

Замбург Евгений Геннадьевич – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; ассистент.

Хахулин Даниил Александрович – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Чон-Гол Юн – Университет Суwon; e-mail: jgyoon@suwon.ac.kr; San 2-2, Wau-ri Bonfdam-eup, Hwawsung-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea; кафедра физики; д.т.н.; профессор.

Голосов Дмитрий Анатольевич – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; e-mail: dmgoosov@gmail.com; 220013, Беларусь, г. Минск, ул. Бровки, 6; кафедра электронной техники и технологии; к.т.н.

Ageev Oleg Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: ageev@sfnedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185508525; director of Institute of Nanotechnology, Electronics, and Electronic Equipment Engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Varzarev Yuriy Nikolaevich – e-mail: yu_varzarev@sfnedu.ru; the department of nanotechnology and MEMS; cand. of eng. sc.; associate professor.

Dzhuplin Vladimir Nikolaevich – e-mail: dzhuplin@mail.ru; the department of nanotechnology and MEMS; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zamburg Evgeny Gennad'evich – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

Khakhulin Daniil Aleksandrovcih – e-mail: khakhulin.d.a@gmail.com; the department of nanotechnology and MEMS; postgraduate student.

Jong-Gul Yoon – University of Suwon; e-mail: jgyoon@suwon.ac.kr; San 2-2, Wau-ri Bonfdam-eup, Hwawsung-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea; the department of physics; dr. of eng. sc.; professor.

Golosov Dmitry Anatolyevich – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; e-mail: dmgoosov@gmail.com; 6, Browki street, Minsk, 220013, Belarus; the department of electronic engineering and technology; cand. of eng. sc.

УДК 621.38-022.532

М.В. Ильина, Ю.Ф. Блинов, В.А. Смирнов, А.А. Коньшин, Чинь Ван Мьой
РАЗРАБОТКА ЯЧЕЙКИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ
МЕМРИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ВЕРТИКАЛЬНО
ОРИЕНТИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКОЙ*

Одним из приоритетных направлений развития современной наноэлектроники является разработка и создание энергонезависимых элементов памяти с высоким быстродействием и плотностью записи информации. Перспективным направлением в этой области является разработка и исследование наноразмерных мемристорных структур. В работе предложен принцип работы ячейки энергонезависимой памяти на основе мемристорной структуры с вертикально ориентированной углеродной нанотрубкой (ВОУНТ). Показано, что переключение сопротивления мемристорной структуры связано с деформацией ВОУНТ под действием внешнего электрического поля и вандерваальсовым взаимодействием с верхним электродом, отделенным туннельным зазором. Проведены теоретические исследования влияния диаметра, длины и модуля Юнга ВОУНТ, величины туннельного зазора и прикладываемого напряжения на переключение сопротивления структуры на основе ВОУНТ, а также оценены значения возникающих в структуре вандерваальсовых, электростатических и упругих сил. Показано, что структура на основе ВОУНТ с модулем Юнга

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности (задание 16.1154.2014/К).

1 ТПа, высотой 2 мкм и диаметром от 10 до 100 нм при туннельном зазоре между верхней нанотрубки и верхним электродом от 1,0 до 1,5 нм проявляет мемристорный эффект. На основе мемристорной структуры с ВОУНТ разработана ячейка энергонезависимой памяти со временем переключения $\sim 10^{-12}$ с и напряжением чтения менее 1 В, напряжением записи около 2 В и напряжением стирания около 6 В. Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергонезависимой памяти высокого быстродействия и плотности записи информации на основе мемристорных структур с вертикально ориентированными углеродными нанотрубками.

Нанотехнологии; наноэлектроника; мемристор; вертикально ориентированные углеродные нанотрубки; ВОУНТ; энергонезависимая память; пьезоэлектрический заряд; деформация.

