

В.И. Авилов, В.А. Смирнов, Н.А. Шарапов

**РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В МЕМРИСТОРНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ ОКСИДА ТИТАНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И СИНАПТРОНИКИ**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния геометрических параметров (размерного эффекта) на резистивное переключение мемристорных структур на основе оксида титана, сформированных методом локального анодного окисления (ЛАО). С использованием численного моделирования на основе расчета распределения электрического потенциала и концентрации ионов кислорода в системе зонд-воздух-оксид-подложка определены значения потока окислителя к поверхности подложки, скорость роста оксида титана, профиль формируемой оксидной наноструктуры (ОНС), а также зависимости высоты и диаметра от основных управляющих параметров ЛАО (амплитуды и длительности импульсов приложенного напряжения, уровня относительной влажности внутри технологической камеры, расстояния зонд-подложка). Показано, что смоделированный профиль ОНС хорошо коррелирует с экспериментальными результатами. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния толщины ОНС титана, сформированных методом ЛАО на их мемристорные свойства. Показано, что ОНС титана, полученные методом ЛАО, проявляют мемристорный эффект без проведения дополнительной электроформовки и переключаются между состояниями с высоким (HRS) и низким (LRS) сопротивлением при напряжениях переключения менее 3 В. Установлено, что увеличение толщины ОНС от $4,5 \pm 0,7$ до $7,9 \pm 0,3$ нм приводит к уменьшению отношения сопротивлений оксидных наноструктур в состояниях HRS и LRS сопротивлением от 250 до 10,7 соответственно. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементов систем искусственного интеллекта и синаптроники на основе мемристорных наноструктур.

Нанотехнологии; наноматериалы; наноэлектроника; RRAM; мемристорные структуры; локальное анодное окисление; пленка титана; оксидные наноразмерные структуры.

V.I. Avilov, V.A. Smirnov, N.A. Sharapov

**SIZE EFFECT IN MEMRISTOR NANOSTRUCTURES BASED ON TITANIUM
OXIDE TO CREATE ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
SYSTEMS AND SYNAPTRONICS**

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the geometric parameters effect (size effect) on the resistive switching of memristor structures based on titanium oxide formed by the method of local anodic oxidation (LAO). Using numerical simulation, the oxidizer flux values to the substrate surface, the titanium oxide growth rate, the oxide profile the oxide nanostructure (ONS) formed, and also the height and diameter dependences were determined on the basis of the calculation of the electric potential distribution and the oxygen ion concentration in the probe-air-oxide- from the basic control parameters of the LAO (impulses amplitude and duration of the applied voltage, the relative humidity level inside the process chamber, the probe-substrate distance). It is shown that the modeled ONS profile correlates well with the experimental results. The experimental studies results of the titanium ONS thickness effect formed by the LAO method on their memristor properties are presented. It is shown that the titanium ONS obtained by the LAO method exhibit a memristor effect without additional electroforming and switch between the high (HRS) and low (LRS) resistance states at switching voltages less than 3 V. It is established that an increase in the thickness of the ONS from 4.5 ± 0.7 to 7.9 ± 0.3 nm leads to a decrease in the ratio of resistances of oxide nanostructures in the states of HRS and LRS by a resistance from 250 to 10.7, respectively. The obtained results can be used in the development of technological processes for manufacturing elements of artificial intelligence systems and synaptronic based on memristor nanostructures.

Nanotechnologies; nanomaterials; nanoelectronics; RRAM; memristor structures; local anodic oxidation; titanium film; oxide nanostructures.

Введение. Архитектура компьютерных систем Фон Неймана на протяжении нескольких десятилетий являлась основной. При этом в соответствии с законом Мура возник технологический барьер уменьшения геометрических размеров структур элементов интегральных микросхем (ИМС), что в свою очередь, привело к замедлению скорости обмена данных между процессором и памятью компьютера [1–5]. Для решения этой проблемы было предложено использовать архитектуру человеческого мозга, в которой множество параллельно соединенных вычислительных элементов (нейронов) связано между собой наноразмерными каналами проводимости (синапсами). Системы синаптроники, построенные по данной архитектуре могут превзойти современные процессоры во многих задачах, связанных с неструктурированной классификацией данных и распознаванием различных объектов и образов [1–5].

