

**Экранирование электрического поля углеродных нанотрубок
или наностержней из оксида цинка вследствие их взаимного влияния***С. В. Булярский, Г. Г. Гусаров, А. В. Лакалин, Л. И. Матына, С. П. Олейник*

Целью данной работы является сравнение экранирования электрического поля у концов холодных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и наностержней оксида цинка. Были выполнены расчеты напряженности электрического поля одиночного эмиттера, и эмиттера, расположенного в центре массива из 25 одинаковых элементов. Согласно проведенным расчетам, коэффициент усиления поля у концов нанобъектов по сравнению с его средним значением для случая одиночных УНТ в 4 раза больше, чем для одиночных наностержней ZnO. В случае массива нанобъектов коэффициент усиления у конца нанотрубки лишь в 1,5 раза превышает значение такового у конца наностержня, что является результатом экранирующего влияния окружения. При сопоставимости работ выхода из углеродных нанотрубок и наностержней ZnO следует ожидать близких значений плотностей токов эмиссии катодов рассматриваемых нанобъектов. Однако, в силу геометрии, условия теплоотвода для случая наностержней оксида цинка предпочтительней. Следствием этого может быть бо́льшая временная стабильность холодных катодов на основе наностержней оксида цинка.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, наностержни, полевая электронная эмиссия, экранирование электрического поля.

Ссылка: Булярский С. В., Гусаров Г. Г., Лакалин А. В., Матына Л. И., Олейник С. П. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 93.

Reference: S. V. Bulyarskiy, G. G. Gusarov, A. V. Lakalin, L. I. Matyna, and S. P. Oleynik, Prikl. Fiz., No. 1, 93 (2019).

Введение

С начала освоения процессов получения углеродных нанотрубок (УНТ) [1—3] перспектива практического использования последних связывалась в значительной степени с их уникальными автоэмиссионными свойствами [4—6].

Другим «модельным» материалом нанотехнологий является оксид цинка ZnO, продемон-

стрировавший большое разнообразие синтезированных наночастиц — нанотрубки, наностержни, нанопроволоки, наноиглы, наноремни, нанокольца и т. п. [7]. Гексагональная структура оксида цинка, характеризуемая отсутствием центра симметрии, представляет собой набор состоящих из анионов и катионов в тетраэдрической координации плоскостей, этажерочно чередующихся вдоль оси c . Это обуславливает энергетическую предпочтительность роста кристаллов оксида в направлении указанной оси, направленной перпендикулярно подложке. Отсюда преобладание 1D-наноструктур оксида цинка и, как следствие, интерес к указанным формам как к потенциальным острым электронным эмиттерам [8, 9].

Попытки практического использования эмиссионных свойств и УНТ, и наностержней ZnO сталкиваются со схожими проблемами, типичными для острых катодов. К таковым, в частности, относится деградация последних, обусловленная сильным разогревом концов УНТ и наностержней оксида цинка проходящим эмиссионным током [9—11].

Булярский Сергей Викторович¹, г.н.с., д.ф.-м.н.

Гусаров Георгий Геннадьевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Лакалин Александр Вячеславович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Матына Лариса Ивановна², доцент, к.т.н.

Олейник Сергей Павлович², доцент, к.ф.-м.н.

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН.

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 32а.

Тел. +7(499) 616-38-12. E-mail: bulyar2954@mail.ru;

gusarov.g@inme-ras.ru; a.v.lakalin@mail.ru

² НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ).

Россия, 124498, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, 1.

Тел. +7(499) 732-02-00.

E-mail: dcei@miee.ru; 0111959sp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2019 г.

Другая важная проблема, характерная для катодов, представляющих собой обычно вертикальные массивы нанобъектов, связана с взаимным экранирующим влиянием соседних нанотрубок или наностержней [12].

Целью данной работы является сравнение экранирования электрического поля у концов холодных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок и наностержней оксида цинка в интересах выявления преимущественных условий функционирования массивов острых автокатодов.

Экспериментальные результаты

Углеродные нанотрубки выращивались методом химического осаждения (CVD) из газовой фазы в установке PlasmalabSystem 100 (фирмы OxfordInstruments) на кремниевой подложке, на которую был нанесен катализатор, состоящий из двухслойной металлической пленки: титан – 10 нм и

никель – 2 нм. Катализатор покрывался оксидом кремния, в котором вскрывались окна диаметром 0,7 мкм. Рост УНТ осуществлялся в режиме CVD в потоке ацетилена с добавлением аммиака в отношении 3:1. Величина газового потока поддерживалась постоянной во время роста. Температура синтеза составляла 600 °С. Результатом роста являлись одиночные многостенные углеродные нанотрубки высотой 2–3 мкм [13].