M.V. Ilina, Yu.F. Blinov, V.A. Smirnov, A.A. Konshin, Trinh Van Muoi

DEVELOPMENT OF NONVOLATILE MEMORY CELL BASED MEMRISTOR STRUCTURES WITH VERTICALLY ALIGNED CARBON NANOTUBES

One of the priority areas of evolution of modern nanoelectronics is the development and creation of nonvolatile memory elements with high speed and density information recording. A promising direction in this area is the development and study of nanoscale memristor structures. In this paper the principle of operation of the nonvolatile memory cell based on memristor structure with the vertically aligned carbon nanotube (VA CNT) is presented. It is shown that the resistive switching of the memristor structure is associated with deformation of the VA CNT under the influence of an external electric field and the van der Waals interaction with the separated by a tunneling gap upper electrode. The theoretical studies of the influence of diameter, length and Young's modulus of the VA CNT, the tunneling gap and the applied voltage on the resistive switching of the structure based on the VA CNT are carried. Values of the van der Waals, electrostatic and elastic forces occurring in the structure are evaluated. It is shown that the structure based on VA CNT with Young's modulus of 1 TPa, height of 2 μm and diameter of 10 to 100 nm at tunneling gap between the top of the nanotube and the upper electrode from 1,0 to 1,5 nm has memristor effect. Based on the memristor structure with the VA CNT the nonvolatile memory cell with a switching time of $\sim 10^{-12}$ s, and read voltage less than 1 V, write voltage about 2 V, and the erase voltage of about 6 V is developed. The obtained results can be used to develop a nonvolatile memory of high speed and density of information recording, based on memristor structures with vertically aligned carbon nanotubes.

Nanotechnology; nanoelectronics; memristor; vertically aligned carbon nanotubes; VA CNT; nonvolatile memory; piezoelectric charge; deformation.

Введение. Одним из приоритетных направлений развития современной наноэлектроники является разработка и создание энергонезависимых элементов памяти с высоким быстродействием и плотностью записи информации [1–3]. Перспективным материалом для создания таких элементов памяти представляются ориентированные углеродные нанотрубки (УНТ), которые благодаря сочетанию уникальных электрических, геометрических и механических свойств нашли широкое применение при разработке энергонезависимой памяти, основанной на электромеханическом взаимодействии между двумя УНТ, либо между УНТ и подложкой [4–10].

Основными недостатками существующих конструкций элементов памяти на основе УНТ являются необходимость прецизионного выравнивания и ориентирования большого числа углеродных нанотрубок на подложке, а также сложность формирования качественных омических контактов к ним при применении горизонтально ориентированных УНТ [4–7], и высокие значения напряжений (> 20 В) и времени переключения ($\sim 10^{-9}$ с) при использовании вертикально ориентированных УНТ (ВОУНТ) [7–10]. Развитие метода плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) позволило решить трудности, связанные с выравниванием и ориентированием ВОУНТ на подложке [11–13]. Однако вопросы, связанные с быстродействием и энергоэффективностью ячеек памяти на основе электромеханического взаимодействия ВОУНТ, остаются нерешенными.

Перспективным направлением в области повышения быстродействия и энергоэффективности является разработка энергонезависимой памяти на основе наноразмерных мемристорных структур, т.е. структур, изменяющих свое сопротивление между низко- и высокоомным состояниями под действием внешнего электрического поля [14–16]. Мемристорный эффект в структуре на основе ВОУНТ впервые был обнаружен при приложении локального внешнего электрического поля методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) [17]. Экспериментальные исследования структуры на основе вертикально ориентированной углеродной нанотрубки методом СТМ показали, что переключение ее сопротивления связано с процессами деформации, поляризации и накопления пьезоэлектрического заряда в ВОУНТ [18]. В связи с этим актуальной задачей является разработка и исследование энергонезависимой памяти на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, отвечающей условиям высокого быстродействия, масштабируемости и энергоэффективности.

Целью данной работы является разработка конструкции ячейки энергонезависимой памяти на основе мемристорных свойств ВОУНТ, отвечающей условиям высокого быстродействия ($\sim 10^{-12}$ с) и низкого напряжения переключения (> 8 В).

Методика исследования. В качестве экспериментального образца использовалась структура, представляющая собой индивидуальную нанотрубку из массива ВОУНТ, выращенного методом PECVD с использованием многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия) [12, 13, 19–21], кремниевую подложку с проводящим слоем Ti/Ni, выступающим в качестве нижнего электрода, и верхний электрод – вольфрамовый зонд СТМ, отделенный от вершины нанотрубки туннельным зазором d (рис. 1). Средние значения диаметра D , высоты L и плотности ВОУНТ в массиве, определенные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), составили 90 нм, 2 мкм и 8 мкм^{-2} соответственно. Эффективный R_{eff} и физический радиус R_{tip} зонда СТМ составили 0,5 и 50 нм соответственно. Схематическое изображение мемристорной структуры на основе ВОУНТ представлено на рис. 1. Результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик структуры при приложении импульсов напряжения амплитудой U_0 от 1 до 10 В представлены в [18].

