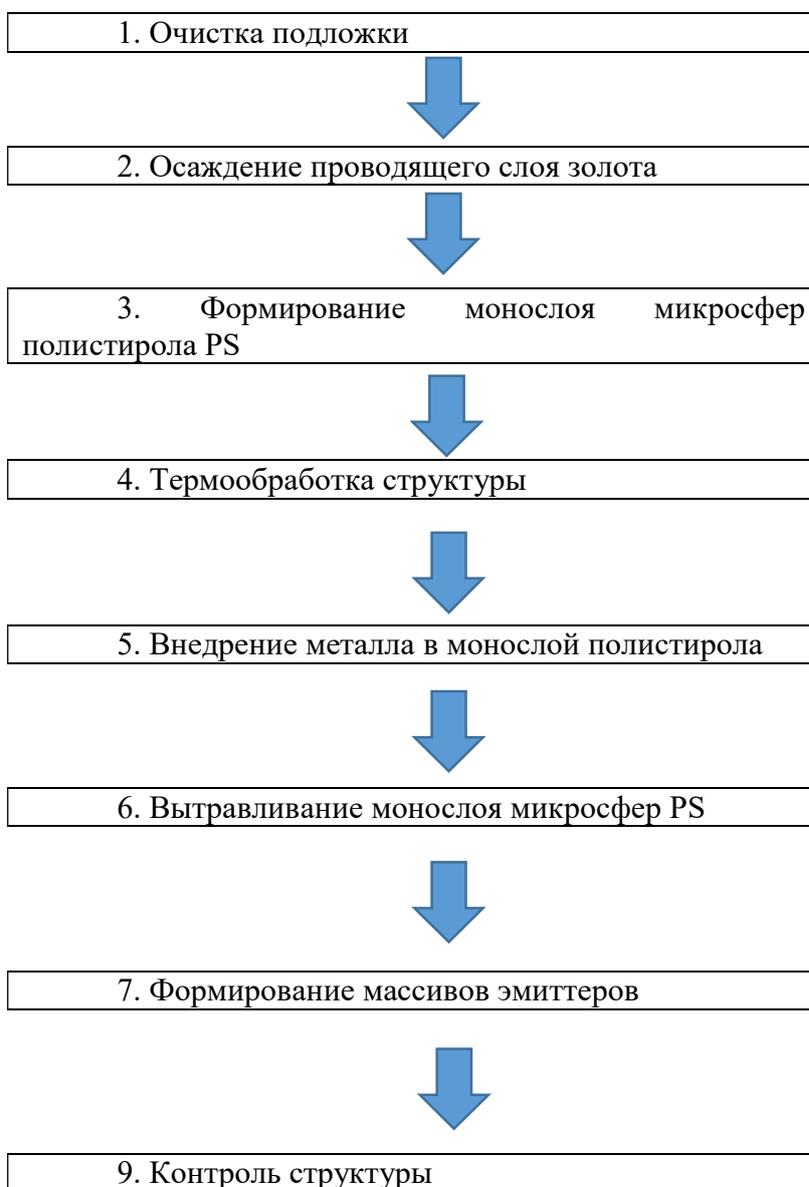


Рисунок 3. Технологический маршрут изготовления полевого катода  
Одной из главных технологических проблем является формирование монослоя опаловой структуры, поэтому это является одной из ключевых задач данной работы.

Метод вертикального вытягивания (ВВ) позволяет получать равномерные пленки до 10 слоев микросфер на подложки за относительно короткий промежуток времени. В данном случае возможно варьировать скорость вытягивания подложки и концентрацию коллоидного раствора [9,10,11,12,13].

Математическая модель для описания процесса формирования опаловой структуры [9]:

$$k = \frac{\beta L j_e \varphi}{0.605 d V (1 - \varphi)} \quad (1)$$

где  $k$  – количество слоев в опаловой матрице;

$\beta$  - постоянная зависимость на взаимодействиях частица-частица и частица-подложка (обычно  $\beta = 1$ );

$L = 300$  мкм – высота мениска;

$j_e$  – скорость опускания уровня раствора вследствие испарения, м/с;

$V$  – Скорость вытягивания подложки, м/с;

$\varphi$  – Концентрация раствора полистирола, %;

В экспериментальной работе для формирования монолоя коллоидной структуры на подложке из поликора использовался метод ВВ с параметрами, представленными в табл.1

Таблица 1. Параметры процесса формирования монолоя методом ВВ

Параметр	Значение	Контроль
Концентрация раствора	1%	Задается поставщиком/ расчетная величина
Скорость вытягивания	0.4 мм/мин	Задается блоком управления
Диаметр микросфер	300 нм	Расчетная величина, контролируемая поставщиком
Размер подложек	10x10 мм	Штангенциркуль
Время процесса формирования	40 мин	Таймер
Водородный показатель раствора	pH 6	Лакмусовая бумага