Изготовление ИМС на основе энергонезависимой резистивной памяти RRAM, которая представляет собой элементы памяти в виде ячеек из мемристорных структур на основе оксидов металлов, соединенных между собой шинами данных, является одним из основных способов технологической реализации данной архитектуры [6]. При этом RRAM имеет нано размеры, обладает высоким быстродействием и энергонезависимостью, что позволяет обеспечить массовый параллелизм и маломощные вычисления, наблюдаемые в человеческом мозге [1–3]. Предварительные оценки показали, что время переключения мемристоров между состояниями с высоким (HRS) и низким (LRS) сопротивлением может достигать 5 нс, при этом отношение значений сопротивления структуры в HRS и LRS состояниях достигает 10^5 [6–8].

Для изготовления памяти RRAM могут применяться различные материалы (оксиды, углеродные натрубки, органические нанокompозиты и др.) [9–14]. Одним из наиболее перспективных материалов является диоксид титана TiO_2 , мемристорные структуры на основе которого обладают высокой скоростью переключения в состояния HRS (res процесс) и LRS (set процесс) и имеют отношение сопротивлений в этих состояниях более 100 [6–8, 15–17]. При этом, методы их формирования хорошо совместимы с технологией производства элементов микро- и нанoeлектроники.

В работах [18–30] показано, что метод локального анодного окисления (ЛАО) является перспективным для изготовления оксидных наноразмерных структур (ОНС) титана, которые обладают стабильным мемристорным эффектом и не требуют электроформовки. Кроме того, формирование методом ЛАО планарных структур на основе ОНС имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими методами оптической литографии, поскольку не требует проведения дополнительных операций, связанных с нанесением, экспонированием и удалением фоторезиста, а также имеет более высокую разрешающую способность [31–36].

Однако при этом необходимо изучить механизмы формирования ОНС титана методом ЛАО. В работе [32] было показано, что процесс роста оксида связан с массопереносом ионов кислорода через слой оксида к поверхности металла, где происходит рост оксида.

При этом актуальной задачей является исследование закономерностей формирования оксидных наноразмерных структур титана методом локального анодного окисления и проявления мемристорного эффекта в них.

Целью работы является исследование влияния толщины ОНС титана, полученных методом ЛАО, на закономерности проявления мемристорного эффекта в них.

Моделирование процесса локального анодного окисления. Для экспериментальных исследований режимов формирования ОНС титана проводились теоретический анализ и моделирование процессов ЛАО, результаты которых показали, что наиболее вероятным источником окислителя являются молекулы воды, присутствующие

в воздушной среде и в виде адсорбата на поверхности подложки [32]. При этом рассматривается следующий механизм переноса: при приложении внешнего электрического поля между зондом и подложкой происходит диссоциация полярной молекулы H_2O на ионы O^{2-} и H^+ . Затем образованные ионы кислорода перемещаются к положительно заряженной подложке через слой образованного ранее оксида к поверхности металла, где происходит химическая реакция окисления с образованием оксида. Таким образом, скорость роста оксида v зависит от потока ионов кислорода j :

$$v = -\frac{M_o}{\rho_o} j, \quad (1)$$

где M_o и ρ_o – молярная масса и плотность оксида, при этом поток j ионов кислорода определяется дрейфовой и диффузионной составляющей:

$$j = \mu NE + D \nabla N, \quad (2)$$

где μ и D – подвижность и коэффициент диффузии ионов кислорода в среде (воздух или оксид), N – концентрация ионов кислорода E – напряженность электрического поля.