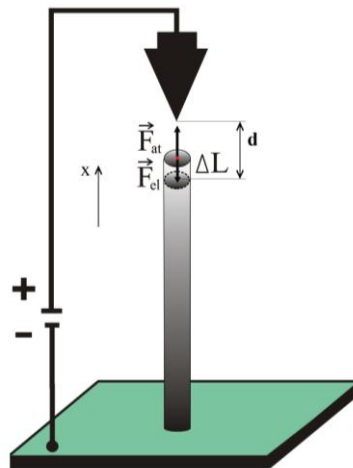


Рис. 1. Схематическое изображение мемристорной структуры на основе ВОУНТ и направления сил при приложении внешнего электрического поля

Результаты экспериментальных исследований позволили предположить, что принцип работы ячейки энергонезависимой памяти на основе мемристорной структуры с ВОУНТ заключается в следующем: в исходном состоянии ячейка находится в высокоомном состоянии, так как вершину ВОУНТ и верхний электрод разделяет туннельный зазор d ; при приложении импульса напряжения заданной амплитуды $\pm U_0$ (как при положительной, так и при отрицательной полярности) нанотрубка удлиняется на величину $\Delta L \geq d$ и касается верхнего электрода, и ячейка переключается в низкоомное состояние. После снятия внешнего электрического поля ВОУНТ удерживается верхним электродом под действием сил Ван-дер-Ваальса F_{wd} при условии, что упругие силы F_{el} , возникающие в нанотрубке в результате ее деформации, не превышают сил Ван-дер-Ваальса. Переключение ячейки в высокоомное состояние осуществляется при приложении положительного напряжения U_0 , и связано с тем, что в нанотрубке из-за ее удлинения ΔL возникает положительный пьезоэлектрический заряд Q_{cnt} , который приводит к появлению между верхним электродом и ВОУНТ электростатических сил отталкивания $F_{cnt/tip}$, взаимное действие которых с упругими силами F_{el} отрывает нанотрубку от верхнего электрода.

Для определения оптимальных значений параметров диаметра D , длины L и модуля Юнга Y ВОУНТ, а также туннельного зазора d , при которых наблюдаются воспроизводимые процессы записи и стирания информации, проводилось моделирование деформации ВОУНТ под действием локального внешнего электрического поля ($U(t)$ от 1 до 10 В), а также оценка возникающих упругих, вандерваальсовых и электростатических сил при изменении D в диапазоне от 10 до 100 нм, L от 0,5 до 5,0 мкм, Y от 0,8 до 1,2 нм и d от 0,2 до 5,0 нм.

Деформация ВОУНТ $\Delta L(x,t)$ определялась из решения дифференциального уравнения гиперболического типа [22]:

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta L(x,t)}{\partial t^2} = Y \frac{\partial^2 \Delta L(x,t)}{\partial x^2} + \frac{F_{at}(x,t)}{V}, \quad (1)$$

где $0 \leq x \leq L$; ρ и V – плотность и объем многослойной углеродной нанотрубки; $F_{at}(x, t)$ – поверхностная электростатическая сила притяжения, возникающая между нанотрубкой и верхним электродом при приложении внешнего электрического поля $U(t)$ (рис. 1) и равная

$$F_{at}(x,t) = 0,5 \varepsilon \varepsilon_0 E(x,t)^2 S, \quad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость воздуха; $E(x,t)$ – напряженность электрического поля; S – площадь поперечного сечения ВОУНТ.

Решение уравнения (1) при выполнении однородных начальных и граничных условий в точке $U(t) = U(t_0) = U_0$ имеет вид

$$\Delta L(x) = \frac{0,5 \varepsilon \varepsilon_0 U_0^2}{YL(d - \Delta L)^2} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right). \quad (3)$$

Результаты решения уравнения (3) для ВОУНТ ($D = 90$ нм, $L = 2$ мкм и $Y = 1$ ТПа) с туннельным зазором от 0,2 до 5,0 нм представлены на рис. 2.

