

13

Исследование автоэмиссионной катодно-сеточной структуры на основе углеродных нанотрубок для электронно-оптических систем с ленточным пучком

© А.А. Бурцев¹, А.А. Павлов², Е.П. Кицюк², Ю.А. Григорьев¹,
А.В. Данилушкин¹, К.В. Шумихин¹

¹ Научно-производственное предприятие „Алмаз“, Саратов

² Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва

E-mail: antbourtsew@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 ноября 2016 г.

Представлены результаты исследования катодно-сеточной структуры на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Созданы экспериментальные образцы матричной автоэмиссионной катодно-сеточной структуры на основе вертикализованного массива УНТ с диаметром ячейки $1\ \mu\text{m}$ и периодом микроструктуры $5\ \mu\text{m}$. На основе экспериментальных данных предложена электронно-оптическая система с ленточным автоэмиссионным катодом на основе УНТ с линейной сходимостью 6.25 и с плотностью тока пучка $4.46\ \text{A}/\text{cm}^2$. Результаты моделирования ленточного электронного пучка толщиной $0.16\ \text{mm}$, сформированного электронной пушкой с УНТ-катодом, показали возможность получения низкоперевансного потока с малой деформацией в пролетном канале $0.3 \times 0.8\ \text{mm}$ замедляющей структуры длиной $25\ \text{mm}$.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.11.44701.16570

Процесс внедрения автоэмиссионных катодов (АЭК) в мощные СВЧ-приборы обусловлен технологическими особенностями применяемых материалов и сложностями получения геометрически воспроизводимых многоострижных катодных и катодно-сеточных структур с наноразмерными вершинами острий. Сложности возрастают при проектировании автоэмиссионных электронных пушек с компрессией по плотности тока в поперечном сечении формируемого электронного пучка. В настоящее время по публикациям наиболее близкой к при-

менению электронной пушки с АЭК в лампе бегущей волны (ЛБВ) стали пушки с катодами конструкции Спиндта. Достигнуты значения тока 121 мА [1] с низковольтным сеточным управлением электронного потока в пролетном канале ЛБВ, с плотностью тока с катода 15.4 A/cm^2 . Широкое применение таких АЭК ограничено из-за использования сложной и дорогостоящей технологии, образования токов утечки в структуре катод-сетка, необходимости поддержания относительно высокого уровня вакуума, необходимости защиты структуры от ионной бомбардировки.

Сегодня автоэмиссионная электроника развивается в форме широких экспериментальных и технологических исследований и разработок новых автоэмиссионных сред на основе углеродных материалов. Существует ряд конструктивных углеродных материалов, к примеру, стеклоуглерод, который может использоваться при создании многоострижных АЭК [2]. Однако построение электронных пушек и протяженных электронно-оптических фокусирующих систем (ЭОС) на основе таких АЭК в настоящее время является сложной конструкторско-технологической задачей.

В отличие от конструктивных углеродных материалов, новые углеродные наноструктуры, известные как углеродные нанотрубки (УНТ), образуются с помощью применения принципов самоорганизации, в частности с использованием технологий CVD. Уникальные автоэмиссионные свойства и высокоаспектная структура УНТ определяют потенциальные возможности для использования их в качестве АЭК применительно к приборам вакуумной СВЧ-электроники [3–4]. Известно, что плотность тока автоэмиссии индивидуальной УНТ прямо пропорционально зависит от ее аспектного соотношения и ограничение тока автоэмиссии может быть связано с взаимной экранировкой поля нескольких УНТ. Преимущество процессов CVD в сочетании с последовательными технологическими процессами микроэлектроники позволяют сформировать триодную автоэмиссионную катодно-сеточную структуру с вертикальным расположением нанотрубок, обеспечивая при этом требуемое расчетное расстояние катод-сетка, для создания на поверхности УНТ номинальных значений напряженности поля. Миниатюрность таких катодно-сеточных структур и низковольтное управление позволяют создать АЭК для любой конфигурации электронного пучка с требуемым током, что особенно актуально при создании перспективных ЛБВ терагерцевого

диапазона. Так, в работе [5] предложена и разработана триодная конструкция электронной пушки с УНТ для создания вакуумного СВЧ-усилителя, полностью интегрированной на одной подложке с помощью МЭМС-технологий. Такая электронная пушка по результатам исследований с матрицей 3×3 из УНТ с размером $9 \mu\text{m}$ работала в непрерывном режиме с плотностью автоэмиссионного тока более 1 A/cm^2 .