При этом чтобы найти распределение концентрации ионов кислорода N необходимо решить уравнение непрерывности:

$$\nabla(-\mu NE + D \nabla N) = R, \quad (3)$$

где R – скорость генерации ионов кислорода в воздушной среде, зависящая от напряженности электрического поля. Решение уравнения (1) требует также нахождения распределения электрического потенциала φ в рассматриваемой системе, описываемое уравнением Пуассона:

$$\nabla(\varepsilon \nabla \varphi) = 0, \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды (воздух или оксид).

Совместное решение уравнений (3) и (4) позволило найти распределение электрического потенциала и концентрации ионов кислорода в системе зонд-воздух-оксид-подложка (рис. 1), затем с помощью уравнений (2) и (1) можно рассчитать распределение скорости роста оксида по поверхности металла в каждый момент времени ЛАО и вычислить зависимости высоты и диаметра ОНС в процессе окисления при заданных технологических режимах ЛАО, а именно амплитуда и длительность импульсов приложенного напряжения, уровень влажности воздуха в технологической камере, расстояние зонд-подложка (рис. 2).

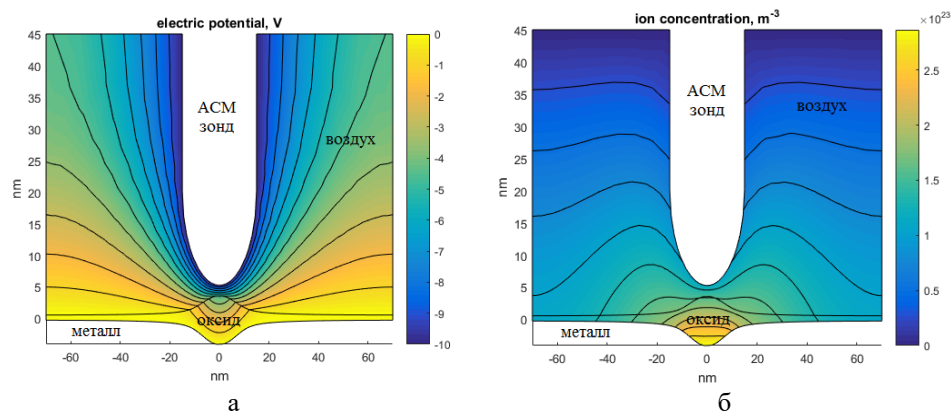


Рис. 1. Распределение электрического потенциала (а) и концентрации ионов кислорода (б) в системе зонд-воздух-оксид-подложка при ЛАО

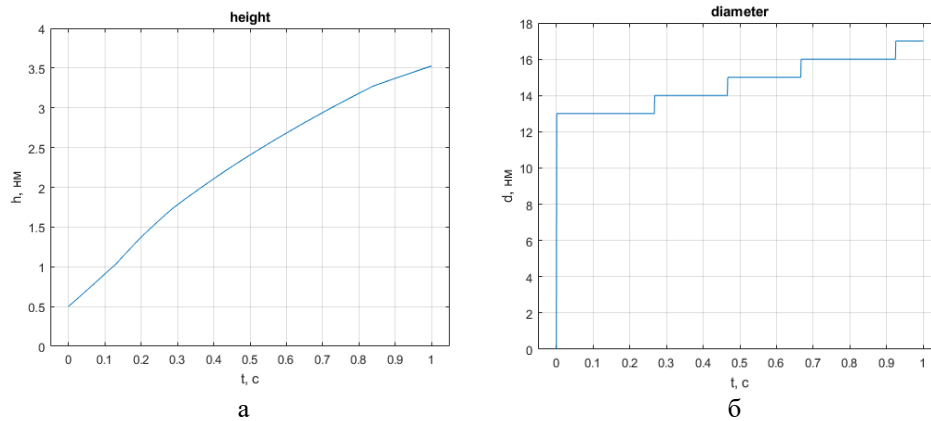


Рис. 2. Зависимости высоты (а) и диаметра (б) ОНС титана от длительности импульсов напряжения при ЛАО

С целью проверки адекватности результатов моделирования проводилось экспериментальные исследования по формированию ОНС титана методом ЛАО. Анализ полученных результатов показал, что профиль сформированных экспериментально ОНС титана хорошо коррелировал с рассчитанным теоретическим профилем (рис. 3).