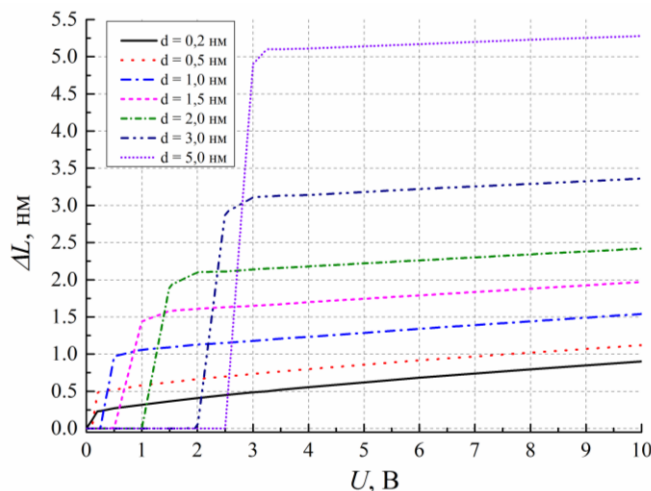


Рис. 2. Теоретическая зависимость удлинения ВОУНТ от прикладываемого напряжения при величине туннельного зазора от 0,2 до 5,0 нм

Силы Ван-дер-Ваальса, возникающие при контакте между ВОУНТ и верхним электродом, оценивались как [17]:

$$F_{wd} = -\frac{dW}{dr} = -\frac{d}{dr} \left(-\frac{3}{2} \frac{J_c J_w}{(J_c + J_w)} \frac{\alpha_c \alpha_w}{r^6} \right) N = \frac{9 J_c J_w}{(J_c + J_w)} \frac{\alpha_c \alpha_w}{r^7} N, \quad (4)$$

где J_c и α_c – ионизационный потенциал и поляризуемость углерода, J_w и α_w – ионизационный потенциал и поляризуемость вольфрама, r – расстояние между атомами ВОУНТ и зонда СТМ, N – количество взаимодействующих атомов.

Электростатические силы, возникающие при приложении внешнего электрического поля между ВОУНТ и верхним электродом, оценивались как

$$F_{cnt/tip} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q_{cnt} Q_{tip}}{r^2} \right), \quad (5)$$

где $Q_{cnt} = \beta F_{el}$ – пьезоэлектрический заряд ВОУНТ, возникающий в результате деформации; β – пьезоэлектрический модуль ВОУНТ [18]; $Q_{tip} = 4\pi\epsilon_0 R_{tip} U_0$ – заряд на зонде СТМ, возникающий при приложении электрического поля.

Результаты и их обсуждение. Результаты теоретических исследований показали (форм. 3), что деформация нанотрубки ΔL под действием локального внешнего электрического поля линейно возрастает с увеличением ее длины L , а изменение диаметра ВОУНТ D не оказывает существенного влияния на значение ΔL (при условии $d \ll D$). Так, при напряженности внешнего электрического поля $E(t_0, L) \sim 10^9$ В и параметрах нанотрубки $D = 90$ нм и $Y = 1$ ТПа: удлинение $\Delta L = 0,35$ нм для $L = 0,5$ мкм; $\Delta L = 0,7$ нм для $L = 1$ мкм; $\Delta L = 1,4$ нм для $L = 2$ мкм; $\Delta L = 2,1$ нм для $L = 3$ мкм и т.д. (форм. 3). При увеличении модуля Юнга ВОУНТ Y , напротив, наблюдается уменьшение деформации нанотрубки. Необходимо учитывать, что увеличение модуля Юнга нанотрубки может происходить при росте диаметра многослойной ВОУНТ, в случае увеличения количества слоев нанотрубки и возникновения дополнительных сил Ван-дер-Ваальса между ними [23, 24].

Таким образом, чем меньше высота ВОУНТ L , тем большее значение напряженности внешнего электрического поля E требуется на достижение деформации $\Delta L \geq d$, что повышает энергозатратность процесса переключения мемристорной

структуры на основе ВОУНТ. При больших значениях высоты ВОУНТ ($L > 3$ мкм) величины относительной деформации ВОУНТ становится недостаточно для выполнения условия $F_{cnt/tip} + F_{el} > F_{wd}$, при котором наблюдается переключение мемристорной структуры из низкоомного состояния в высокоомное, поэтому наиболее оптимальной длиной ВОУНТ с $Y = 1$ ТПа представляется $L = 2$ мкм. При этом диаметр ВОУНТ может изменяться в широком диапазоне значений при условии неизменности количества ее слоев.