Наностержни оксида цинка синтезировались в результате термодеструкции хелатных комплексов ацетилацетоната цинка $Zn(АсАс)_2$ на кремниевой подложке без использования катализатора в CVD-процессе при давлении 10^2 Па в потоке кислорода. Температура роста составляла 450 °С.

Массивы наностержней на основе оксида цинка и УНТ, выращенных на кремниевых подложках, исследовались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Соответствующие РЭМ-изображения представлены на рис. 1.

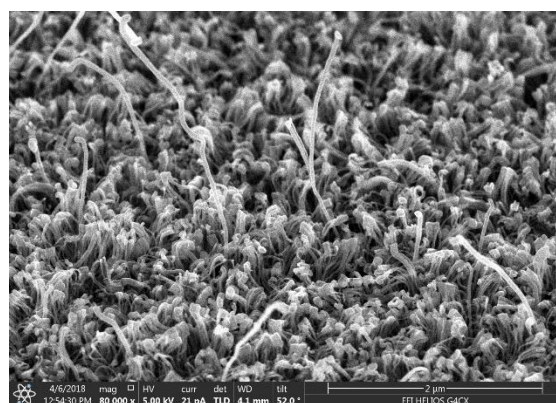
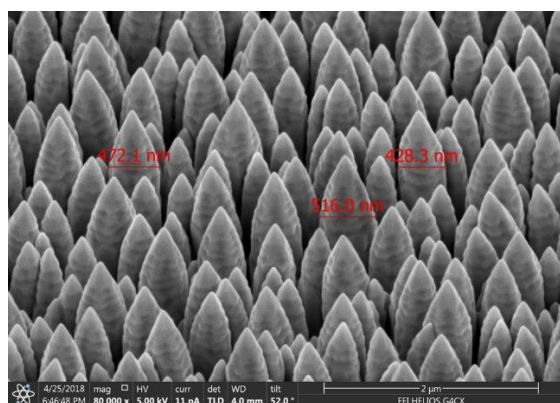


Рис. 1. РЭМ-изображения стержней ZnO (слева) и массива УНТ (справа), выращенных на подложках кремния.

Анализ РЭМ-изображений результатов синтеза позволяет сделать заключение о более упорядоченном расположении наностержней оксида цинка, меньшем, по сравнению с УНТ, разбросе по высоте нанобъектов и большем расстоянии между их вершинами. Последнее обстоятельство предположительно должно приводить к сравнительному ослаблению эффекта экранирования друг друга соседними элементами массива в случае наностержней оксида цинка. При этом наностержни значительно толще в диаметре, что должно проявиться также в меньшем значении коэффициента усиления поля по сравнению с УНТ.

Заметим, что коническая форма вершин наностержней ZnO, привлекательная с точки зрения локального усиления напряженности электрического поля, не является общим признаком результатов роста нанобъектов оксида цинка, но характерна для данных условий синтеза.

Расчёты и обсуждение полученных результатов

Для выявления доминирующих факторов и их влияния на автоэмиссию были выполнены расчёты напряженности электрического поля одиночного эмиттера, а также эмиттера, расположенного в центре массива. Массив моделировался 25 элементами, расположенными в шахматном порядке. Размеры эмитирующих элементов были максимально приближены к экспериментальным, приведенным на рис. 1.

Для оценки степени экранирования была вычислена напряженность электрического поля у концов одиночных эмитирующих элементов – нанотрубки и наностержня. Это позволило оценить коэффициент усиления поля, который равен отношению рассчитанного значения напряженности поля к её среднему значению. Среднее значение напряженности электрического поля вычислялось как простое отношение приложенного между

электродами напряжения к расстоянию между ними. Затем рассчитывалась напряженность поля одиночного элемента, расположенного уже внутри модельного массива из 25 аналогичных элементов и коэффициент экранирования. Коэффициент экранирования вычислялся как отношение значения максимальной напряженности поля у конца одиночно расположенного элемента к значению поля, но у конца элемента, находящегося в центре массива таких же эмитирующих элементов.

Для вычисления напряженности электрического поля в первую очередь вычислялся потенциал этого поля путем решения трехмерного уравнения Лапласа в области V с заданными на границе S граничными условиями:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi(x)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\varphi(x)}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\varphi(x)}{\partial x_3^2} = 0, \quad (1)$$

$$x = (x_1, x_2, x_3), \quad x \in V.$$

Здесь $\varphi = \varphi(x)$ – электрический потенциал. Нормальная компонента напряженности электрического поля в точке x (т. е. $E_n(x)$) вычислялась как градиент потенциала: $E_n(x) = -(\nabla\varphi, \mathbf{n})$, где $\mathbf{n}(x)$ – вектор внешней нормали на границе S в точке x . Уравнение (1) решалось численно методом конечных элементов.