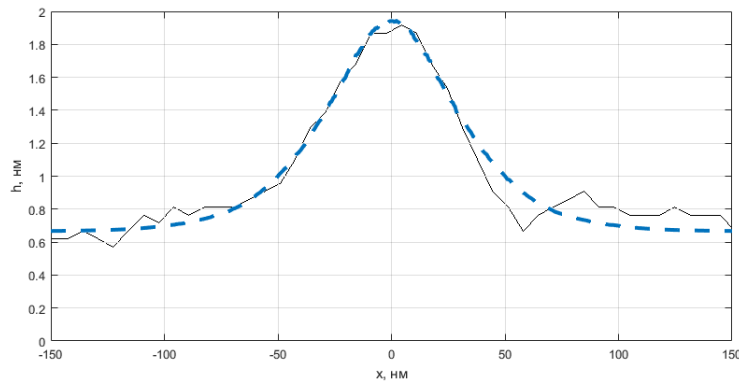


Рис. 3. Экспериментально полученный (сплошная линия) и рассчитанный (пунктирная линия) профили ОНС титана, сформированных методом ЛАО

Анализ теоретических результатов показал, наибольшая скорость оксида наблюдается на начальных этапах роста, по мере формирования ОНС скорость роста уменьшается, что связано с увеличением толщины оксида и, как следствие, уменьшением количества ионов кислорода, достигающим поверхности металла.

Экспериментальное исследование размерного эффекта в мемристорных наноструктурах на основе оксида титана. Для проведения экспериментальных исследований в качестве исходной подложки использовалась тонкая пленка титана, толщиной $19 \pm 0,5$ нм, полученная на поверхности структуры SiO_2/Si методом магнетронного распыления на многофункциональной установке Auto 500 (BOC Edwards, Англия). Затем с учетом результатов, полученных с помощью разработанной модели, проводилось локальное анодное окисление пленки титана кантилеверами марки NSG10 с проводящим покрытием из Pt с помощью зондовой на-

нолаборатории Ntegra (НТ МДТ, Зеленоград, Россия), путем сканирования в полуконтактном режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) участков размерами 2×2 мкм, при приложении к системе зонд-подложка импульсов напряжения амплитудой от 6 до 9 В. При этом скорость перемещения зонда составляла 6 мкм/с, относительная влажность воздуха в камере 90 ± 1 %, ток цепи обратной связи 1 нА.

Исследование морфологии и определение высоты ОНС титана проводилось методом АСМ в полуконтактном режиме, определение толщины пленки оксида титана проводилось с использованием методики, представленной в [32].

Исследование мемристорного эффекта полученных ОНС титана проводилось путем измерения вольтамперных характеристик на зондовой нанолаборатории Ntegra с помощью кантилеверов марки NSG10/Pt в режиме АСМ-спектроскопии при приложении треугольных импульсов напряжения амплитудой от ± 3 до ± 10 В при относительной влажности воздуха 30 ± 1 % (рис. 4,в).