Результаты моделирования деформации нанотрубки ΔL при величине туннельного зазора между вершиной ВОУНТ и верхним электродом от 0,2 до 5,0 нм показали (рис. 2), что при $d \leq 0,5$ нм ВОУНТ ($D = 10-90$ нм, $L = 2$ мкм и $Y = 1$ ТПа) касается верхнего электрода при $U(t) < 0,5$ В, при $d = 1,0-1,5$ нм нанотрубка касается верхнего электрода при $U(t) < 2$ В, при $d = 2,0-5,0$ нм при напряжении $U(t) < 3,2$ В. Очевидно, что чем меньше туннельный зазор, тем ниже помехоустойчивость мемристорной структуры, чем больше туннельный зазор, тем больше величина упругих сил F_{el} , возникающих в ВОУНТ в результате ее деформации, и сил Ван-дер-Ваальса F_{wd} может быть не достаточно, чтобы удерживать ВОУНТ после снятия внешнего электрического поля. Так, при $\Delta L = d = 1,0-1,5$ нм величина упругих сил F_{el} составляет 1,5–3,1 нН, при $\Delta L = d = 2,0-5,0$ нм упругие силы F_{el} уже достигают 3,6–7,4 нН, в то время когда силы Ван-дер-Ваальса $F_{wd} \approx 10$ нН при расстоянии между ними $r = 2 \text{ \AA}$ (форм. 4). С учетом данных условий, для воспроизводимого, устойчивого переключения мемристорной структуры на основе ВОУНТ при минимальных затратах внешнего электрического поля оптимальным значением туннельного зазора является $d = 1,0-1,5$ нм, при котором напряжение чтения составляет < 1 В, а напряжение записи около 2 В.

Напряжение стирания определяется из условия $F_{cnt/tip} + F_{el} > F_{wd}$. При $d = 1,0-1,5$ нм электростатические силы отталкивания между ВОУНТ и верхним электродом $F_{cnt/tip}$ должны превышать 8,5 нН (форм. 5), что выполняется при приложении пилообразного импульса положительного напряжения амплитудой более 6 В. Время переключения мемристорной структуры на основе ВОУНТ оценивалось на основе корреляции экспериментальных ВАХ, полученных методом СТМ, и теоретических ВАХ, полученных на основе закона сохранения энергии и баланса мощностей [18, 22], и составило $\sim 10^{-12}$ с.

Таким образом, мемристорная структура на основе вертикально ориентированной углеродной нанотрубки длиной 2 мкм и диаметром от 10 до 100 нм с туннельным верхним контактом ($d = 1,0-1,5$ нм) представляет собой ячейку энергонезависимой памяти с временем переключения $\sim 10^{-12}$ с, напряжением чтения менее 1 В, напряжением записи около 2 В и стирания около 6 В.

Заключение. В работе проведены теоретические исследования влияния диаметра, длины и модуля Юнга вертикально ориентированной углеродной нанотрубки, а также величины туннельного зазора и прикладываемого напряжения на переключение сопротивления мемристорной структуры на основе ВОУНТ. Показано, что процесс переключения мемристорной структуры определяется значением туннельного зазора и соответствующей ему деформации нанотрубки, а также суперпозицией сил упругого, электростатического и вандерваальсового взаимодействия между ВОУНТ и верхним электродом.

Установлено, что воспроизводимые процессы записи и стирания информации ячейки памяти на основе мемристорной структуры с ВОУНТ высотой 2 мкм и диаметром от 10 до 100 нм наблюдаются при туннельном зазоре от 1,0 до 1,5 В и напряжении записи $\sim \pm 2$ В, напряжении стирания более 6 В и напряжении чтения

менее 1 В. Оценочное время переключения мемристорной структуры на основе ВОУНТ составляет $\sim 10^{-12}$ с. Полученные теоретические данные хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований мемристорной структуры на основе ВОУНТ [18].

Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергонезависимой памяти высокого быстродействия и плотности записи информации на основе мемристорных структур с вертикально ориентированными углеродными нанотрубками.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Meena J.S., Sze S.M., Chand U., Tseng T.-Y.* Overview of emerging nonvolatile memory technologies // *Nanoscale Research Letters*. – 2014. – Vol. 9 (1). – P. 1-33.
2. *Lee J.S.* Progress in non-volatile memory devices based on nanostructured materials and nanofabrication // *Journal of Materials Chemistry*. – 2011. – Vol. 21, No. 37. – P. 14097-14112.
3. *Raoux S., Burr G.W., Breitwisch M.J., Rettner C.T., Chen Y.-C., Shelby R.M., Salinga M., Krebs D., Chen S.-H., Lung H.-L., Lam C.H.* Phase-change random access memory: A scalable technology // *IBM J. RES. & DEV.* – 2008. – Vol. 52, No. 4/5. – P. 465-479.
4. *Bichoutskaia E., Popov A.M., Lozovik Yu.E.* Nanotube-based data storage devices // *Materials Today*. – 2008. – Vol. 11, No. 6. – P. 38-43.
5. *Yao J., Jin Z., Zhong L., Natelson D., Tour J.M.* Two-Terminal Nonvolatile Memories Based on Single-Walled Carbon Nanotubes // *ACS Nano*. – 2009. – Vol. 3, No. 12. – P. 4122-4126.
6. *Lu X.B., Dai J.Y.* Memory effects of carbon nanotubes as charge storage nodes for floating gate memory applications // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 88. – P. 113104 (3).
7. *Rueckes T., Kim K., Joselevich E., Tseng G.Y., Cheung C.-L., Lieber C.M.* Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing // *Science*. – 2000. – Vol. 289, No. 7. – P. 94-97.
8. *Jang J.E., Cha S.N., Choi Y., Amaratunga G.A.J.* Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87. – P. 163114(3).
9. *Kinaret J.M., Nord T., Viefers S.* A carbon-nanotube-based nanorelay // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 82, No. 8. – P. 1287-1289.
10. *Lee S.W., Lee D.S., Morjan R.E., Jhang S.H., Sveningsson M., Nerushev O.A., Park Y.W., Campbell E.E.B.* A Three-Terminal Carbon Nanorelay // *Nano Lett.* – 2004. – Vol. 4, No. 10. – P. 2027-2030.
11. *Chen H., Roy A., Baek J.-B., Zhu L., Qua J., Dai L.* Controlled growth and modification of vertically-aligned carbon nanotubes for multifunctional applications // *Materials Science and Engineering R*. – 2010. – Vol. 70. – P. 63-91.
12. *Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Коломийцев А.С., Федотов А.А.* Исследование режимов формирования и модификации ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 69-77.
13. *Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Коноплев Б.Г., Федотов А.А.* Исследование режимов формирования каталитических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2011. – № 2. – Т. 13. – С. 226-231.
14. *Strukov D., Snider G., Stewart D.* The missing memristor found // *Nature*. – 2008. – Vol. 453. – P. 80-83.
15. *Akinaga H., Shima H.* Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides // *Proceedings of the IEEE*. – 2010. – Vol. 98, No. 12. – P. 2237-2251.
16. *Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Tsukanova O.G.* Formation of a Memristor Matrix Based on Titanium Oxide and Investigation by Probe Nanotechnology Methods // *Semiconductors*. – 2014. – Vol. 48, No. 13. – P. 1757-1762.

17. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Memristor Effect on Bundles of Vertically Aligned Carbon Nanotubes Tested by Scanning Tunnel Microscopy // *Technical Physics*. – 2013. – Vol. 58, No. 12. – P. 1831-1836.
18. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilin O.I., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Study of the Resistive Switching of Vertically Aligned Carbon Nanotubes by Scanning Tunneling Microscopy // *Physics of the Solid State*. – 2015. – Vol. 57, No. 4. – P. 825-831.
19. Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г. Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
20. Syurik Y.V., Ageev O.A., Ghislandi M.G., Tkalya E.E., Paterson G., McGrouther D., Loos J. Graphene network organisation in conductive polymer composites // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2012. – Vol. 213, No 12. – P. 1251-1258.
21. Агеев О.А., Сюрлик Ю.В., Климин В.С., Федотов А.А. Получение нанокомпозитных полимерных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, на основе НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 1 (90). – С. 135-142.
22. Рубашкина М.В., Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Смирнов В.А. Моделирование резистивного переключения вертикально ориентированной углеродной нанотрубки // *Материалы 25-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, г. Севастополь. – 2015. – Т. 2. – С. 737-738.
23. Ageev O.A., Ilin O.I., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Investigation of Effect of Geometrical Parameters of Vertically Aligned Carbon Nanotubes on their Mechanical Properties // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 894. – P. 355-359.
24. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Development of a technique for determining Young's modulus of vertically aligned carbon nanotubes using the nanoindentation method // *Nanotechnologies in Russia*. – 2012. – Vol. 71, No 1-2. – P. 47-53.

