

УДК 620.3

СОЗДАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ, ПЕТЛЕВЫХ И ПОДВЕШЕННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НАНОПРОВОЛОК МЕТОДОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАНОСБОРКИ «СНИЗУ-ВВЕРХ»

С. В. Фонградовски¹, В. В. Коледов¹, А. П. Орлов¹, А. В. Фролов¹, А. М. Смолевич¹,
П. В. Лега¹, В. Г. Шавров¹, В. Ч. Фам^{1,2}, А. В. Иржак^{3,4}, Т. Пекизех⁵, С. Бхатчатаррия⁶

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11/7

²Московский физико-технический институт,
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Акад. Осипьяна, 6

⁴Национальный университет науки и технологии «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский проспект, 4

⁵ Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Seyed-Khandan
bridge, Shariati Ave., Tehran, Iran. Postal Code: 163171419.

⁶. School of Physics University of the Witwatersrand PO Box Wits Johannesburg, 2050 South
Africa

Статья поступила в редакцию 14 января 2019 г.

Аннотация. Создание трехмерных упорядоченных наноструктур представляет важную проблему для научных исследований, наноэлектроники, наносенсорики, ввиду того, что разнообразные нанобъекты, обладающие полезными физическими и функциональными свойствами синтезируются большими массивами, а отбор, перенос и формирование трехмерных наноструктур должен проводиться инструментами, сравнимыми по размерам с манипулируемыми нанобъектами. В работе описаны результаты экспериментов по изготовлению образцов петлевых и кольцевых подвешенных структур из нанопроволок различного состава методом механической наносборки «снизу-вверх» при помощи нанопинцетов на основе сплава с эффектом памяти формы Ti_2NiCu .

Ключевые слова: нанопроволоки, трехмерное наноманипулирование, углеродные нанотрубки, наносборка «снизу-вверх», кольцевые структуры, эффект памяти формы, сплав Ti_2NiCu .

Abstract. The creation of 3D ordered nanostructures represents an important problem for scientific research, nano-electronics, and nano-sensorics, as a result of the fact that various nano-objects with useful physical and functional properties are

synthesized by large arrays, but the selection, transfer and formation of three-dimensional nanostructures should be carried out using tools comparable in size to the manipulated nano-objects. This paper describes the results of fabricating of the samples of pig-tail and ring suspended structures of nanowires of different composition using the mechanical “bottom-up” assembling using nano-tweezers based on Ti_2NiCu shape memory alloy. The nano-manipulation system used in the work includes a scanning electron microscope (SEM) and an ionic microscope with the focused ion beam system (FIB) CrossBeam Neon40 EsB (Carl Zeiss) with two Kleindiek nano-manipulators. The Kleindiek nanomanipulator is equipped with a nanogripper with a resistive microheater, which is located at the tip of a tungsten needle. The needle tip with nanogripper can be positioned with an accuracy of about 10 nm in the volume of the working chamber of the microscope. The nanotweezers are made of composite based on Ti_2NiCu alloy with shape memory effect and have dimensions of 20x5x1 micron. The size of the controlled gap is 0 ... 1 μm . The temperature range of the thermoelastic martensitic transformation for this alloy is approximately 40-60 ° C. The process of nano-assembly of the functional structures in the configuration of rings, loops and suspended elements is carried out under the control of the SEM and includes operations: selection of individual nano-objects from a variety of pre-prepared, capture and separation of the nano-object, the formation of a functional structure, for example, rings and mechanical fastening to a substrate or in a three-dimensional construction, in a suspended state. Often, the nanowires of different nature form beams or “forest”, so an individual object, for example, a nanowire or its fragment, is held with the help of a nanogripper and is separated from the array. The formation of a loop or ring necessarily requires fixing at one point to impart torsional moment. Mechanical fixing can be accomplished using two nanotweezers and two nano-manipulators. Electrical and mechanical contact can be achieved by applying ion-stimulated metal deposition in the FIB-CVD setup. A fixed nanowire can be bent or even twisted into a coil. As an example of the application of the proposed method, functional structures of CNTs decorated with Gd nanoparticles are presented.

Key words: nanowires, three-dimensional nanomanipulation, CNT, bottom-up nano-assembling, ring structures, pig-tail structures, shape memory effect, Ti_2NiCu alloy.