Задача данной работы заключалась в исследовании автоэмиссионных свойств матричных АЭК на основе катодно-сеточных структур из УНТ и в проведении моделирования ЭОС на основе таких АЭК с ленточным пучком для построения ЛБВ терагерцевого диапазона.

Стремление к низковольтному сеточному управлению током привело в ходе разработки АЭК к созданию конструкции матричных автоэмиссионных катодно-сеточных структур на основе УНТ. Автоэмиссионные триодные микроструктуры готовились с применением фотолитографических процессов на кремниевой подложке с микросетками из пленки алюминия, напыленной на окись кремния (рис. 1). В маршрут изготовления входило формирование нижнего катодного электрода на кремнии, на который с применением операций фотолитографии наносился каталитический слой с подслоем Ni и Ti, далее наносился слой диэлектрика SiO_2 толщиной $1.2 \mu\text{m}$, а затем пленка управляющей сетки из алюминия толщиной $0.2 \mu\text{m}$. Отверстия в структуре формировались с применением процессов реактивно-ионного травления алюминия и SiO_2 с дотравом диэлектрика газофазным травлением. Вертикальные пучки УНТ получены локально с помощью процесса CVD при температуре не более 450°C .

На рис. 1 представлены матричные автоэмиссионные ячейки с вертикализованным массивом УНТ диаметром $1 \mu\text{m}$, периодом $5 \mu\text{m}$. Исследования единичной ячейки при зазоре примерно $1 \mu\text{m}$ проводились предварительно в диодном режиме, при этом ток достигал $1 \mu\text{A}$ при средней напряженности поля $130 \text{ V}/\mu\text{m}$. Исследования ВАХ АЭК на основе катодно-сеточной структуры размером $1 \times 0.7 \text{ mm}$ показали, что автоэмиссионный ток легко выходил на уровень 5 mA , при этом в пушке был установлен дополнительный тянущий электрод на расстоянии $50 \mu\text{m}$ от АЭК.

На основе данных экспериментальных исследований спроектирована конструкция ЭОС, состоящая из ленточного АЭК с микросеткой, отстоящей от поверхности эмиттера на $50 \mu\text{m}$. В терагерцевом

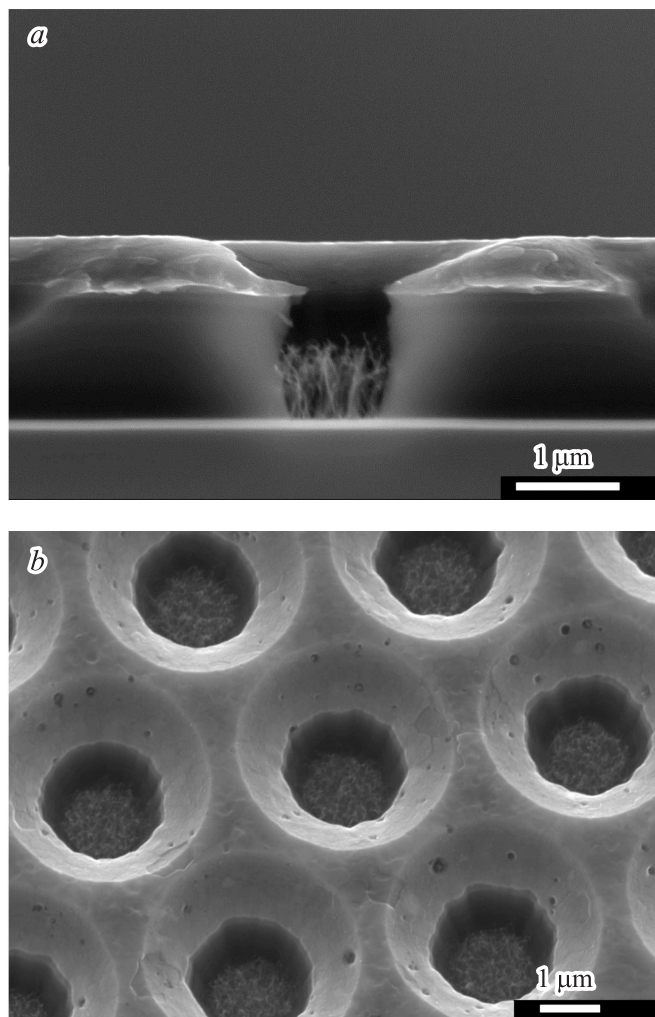


Рис. 1. СЭМ-изображения автоэмиссионной катодно-сеточной структуры с ННТ: *a* — поперечный срез данной структуры, *b* — вид сверху.