REFERENCES

1. Meena J.S., Sze S.M., Chand U., Tseng T.-Y. Overview of emerging nonvolatile memory technologies, *Nanoscale Research Letters*, 2014, Vol. 9 (1), pp. 1-33.
2. Lee J.S. Progress in non-volatile memory devices based on nanostructured materials and nanofabrication, *Journal of Materials Chemistry*, 2011, Vol. 21, No. 37, pp. 14097-14112.
3. Raoux S., Burr G.W., Breitwisch M.J., Rettner C.T., Chen Y.-C., Shelby R.M., Salinga M., Krebs D., Chen S.-H., Lung H.-L., Lam C.H. Phase-change random access memory: A scalable technology, *IBM J. RES. & DEV*, 2008, Vol. 52, No. 4/5, pp. 465-479.
4. Bichoutskaia E., Popov A.M., Lozovik Yu.E. Nanotube-based data storage devices, *Materials Today*, 2008, Vol. 11, No. 6, pp. 38-43.
5. Yao J., Jin Z., Zhong L., Natelson D., Tour J.M. Two-Terminal Nonvolatile Memories Based on Single-Walled Carbon Nanotubes, *ACS Nano*, 2009, Vol. 3, No. 12, pp. 4122-4126.
6. Lu X.B., Dai J.Y. Memory effects of carbon nanotubes as charge storage nodes for floating gate memory applications, *Applied Physics Letters*, 2006, Vol. 88, pp. 113104 (3).
7. Rueckes T., Kim K., Joselevich E., Tseng G.Y., Cheung C.-L., Lieber C.M. Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing, *Science*, 2000, Vol. 289, No. 7, pp. 94-97.
8. Jang J.E., Cha S.N., Choi Y., Amaratunga G.A.J. Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, 2005, Vol. 87, pp. 163114(3).
9. Kinaret J.M., Nord T., Viefers S. A carbon-nanotube-based nanorelay, *Applied Physics Letters*, 2003, Vol. 82, No. 8, pp. 1287-1289.
10. Lee S.W., Lee D.S., Morjan R.E., Jhang S.H., Sveningsson M., Nerushev O.A., Park Y.W., Campbell E.E.B. A Three-Terminal Carbon Nanorelay, *Nano Lett.*, 2004, Vol. 4, No. 10, pp. 2027-2030.