1. Введение

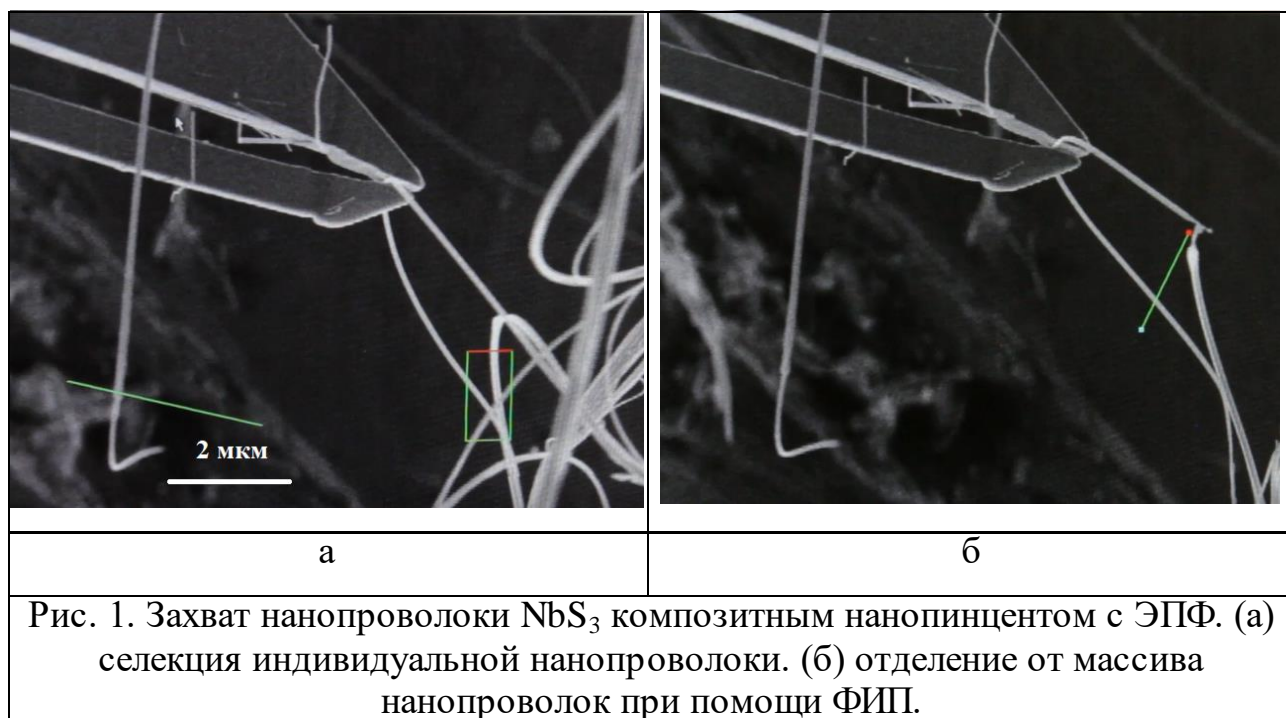
Трехмерные кольцевые и резонаторные функциональные структуры из различных наноматериалов являются основой для многих перспективных технологических решений в таких инновационных областях, как наносенсорика, нанофотоника, квантовая калоритроника и др. Появление практичной технологии, позволяющей создавать из имеющихся в большом количестве наноматериалов: нанопроволок, нанотрубок, нановискеров и др. трехмерных функциональных структур, в частности, петель, колец, подвешенных и распределенных в пространстве, позволило бы существенно ускорить прогресс в этих областях.

Например, на геометрии кольца основаны Джозефсоновские тепловые интерферометры, создание которых ознаменовало открытие новой области, а именно - теплового аналога когерентной электроники: когерентной калоритроники [1]. Когерентная калоритроника быстро развивается, в ней предложены концепции многочисленных устройств [2-6]. Кремниевые нанофотонные кольцевые резонаторы, имеют многообещающих применения в качестве фильтров и оптических линий задержки, биосенсоров без меток и активных колец для эффективных модуляторов и даже источников света [7,8]. Создание трехмерных наноструктур (наноантенн) из различных оптически активных материалов позволило бы реализовать идеи метаматериалов в оптической области спектра и выше. Огромное значение подвешенные оптические и электронные наноструктуры имеет для сенсорики, биосенсорики и лаб-он-чип диагностики [9,10]. В дополнение к традиционному подходу на основе планарной технологии «сверху-вниз» в последние годы сделаны предложения по разработке технологии механической наносборки «снизу-вверх» при помощи наноинструментов, имеющих размеры порядка самих нанообъектов. Это стало возможным с созданием механических наноинструментов, из сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) [11].

Цель настоящей работы состоит в разработке лабораторной технологии создания кольцевых, петлевых подвешенных структур на основе нанопроволок методом механической наносборки «снизу-вверх».