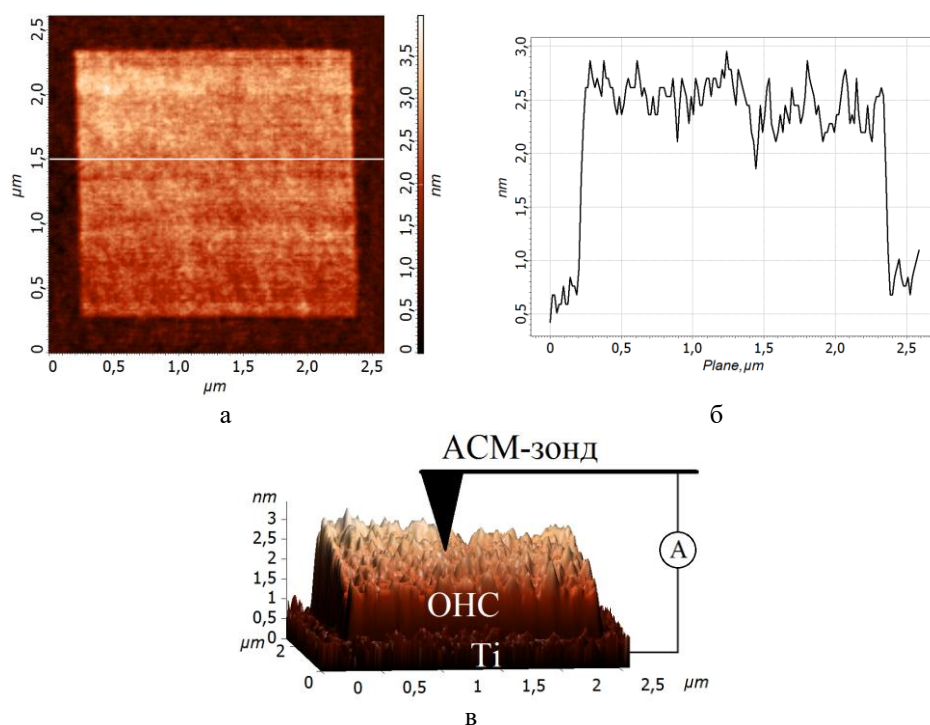


Рис. 4. АСМ-изображение оксидной наноразмерной структуры титана, полученной методом локального анодного окисления: а – топография, б – профилограмма вдоль линии, в – схема измерения вольтамперных характеристик

В результате проведения локального анодного окисления тонкой пленки титана были получены оксидные наноразмерные структуры, АСМ-изображение одной из которых представлено на рис. 4,а. Анализ показал, что при увеличении амплитуды импульсов напряжения от 6 до 9 В происходит увеличение толщины оксида от $4,5 \pm 0,7$ до $7,9 \pm 0,3$ нм, что связано увеличением скорости генерации и возрастанием дрейфового потока ионов кислорода вследствие увеличения напряженности электрического поля в системе зонд-подложка [32].

Анализ вольтамперных характеристик, представленных на рис. 5 показал, что ОНС титана, полученные методом ЛАО, проявляют мемристорный эффект и переключаются между состояниями HRS и LRS без проведения дополнительной электроформовки. При приложении напряжения U_{res} ОНС титана находится в состоянии HRS, которое сохраняется до тех пор, пока не будет приложено напряжение U_{set} , после чего наблюдается увеличение протекающего тока и ОНС титана переключается в состояние LRS. Переключение ОНС титана в состояние HRS происходит при приложении напряжения U_{res} .