11. Chen H., Roy A., Baek J.-B., Zhu L., Qua J., Dai L. Controlled growth and modification of vertically-aligned carbon nanotubes for multifunctional applications, *Materials Science and Engineering R*, 2010, Vol. 70, pp. 63-91.
12. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Kolomiitsev A.S., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya i modifikatsii orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD na nanotekhnologicheskom komplekse NANOFAB NTK-9 [Research modes of the formation and modification oriented arrays of carbon nanotubes by PECVD on nanotechnological complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 69-77.
13. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Konoplev B.G., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya kataliticheskikh tseftrov dlya vyrashchivaniya orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD [Study mode-the MOU for the formation of catalytic centers for growing oriented arrays of carbon nanotubes by PECVD], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2011, Vol. 13, No. 2, pp. 226-231.
14. Strukov D., Snider G., Stewart D. The missing memristor found, *Nature*, 2008, Vol. 453, pp. 80-83.
15. Akinaga H., Shima H. Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides, *Proceedings of the IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 12, pp. 2237-2251.
16. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Formation of a Memristor Matrix Based on Titanium Oxide and Investigation by Probe Nanotechnology Methods, *Semiconductors*, 2014, Vol. 48, No. 13, pp. 1757-1762.
17. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Memristor Effect on Bundles of Vertically Aligned Carbon Nanotubes Tested by Scanning Tunnel Microscopy, *Technical Physics*, 2013, Vol. 58, No. 12, pp. 1831-1836.
18. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Ilin O.I., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Study of the Resistive Switching of Vertically Aligned Carbon Nanotubes by Scanning Tunneling Microscopy, *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57, No 4, pp. 825-831.
19. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. the experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
20. Syurik Y.V., Ageev O.A., Ghislandi M.G., Tkalya E.E., Paterson G., McGrouther D., Loos J. Graphene network organisation in conductive polymer composites, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 213, No 12, pp. 1251-1258.
21. Ageev O.A., Syurik Yu.V., Klimin V.S., Fedotov A.A. Poluchenie nanokompozitnykh polimernykh materialov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanostrukturami, na osnove NANOFAB NTK-9 [Creating nanocomposite polymeric materials modified carbon nanostructures based on NANOFAB NTK-9] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 135-142.
22. Rubashkina M.V., Ageev O.A., Blinov Yu.F., Smirnov V.A. Modelirovanie rezistivnogo pereklyucheniya vertikal'no orientirovannoy uglerodnoy nanotrubki [Simulation of the resistive switching of vertically aligned carbon nanotube], *Materialy 25-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii», g. Sevastopol'* [Materials of 25-th International Crimean conference "Microwave Equipment and Telecommunication Technologies", Sevastopol], 2015, Vol. 2, pp. 737-738.
23. Ageev O.A., Ilin O.I., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Investigation of Effect of Geometrical Parameters of Vertically Aligned Carbon Nanotubes on their Mechanical Properties, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 894, pp. 355-359.
24. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Development of a technique for determining Youngs modulus of vertically aligned carbon nanotubes using the nanoindentation method, *Nanotechnologies in Russia*, 2012, Vol. 71, No 1-2, pp. 47-53.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Ильина (Рубашкина) Марина Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: marubashkina@sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е»; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники (НТМСТ); ассистент.

Блинов Юрий Федорович – e-mail: blinov@sfedu.ru; тел.: +78634371940; кафедра НТМСТ; к.т.н.; доцент.

Смирнов Владимир Александрович – e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра НТМСТ; к.т.н.; доцент.

Коньшин Алексей Андреевич – e-mail: alexej94161@gmail.com; кафедра НТМСТ; студент.

Чинь Ван Мьюй – e-mail: tvm0209@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Pinna (Rubashkina) Marina Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: marubashkina@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, korp. "E", Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; assistant.

Blinov Yuriy Fedorovich – e-mail: blinov@sfedu.ru; phone: +78634371940; the department of nanotechnologies and microsystems; associate professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Konshin Aleksey Andreevich – e-mail: alexej94161@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

Trinh Van Muoi – e-mail: tvm0209@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

УДК 621.38-022.532

В.А. Смирнов, В.И. Авиллов, Л.Р. Саубанова, М.С. Солодовник, В.В. Полякова, О.Г. Цуканова, С.Ю. Краснобородько

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ*

Развитие технологии производства электронных устройств связано с применением методов нанотехнологии, использование которых позволило уменьшить размеры, увеличить плотность структур активных элементов интегральных микросхем на кристалле и снизить потребляемую мощность. Среди широкого спектра методов наноразмерного профилирования поверхности на основе зондовой нанолитографии одним из перспективных для позиционирования и локализации роста самоорганизующихся полупроводниковых наноструктур (СПН) является локальное анодное окисление (ЛАО), использование которого обеспечивает высокое пространственное разрешение, возможность профилирования поверхности подложки без дополнительных операций, связанных с нанесением фоторезиста, высокую воспроизводимость при минимальных нарушениях структурного совершенства эпитаксиального слоя. В работе представлены результаты исследования влияния технологических режимов локального анодного окисления на процесс формирования оксидных наноразмерных структур (ОНС) на поверхности эпитаксиальных структур (ЭС) арсенида галлия. Исследовано влияние амплитуды и длительности импульсов напряжения прикладываемого к системе зонд-подложка и амплитуды колебаний кантилевера на геометрические параметры ОНС арсенида галлия. Исследовано влияние режимов ЛАО на геометрические параметры профилированных наноразмерных структур (ПНС), полученных на поверхности ЭС арсенида галлия, после травления сформированных методом ЛАО ОНС. Установлено, что увеличение

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-19-10006.