2. Система 3D наноманипулирования на основе нанопинцетов с ЭПФ

Для механического нано-ассемблирования в работе применена система на основе композитных микроинструментов с ЭПФ [11-14]. Система включает сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) и ионный микроскоп с системой фокусированного ионного пучка (ФИП) CrossBeam Neon40 EsB (Carl Zeiss) с двумя наноманипуляторами Kleindiek, в вакуумной камере которого производится наносборка. Наноманипулятор Kleindiek снабжен нано пинцетом с резистивным микро нагревателем, который размещен на кончике вольфрамовой иглы. Кончик иглы с нанопинцетом способен с точностью порядка 10 нм позиционироваться при помощи наноманипулятора Kleindiek в объеме рабочей камеры микроскопа.



Нанопинцет (см. Рис. 1) выполнен из композита на основе сплава Ti₂NiCu с ЭПФ и имеет размеры 20x5x1 мкм³. Величина управляемого зазора 0...1 мкм. Интервал температур термоупругого мартенситного превращения для этого сплава составляет приблизительно 40-60°С [14]. Управление зазором нанопинцета осуществляется локальным разогревом кончика вольфрамовой иглы. Резистивный микронагреватель, в качестве которого применен бескорпусный

кремниевый диод, расположен на расстоянии около 5 мм от кончика иглы с нанопинцетом. Управляющий ток нагревателя 10...20 мА. Время отклика нанопинцета на изменение тока составляет около 1 сек.

3. Экспериментальное исследование процесса формирования трехмерных кольцевых, петлевых и подвешенных структур на основе нанопроволок с применением методов механической наносборки «снизу-вверх»

Процесс наносборки функциональных структур в конфигурации колец, петель и подвешенных элементов осуществляется под контролем СЭМ и включает операции: селекции индивидуальных нанообъектов из множества заранее подготовленных, захват и отделение нанообъекта, формирование функциональной структуры, например, кольца и механическое закрепление, а при необходимости, электрическое присоединение к контактам на подложке или в трехмерной конструкции, в подвешенном состоянии.

Часто нанопроволоки различной природы формируют пучки или «лес», поэтому индивидуальный объект, например, нанопроволока или ее фрагмент удерживается при помощи нанопинцета (см. Рис. 1а) и отделяется от массива. Отделение от массива может произойти и самопроизвольно, но часто требуется применение ФИП, как показано на Рис. 1б.

Формирование петли или кольца обязательно требует закрепления в одной точке для придания крутильного момента. Механическое закрепление можно осуществить при применении двух нанопинцетов и двух наноманипуляторов. Электрический и механический контакт можно достичь, применяя ионно-стимулированное осаждение металла в установке ФИП (Рис. 2а). Закрепленной нанопроволоке можно придать изгиб или даже скрутить в катушку (Рис. 2б). Примеры созданных функциональных структур из УНТ, декорированных Gd показаны на Рис. 3.

4. Заключение

В работе представлены предварительные результаты по разработке лабораторной технологии создания трехмерных функциональных наноструктур методом механической наносборки «снизу-вверх». Определенные трудности

при формировании петлевых, кольцевых и подвешенных наноструктур преодолеваются при сочетании методов ФИП и механического манипулирования с помощью наноцифетов с ЭПФ. Продемонстрирована селекция индивидуальных нанопроволок из массива, отделение нанопроволоки, закрепление при помощи ФИП, формирование петель, колец и катушек с электрическими контактами в подвешенном состоянии, в диапазоне толщин нанопроволок от 30 до 300 нм.