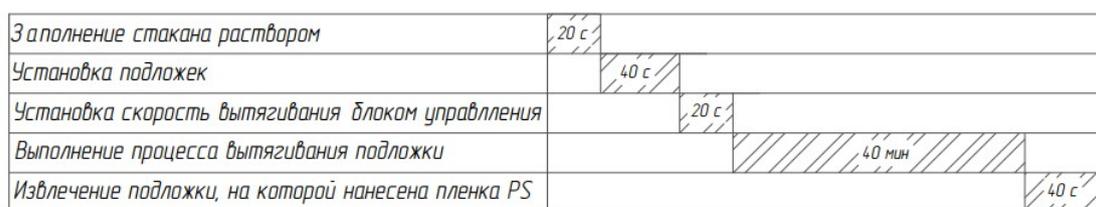


Рисунок 4. Циклограмма процесса формирования монолоя методом ВВ

При скорости  $V = 0,4$  мм/мин, пленка получается визуально тонкой, хорошо упорядоченной, что подтверждается наличием фотонной запрещенной зоны с интенсивностью отражения  $R = 9,2\%$ .

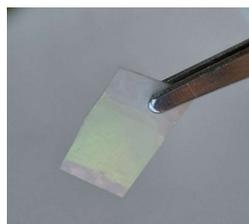


Рисунок 4. Полученная пленка полистирола при  $V = 0,4$  мм/мин



Рисунок 5. Макроскопический скан поверхности полученной пленки

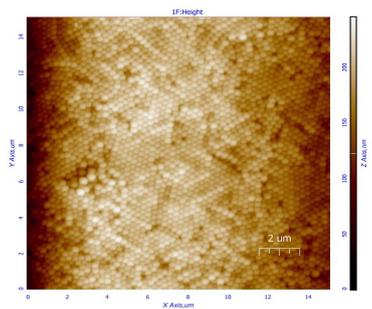


Рисунок 6. Скан АСМ полученной пленки

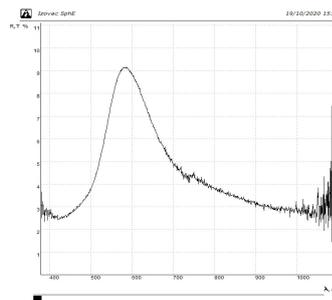


Рисунок 7. Снимок ФЗЗ полученной пленки

Поскольку метод ВВ пригоден для формирования тонкой фотонно-кристаллической структуры с заданным количеством слоев, в соответствии [1] можно получать монослой из коллоидной раствора полистирола с концентрацией 1% диаметром сфер  $d = 300$  нм и скоростью  $V = 0,4$  мм/мин.

В дальнейших исследованиях основное внимание будет уделено обработке воспроизводимого процесса получения монослоя. Результаты работы могут быть использованы при изготовлении оптоэлектронных и эмиссионных устройств с применением технологии микросферной литографии.

### Литература

1. *William M. Jones, [u dp]*. Field emitters using inverse opal structures. // *Advanced functional materials*. – 2019. – № 29. – 8 с.2.
2. *Тарадаев Е. П.* Многоострийные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств: дис. ... кан. физ.-мат. наук. – 2017. – 137 с.
3. *Елецкий А.В.* Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок. // *Успехи физических наук*. – 2019. – Т.180. – № 9. – С.897-930.
4. *Соминский Г.Г., [u dp]*. Полевые эмиттеры нового типа для высоковольтных электронных устройств. // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2015. – Т. 58. – № 7. – С.567 – 576.
5. *Pierre Colson, Catherine Henrist, Rudi Cloots*. Nanosphere lithography: a powerful method for controlled manufacturing of nanomaterials // *Journal of nanomaterials*. 2013. № 2013. – 19 p.
6. *Галаганова Е. Н., Нгуен Мань Кыонг и [т.д]*. Исследование влияния свойств переходного слоя на оптические свойства опаловых гетероструктур // *Шестой междисц. научный... Сборник материалов*. 2020. Т1. С.528-531.
7. *Delphine Misao Lebrun*. Fabrication of inverse opal oxide structures for efficient light harvesting // *Uppsala: Uppsala universitet*. 2014. – 83 p.
8. *Галаганова Е. Н.* Опаловые пленки и формирование инверсных структур вакуумными методами // *Политехнический молодежный журнал*. 2018. №6. С.10.
9. *Kwan Wee Tan [u dp]*. Particule Mobility in vertical deposition of attractive monolayer colloidal crusta. // *Langmuir*. – 2010. – V. 26. – № 10. – С.7093 – 7100.
10. *Ryan van Dommelen, Paola Fanzio, Luigi Sasso*. Surface self-assembly of colloidal crystals for micro- and nano-patterning. // *Advances in colloid and interface science*. – 2018. – № 251. – p.97-114.
11. *Zuocheng Zhou, X. S. Zhao*. Flow-Controlled Vertical Deposition Method for the Fabrication of Photonic Crystals// *Langmuir*. – 2004. – V20. – p.1524-1526.
12. *Давыдов А. Д., Волгин В. М.* Темплатное электроосаждение металлов (обзор) // *Электрохимия*. 2016. Т.52. №9. С.905-933.
13. *Беседина К.Н.* Разработка методов управляемого формирования и исследования тонкопленочных опаловых наноструктур // *дис.....канд.техн. наук: 05.27.06; защищена 13.11.14 / -Москва, 2014.-151 с.*