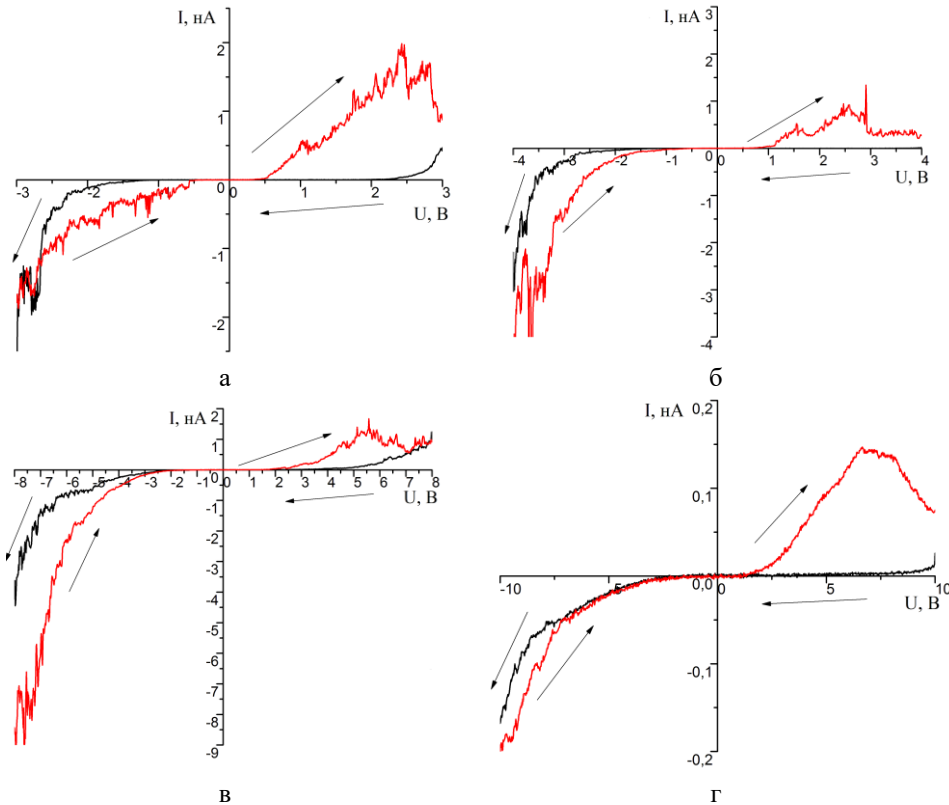


Рис. 5. Вольтамперные характеристики ОНС титана различной толщины: а – $4,5 \pm 0,7$ нм; б – $5,7 \pm 0,5$ нм; в – $6,8 \pm 0,3$ нм; г – $7,9 \pm 0,3$ нм (на вкладке: импульс приложенного напряжения)

Анализ рис. 5 показал, что ЛАО позволяет контролируемо формировать мемристорные структуры с напряжениями переключения в широком диапазоне значений, в частности при уменьшении толщины ОНС титана от $7,9 \pm 0,3$ до $4,5 \pm 0,7$ нм происходит увеличение протекающего через ОНС тока I_{res} , соответствующего состоянию LRS, от 0,17 до 1,79 нА, и уменьшение напряжения U_{res} , от 7,26 до 2,49 В, а также увеличение протекающего через ОНС тока I_{set} , соответствующего состоянию HRS, от 0,15 до 1,61 нА, и уменьшение напряжения U_{set} , от 9,72 до 2,67 В (рис. 6).

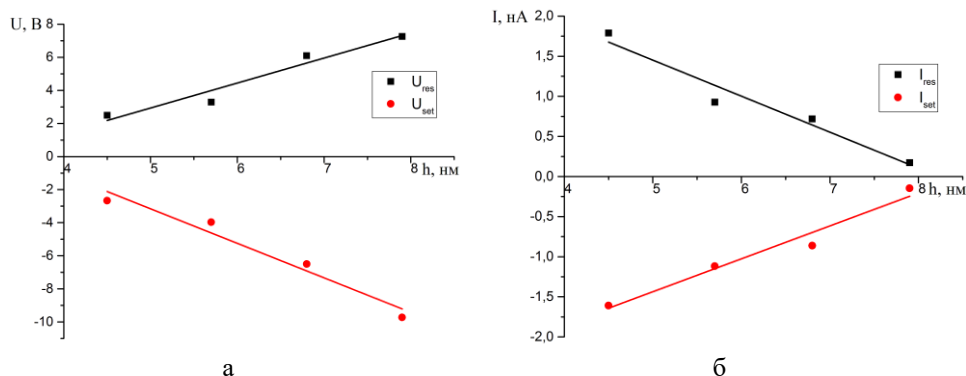


Рис. 6. Зависимости параметров мемристорного эффекта от толщины ОНС титана, полученных методом ЛАО: а – напряжения; б – тока