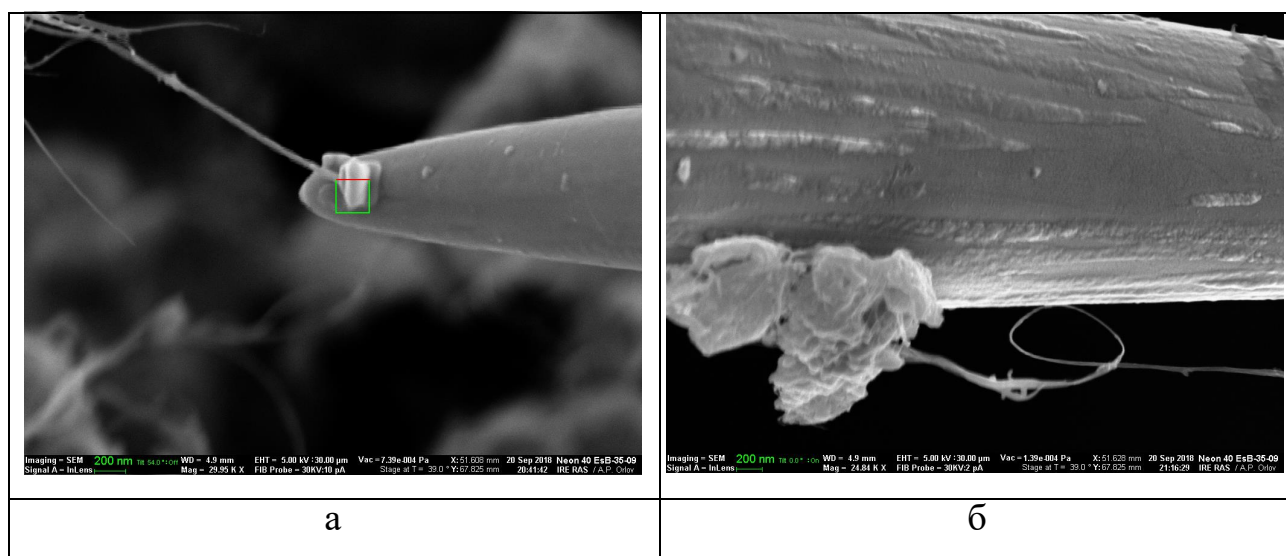


Рис. 2. Этапы формирования кольцевых и подвешенных структур из УНТ. (а) закрепление при помощи ФИП. (б) Формирование изгиба.

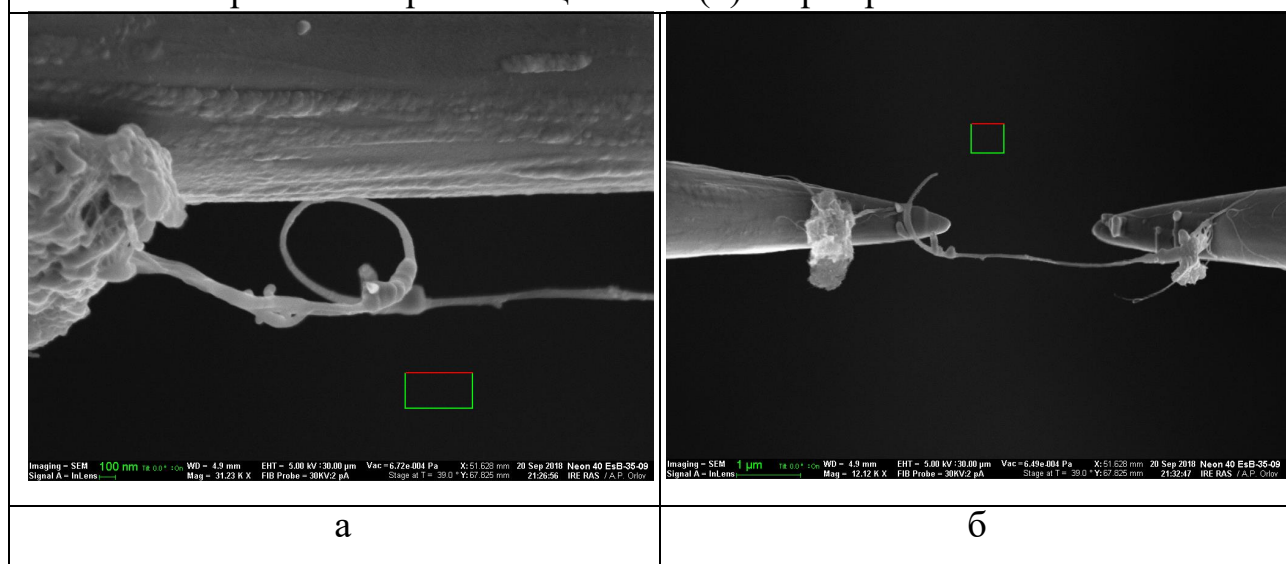


Рис. 3. Примеры функциональных структур из нанопроволок, полученных методом механической наносборки «снизу-вверх». (а) кольцевая структура, выполненная из декорированных Gd УНТ. (б) подвешенная нанопроволока с электрическими контактами.

Выявлены ограничения, присущие методу. Во-первых, во всех случаях возможно манипулирование лишь теми объектами, размеры и свойства которых позволяют надежно их видеть оператору СЭМ. Во-вторых, затруднено манипулирование такими объектами, как одностенные УНТ и однослойный графен, так как в процессе манипулирования электронное облучение в СЭМ может нарушить их структуру.