На рис. 2 представлена геометрия модельной эмиссионной системы, а на рис. 3 – результаты расчета напряженности электрического поля у конца одиночного эмиссионного элемента. Геометрические параметры моделей приведены в таблице. В ней же представлены расчётные коэффициенты.

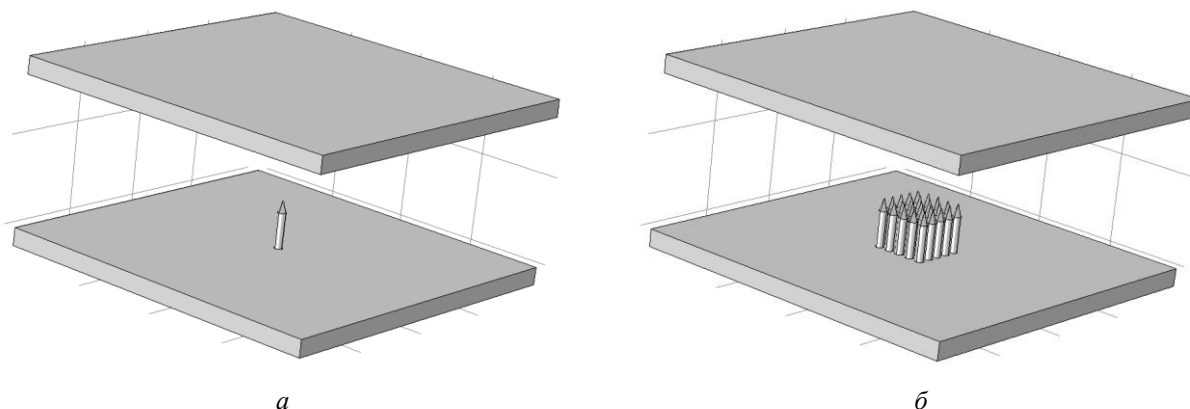


Рис. 2. Геометрия эмиссионной системы для одиночного элемента, когда нанокатод представляет собой цилиндр с коническим окончанием (а), и для массива из 25-ти одинаковых элементов (б).

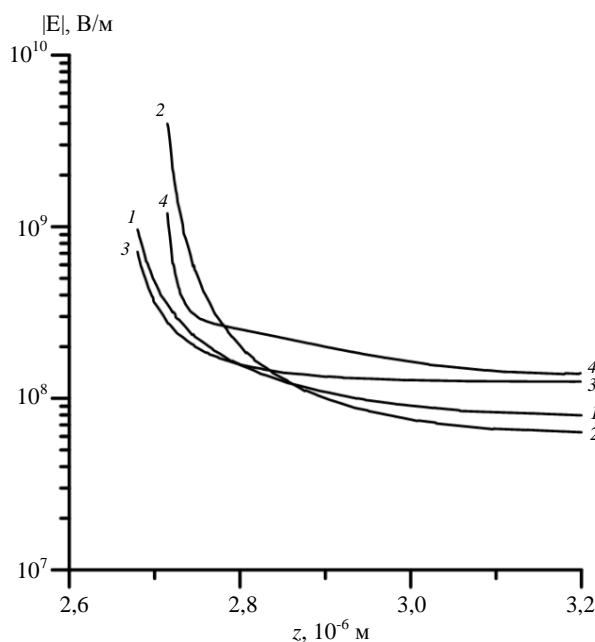


Рис. 3. Расчет напряженности электрического поля вдоль оси симметрии нанокатода, представленного на рис. 2. Кривая 1 – одиночный наностержень ZnO; 2 – экранированный наностержень ZnO; 3 – одиночная УНТ; 4 – экранированная углеродная нанотрубка.