Данные, полученные из представленных вольтамперных характеристик (рис. 5), позволили оценить сопротивления ОНС титана в состояниях LRS и HRS при напряжении 2 В и отношения этих сопротивлений (рис. 7). Анализ показал, что при уменьшении толщины оксида от $7,9 \pm 0,3$ до $4,5 \pm 0,7$ нм наблюдается уменьшение сопротивления ОНС в состоянии HRS от $2,8 \times 10^{12}$ до $3,4 \times 10^{11}$ Ом и в состоянии LRS от $2,6 \times 10^{11}$ до $1,4 \times 10^9$ Ом. При этом отношение сопротивлений оксидных наноразмерных структур в состояниях HRS и LRS увеличивается от 10,7 до 250, что может быть связано с влиянием длины элемента на его сопротивление.

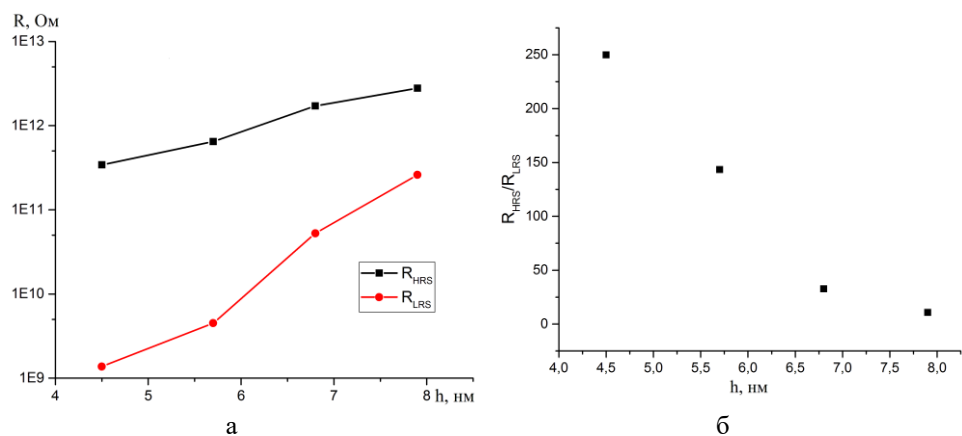


Рис. 7. Зависимости параметров мемристорного эффекта от толщины ОНС титана: а – сопротивлений; б – отношение сопротивлений

Основным механизмом резистивного переключения в мемристорных структурах на основе TiO_2 является перераспределение кислородных вакансий в оксиде, что приводит к формированию каналов проводимости, соединяющих верхний и нижний электрод [37–40]. Возникновение мемристорного эффекта в ОНС титана, полученного методом ЛАО также можно объяснить с точки зрения данной гипотезы.

В процессе окисления подложки под действием внешнего электрического поля ионы кислорода из атмосферы накапливаются на поверхности оксида, после чего дрейфуют через оксид к поверхности пленки титана. Поскольку коэффициент диффузии в оксиде намного меньше коэффициента диффузии в воздухе, в припо-

верхностном слое оксида вблизи АСМ-зонда происходит накопление ионов кислорода и окисление титана до фазы TiO_2 , в то время как малое число ионов кислорода достигает поверхности окисляемого металла, что в результате неполного окисления приводит к образованию кислородных вакансий вблизи пленки титана. Сразу после ЛАО ОНС титана находится в состоянии HRS, поскольку положительно заряженные кислородные вакансии, способные захватывать электроны, локализованы только вблизи поверхности границы раздела пленки титана и ОНС.

При приложении импульса напряжения U_{set} по всей толщине ОНС происходит генерация пар ион-вакансия во внешнем электрическом поле во всем объеме оксида. В результате ионы кислорода локализуются вблизи АСМ-зонда, а концентрация кислородных вакансий в оксиде возрастает, что приводит к формированию канала проводимости и переключению ОНС в состояние LRS.