Предложенный метод может найти применение при создании и изучении трехмерных и сложных по конфигурации наноструктур, например для нанофотоники, метаматериалов, нанокалоритроники. Особый интерес представляет применение механического наноманипулирования диэлектрическими, органическими и биообъектами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ гранты № 18-57-34002, 17-57-560002.

Литература

1. Giazotto, F., Martínez-Pérez, M. J. The Josephson heat interferometer. *Nature*, 2012, Vol. 492(7429), pp. 401-407.
2. Solinas P., Gasparinetti S., Golubev D., Giazotto F., Solinas P., Gasparinetti S., Golubev D., Giazotto F. A. Josephson radiation comb generator. *Scientific reports*, 2015, Vol. 5, pp. 12260.
3. Guarcello C., Solinas P., Braggio A., Giazotto F. Phase-coherent solitonic Josephson heat oscillator. 2018. arXiv preprint arXiv:1803.02588.
4. Cassidy M. C., Bruno A., Rubbert S., Irfan M., Kammhuber J., Schouten R. N., Kouwenhoven, L. P. Demonstration of an ac Josephson junction laser. 2017. *Science*, Vol. 355(6328), pp. 939-942.
5. Giazotto F., Martínez-Pérez M. J., Solinas P. Coherent diffraction of thermal currents in Josephson tunnel junctions. 2013. *Physical Review B*, Vol. 88(9), 094506.

6. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T., De Vos K., Kumar Selvaraja S., Claes T., Baets R. Silicon microring resonators. (2012). *Laser & Photonics Reviews*, Vol. 6(1), pp. 47-73.
7. Matsko A. B., Savchenkov A. A., Strekalov D., Ilchenko V. S., Maleki L. Review of applications of whispering-gallery mode resonators in photonics and nonlinear optics. 2005. *IPN Progress Report*, Vol. 42(162), pp. 1-51.
8. Fan X., White I. M., Shopova S. I., Zhu H., Suter J. D., Sun Y. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review. 2008, *Analytica chimica acta*, Vol. 620(1-2), pp. 8-26.
9. Janissen R., Sahoo P. K., Santos C. A., da Silva A. M., von Zuben A. A., Souto D. E., Oliveira D. S. InP nanowire biosensor with tailored biofunctionalization: ultrasensitive and highly selective disease biomarker detection. 2017. *Nano letters*, Vol. 17(10), pp. 5938-5949.
10. von Gratowski S., Koledov V., Shavrov V., Petrenko S., Irzhak A., Shelyakov A., Jede R. Advanced System for Nanofabrication and Nanomanipulation Based on Shape Memory Alloy. In *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology* 2018. pp. 135-154. Springer, Singapore.
11. Zhikharev A. M., Irzhak A. V., Beresin M. Y., Lega P. V., Koledov, V. V., Kasyanov N. N., Martynov G. S. New system for manipulation of nanoobjects based on composite Ti₂NiCu/Pt nanotweezers with shape memory effect. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 741(1), p. 012206.
12. Bhattacharyya S., Koledov V., von Gratowski S., Coleman C., Churochkin, D., Zeigler A., Irzhak A. (2018, August). Bottom up Nano-integration Technique for the Fabrication of Novel Superconducting Quantum Interference Devices Based on Granular Superconducting Diamond. In 2018 *IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*, pp. 122-125.
13. Zakharov D., Lebedev G., Irzhak, A., Afonina V., Mashirov A., Kalashnikov V., Shavrov V. Submicron-sized actuators based on enhanced shape memory

composite material fabricated by FIB-CVD. *Smart materials and structures*, 2018. Vol. 21(5), 052001.

14. Shelyakov A. V., Sitnikov N. N., Koledov V. V., Kuchin D. S., Irzhak A. I., Tabachkova, N. Y. Melt-spun thin ribbons of shape memory TiNiCu alloy for micromechanical applications. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2011. Vol. 2, pp. 66-68. DOI [10.1080/19475411.2011.567305](https://doi.org/10.1080/19475411.2011.567305)

Для цитирования:

С. В. Фонграговски, В. В. Коледов, А.П. Орлов, А.В.Фролов, А.М.Смолович, П.В.Лега, В. Г. Шавров, В.Ч.Фам, А. В. Иржак, Т. Пекизех, С. Бхатчатаррия. Создание кольцевых и петлевых подвешенных структур на основе нанопроволок методом механической наносборки «снизу-вверх». Журнал радиоэлектроники. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/14/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.14