Таблица

Параметры модели и результаты расчета

Параметры модели	Наностержень ZnO	УНТ
Высота цилиндра наностержня/УНТ, мкм	2,0	2,7
Радиус цилиндра наностержня/УНТ, мкм	0,25	0,015
Высота конуса на цилиндре, мкм	0,67	–
Радиус закругления конуса, мкм	0,017	–
Расстояние между осями соседних наностержней/УНТ, мкм	0,7	0,09
Расстояние между катодной и анодной плоскостями, мкм	3,2	
Результаты расчета		
Коэффициент усиления одиночного эмиттера, отн. единицы	5,09	19,32
Коэффициент усиления эмиттера в массиве, отн. единицы	3,78	5,83
Коэффициент экранирования, отн. единицы	1,35	3,32

Согласно результатам проведенных расчетов (см. таблицу), коэффициент усиления поля у концов нанобъектов по сравнению с его средним значением для случая одиночных УНТ в 4 раза больше, чем для одиночных наностержней ZnO. В случае массива нанобъектов коэффициент усиления у конца нанотрубки лишь в 1,5 раза превышает значение такового у конца наностержня, что является результатом экранирующего влияния окружения. При сопоставимых значениях работы выхода (4,8 эВ) из углеродных нанотрубок [14] и (4,5–5,1 эВ) из преднамеренно нелегированного ZnO [15] и превышении площади эмитирующей поверхности наностержней оксида цинка следует ожидать близких значений плотностей токов эмиссии катодов рассматриваемых нанобъектов. Однако, в силу геометрии, условия теплоотвода для случая наностержней оксида цинка предпочтительней. Это дает основания полагать, что при сопоставимых плотностях тока эмиссии концы наностержней оксида цинка будут разогреваться в меньшей степени. Как результат – сохранение преимущественно полевого механизма эмиссии в более широком диапазоне токов и наличие более щадящих условий функционирования с точки зрения деградации автокатодов. Следствием описанных процессов может быть бóльшая временная стабильность холодных катодов на основе наностержней оксида цинка.

Заключение

В работе проведено сравнение экранирования электрического поля у концов холодных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок и наностержней оксида цинка. Согласно проведенным расчетам, коэффициент усиления поля у концов нанобъектов по сравнению с его средним значением для случая одиночных УНТ в 4 раза больше, чем для одиночных наностержней ZnO. В случае массива нанобъектов коэффициент усиления у

конца нанотрубки лишь в 1,5 раза превышает значение такового у конца наностержня, что является результатом экранирующего влияния окружения. При сопоставимости работ выхода из углеродных нанотрубок и наностержней ZnO следует ожидать близких значений плотностей токов эмиссии катодов рассматриваемых нанобъектов. Однако, в силу геометрии, условия теплоотвода для случая наностержней оксида цинка предпочтительней. Следствием этого может быть бóльшая временная стабильность холодных катодов на основе наностержней оксида цинка.

Работа выполнена в соответствии
с Планом научно-исследовательской работы
ИНМЭ РАН, проект № 0004-2019-0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gulyaev Yu. V., Chernozatonskii L. A., Kosakovskaya Z. Ya., Sinityn N. I., Torgashov G. V., Zakharchenko Yu. F., Fedorov E. A., Val'chuk V. P. // J. Vac. Sci. Technol. B 1995. Vol. 13. P. 435.
2. Chernozatonskii L. A., Gulyaev Yu. V., Kosakovskaya Z. J., Sinityn N. I., Torgashov G. V., Zakharchenko Yu. F., Fedorov E. A., Val'chuk V. P. // Chem. Phys. Lett. 1995. Vol. 233. P. 63.
3. De Heer W. A., Chatelain A., Ugarte D. // Science. 1995. Vol. 270. P. 1179.
4. Mauger M., Vu T. V. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. Vol. 24. P. 997.
5. Matsumoto T., Mimura H. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. No. 10. P. 1637.
6. Saito Y., Uemura S. // Carbon. 2000. Vol. 38. No. 2. P. 169.
7. Schmidt-Mende L., MacManus-Driscoll J. L. // Materials Today. 2007. Vol. 10. No. 5. P. 40.
8. Cui J. B., Daghighian C. P., Gibson U. J., Püsche R., Geithner P., Ley L. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 044315.
9. Semet V., ThienBinh Vu., Pauporté Th., Joulaud L., Vermersch F. J. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. P. 054301.
10. Булярский С. В., Дудин А. А., Лакалин А. В., Орлов А. П., Павлов А. А., Рязанов Р. М., Шаманаев А. А. // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. Вып. 6. С. 920.
11. Dardona S., Peles A., Wrobel G., Piech M., Pu-Xian Gao // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 124318.

12. Бочаров Г. С., Елецкий А. В. // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 126.

13. Булярский С. В., Лакалин А. В., Павлов А. А., Дудин А. А., Кицюк Е. П., Еганова Е. М., Сиروتин А. П., Шаманаев А. А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 8. С. 3.

14. Булярский С. В., Булярская С. А., Лакалин А. В., Дудин А. А., Орлов А. П., Павлов А. А., Басаев А. С., Кицюк Е. П., Шаманаев А. А., Шаман Ю. П. // Нано-и микросистемная техника. 2015. № 6. С. 3.