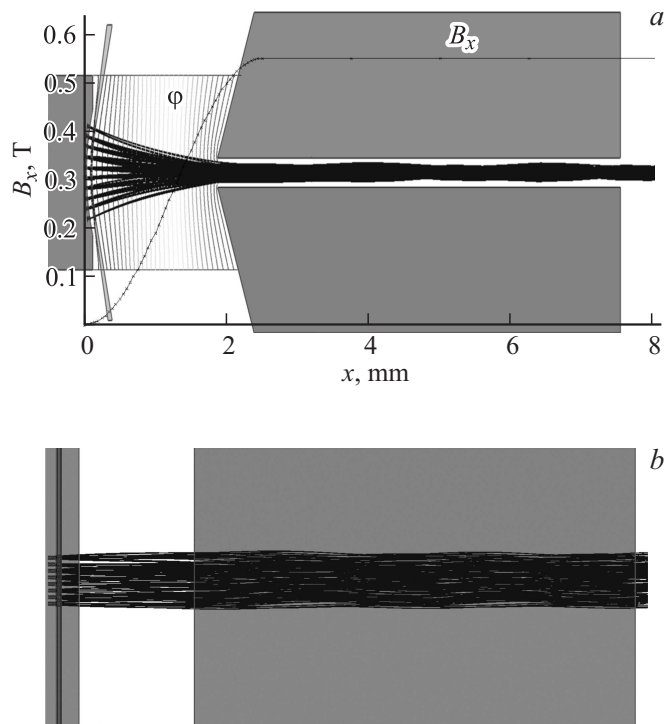


Рис. 2. ЭОС формирования ленточного электронного потока в магнитном поле $B = 0.55 \text{ T}$: a — проекция траектории крупных частиц на плоскость XY и распределение потенциала φ ; b — проекция траектории крупных частиц на плоскость XZ .

диапазоне геометрические размеры пролетного канала для ленточного электронного потока составляют $0.3 \times 0.8 \text{ mm}$ [6]. На основе компьютерного моделирования представлены параметры электронной пушки, формирующей ленточный электронный поток в СВЧ-прибор диапазона 200 GHz с применением УНТ-катодов, катодно-сеточных узлов на их основе и управляющих сеток, могут быть разработаны конструкции автоэмиссионных электронных пушек и ЭОС с плотностью тока порядка 4.5 A/cm^2 . Используя программу Lorentz, прове-

дены расчеты формы электродов электронной пушки, представленные на рис. 2.

Результаты расчета ЭОС:

Параметры ЭОС

Зазор катод-сетка, мм	Потенциал сетки, U_g , V	Зазор катод-анод, мм	Потенциал анода, U_a , V	Размер катода, мм	Кривизна катода, R_{curve} , мм	Ток катода, I_{cath} , mA	Размер пролетного канала, мм	Толщина эл. пучка, мм	B_x , T
0.05	1000	2	18000	1×0.7	1.8	5	0.3×0.8	0.16	0.55

Толщина пучка в пространстве взаимодействия составила 0.16 mm, что соответствует линейной компрессии 6.25. Плотность тока пучка в канале 4.46 A/cm². В данном случае моделирование ленточного электронного пучка, сформированного с помощью электронной пушки, показало возможность получения низкоперевансного потока с незначительной деформацией. Эта деформация не приведет к токоперехвату на расстоянии 25 mm для замедляющей системы [7].

В результате проведенных исследований была спроектирована ЭОС с ленточным катодом из УНТ с линейной сходимостью 6.25 и плотностью тока в пучке 4.46 A/cm². При увеличении автоэмиссионного тока с такого катода в эксперименте до 10 mA плотность тока в канале может возрасти до значений 6.5 A/cm².

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-02-00118a.

Список литературы

- [1] *Whaley D.R.* et al. // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2013. doi: 10.1109/IVEC.2013.6571009
- [2] *Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д., Пименов В.Г., Плешкова Л.С.* Патент № 2486625. Опубликовано 27.06.2013. Бюл. № 18.
- [3] *Galperin V.A., Zhukov A.A., Pavlov A.A.* et al. // Nanotechnol. Semicond. 2014. V. 48. Iss. 13. P. 1742–1746.

-
- [4] *Yuan X.* et al. // IEEE Electron Device Lett. 2015. V. 36. N 4. P. 399–401.
- [5] *Gilchrist K.H., Piascik J.R., Stoner B.R.* et al. // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2014. doi: 10.1109/IVEC.2014.6857536.
- [6] *Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Навроцкий И.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 10. С. 92–98.
- [7] *Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.* и др. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. В. 1. С. 54.