15. Ozawa K., Mase K. // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. No. 12. P. 125406.

PACS: 61.46.Fg+61.46.Hk+79.70.+q

Shielding of the electric field of carbon nanotubes or zinc oxide nanorods due to their mutual influence

S. V. Bulyarskiy¹, G. G. Gusarov¹, A. V. Lakalin¹, L. I. Matyna², and S. P. Oleynik²

¹Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (INME RAS)
32A Leninskiy av., Moscow, 119991, Russia
E-mail: bulyar2954@mail.ru; gusarov.g@inme-ras.ru; a.v.lakalin@mail.ru

²National Research University of Electronic Technology (MIET)
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
E-mail: dcei@miec.ru; 0111959sp@mail.ru

Received January 24, 2019

The purpose of the work is to compare the electric field shielding at the ends of cold emitters on the basis of carbon nanotubes and zinc oxide nanorods. Calculations of electric field strength of a single emitter and an emitter located in the center of an array made of 25 identical elements were performed. According to the carried-out calculations, a field intensification coefficient at the ends of nanoobjects in comparison with its mean value for a case of single CNT is 4 times larger than for single nanorod of ZnO. In case of the array of nanoobjects the intensification coefficient at the end of a nanotube exceeds such a value at nanorod end only by 1.5 times that is result of the shielding effect of an environment. As work functions for carbon nanotubes and ZnO nanorods are comparable, one should expect the close values of emission current density for cathodes of nanoobjects under consideration. However, due to geometry, heat sink conditions are more preferable in the case of zinc oxide nanorods. As a consequence, it may be longer temporal stability of cold cathodes on the basis of zinc oxide nanorods.

Keywords: carbon nanotubes, nanorods, electron field emission, electric field shielding.

REFERENCES

1. Yu. V. Gulyaev, L. A. Chernozatonskii, Z. Ya. Kosakovskaya, N. I. Sinityn, G. V. Torgashov, Yu. F. Zakharchenko, E. A. Fedorov, and V. P. Val'chuk, J. Vac. Sci. Technol. B **13**, 234 (1995).
2. L. A. Chernozatonskii, Y. V. Gulyaev, Z. J. Kosakovskaja, N. I. Sinityn, G. V. Torgashov, Yu. F. Zakharchenko, E. A. Fedorov, and V. P. Val'chuk, Chem. Phys. Lett. **233**, 63 (1995).
3. W. A. De Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, Science **270**, 1179 (1995).
4. M. Mauger and T. V. Vu, J. Vac. Sci. Technol. B. **24**, 997 (2006).
5. T. Matsumoto and H. Mimura, Appl. Phys. Lett. **82** (10), 1637 (2003).
6. Y. Saito and S. Uemura, Carbon **38** (2), 169 (2000).
7. L. Schmidt-Mende and J. L. MacManus-Driscoll, Materials Today **10** (5), 40 (2007).
8. J. B. Cui, C. P. Daghljan, U. J. Gibson, R. Püsche, P. Geithner, and L. Ley, J. Appl. Phys. **97**, 044315 (2005).
9. V. Semet, Vu. ThienBinh, Th. Pauporté, L. Joulaud, and F. J. Vermersch, J. Appl. Phys. **109**, 054301 (2011).
10. S. V. Bulyarskiy, A. A. Dudin, A. V. Lakalin, A. P. Orlov, A. A. Pavlov, R. M. Ryazanov, and A. A. Shamaev, Tech. Phys. **63** (6), 894 (2018).
11. S. Dardona, A. Peles, G. Wrobel, M. Piech, and Gao Pu-Xian, J. Appl. Phys. **108**, 124318 (2010).
12. G. S. Bocharov and A. V. Eletsii, Tech. Phys. **50** (7), 944 (2005).
13. S. V. Bulyarskiy, A. V. Lakalin, A. A. Pavlov, A. A. Dudin, E. P. Kitsyuk, E. M. Eganova, A. P. Sirotina, and A. A. Shamaev, Tech. Phys. Lett. **43** (4), 366 (2017).
14. S. V. Bulyarskiy, S. A. Bulyarskaya, A. V. Lakalin, A. A. Dudin, A. P. Orlov, A. A. Pavlov, A. S. Basayev, E. P. Kitsyuk, A. A. Shamaev, and Yu. P. Shaman, Journal of Nano- and Microsystem Technique **6**, 3 (2015).
15. K. Ozawa and K. Mase, Phys. Rev. B **83** (12), 125406 (2011).