Затем, при приложении напряжения U_{res} происходит дрейф ионов кислорода от АСМ-зонда к пленке титана, где они могут рекомбинировать с кислородными вакансиями, в результате чего канал проводимости на основе кислородных вакансий разрушается и ОНС титана переключается в исходное состояние HRS.

Заключение. В результате проведенной работы была разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать геометрические параметры ОНС титана, полученной методом ЛАО. В результате проведенных экспериментальных исследований оксидных наноразмерных структур титана различной толщины, полученных методом ЛАО, установлено, что полученные структуры проявляют мемристорный эффект без проведения дополнительной операции электроформовки. Показана возможность контролируемого формирования мемристорных структур с напряжениями переключения менее 3 В. Выявлено, что уменьшение толщины ОНС приводит к увеличению I_{res} и I_{set} , а также уменьшению напряжения U_{res} и U_{set} . Так же было установлено, что увеличение толщины оксида $4,5 \pm 0,7$ до $7,9 \pm 0,3$ нм приводит к снижению отношения сопротивлений структуры в состояниях HRS и LRS от 250 до 10,7.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке конструкции и технологических процессов изготовления мемристорных структур элементов резистивной памяти на основе оксидных наноразмерных структур для систем искусственного интеллекта и синаптроники.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект № МК-2721.2018.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-37-00299). Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ting-Chang Chang, Kuan-Chang Chang, Tsung-Ming Tsai, Tian-Jian Chu and Simon M. Sze* Resistance random access memory // *Materials Today*. – 2016. – Vol. 19, No. 5. – P. 254-264.
2. *Cong Ye, JiajiWu, Gang He, Jieqiong Zhang, Tengfei Deng, Pin He, HaoWang*. Physical Mechanism and Performance Factors of Metal Oxide Based Resistive Switching Memory: A Review // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2016. – Vol. 32. – P. 1-11.
3. *An Chen* A review of emerging non-volatile memory (NVM) technologies and Applications // *Solid-State Electronics*. – 2016. – Vol. 125. – P. 25-38.
4. *Pan F., Gao S., Chen C., Song C., Zeng F.* Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance // *Materials Science and Engineering*. R 83 (2014). – P. 1-59.
5. *Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomyitsev A.S., 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. – T. 894. – P. 355-359.

6. *Sieu D. Ha, Ramanathan S.* Adaptive oxide electronics: A review // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110, 071101. – P. 1-20.
7. *Linggang Zhu, Jian Zhou, Zhonglu Guo, Zhimei Sun.* An overview of materials issues in resistive random access memory // *J. Materiomics*. – 2015. – No. 1. – P. 285-295.
8. *Szot K., Rogala M., Speier W., Klusek Z., and al.* TiO_2 – a prototypical memristive material // *Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 22. – P. 21.
9. *Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А.* Мемристорный эффект на пучках вертикально ориентированных углеродных нанотрубок при исследовании методом сканирующей туннельной микроскопии // *Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 83, № 12. – С. 128-133.
10. *Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А.* Исследование резистивного переключения вертикально ориентированной углеродной нанотрубки методами сканирующей зондовой микроскопии // *Физика твердого тела*. – 2015. – Т. 57, № 4. – С. 807-813.
11. *Агеев О.А., Золотарев Д.В., Климин В.С., Чередниченко Д.И.* Изучение закономерностей роста углеродных нанотрубок при плазменно-химическом осаждении из газовой фазы // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 61-68.
12. *Климин В.С., Еськов А.В., Петров Н.Н.* Исследование влияния режимов плазмохимического травления поверхности арсенида галлия в плазме $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 9 (170). – С. 6-14.
13. *Ильин О.И., Климин В.С., Нада М.З., Петров В.В., Рудык Н.Н., Федотов А.А., Чинь В.М., Яненко В.Ю.* Исследование газочувствительных свойств пленок нанокмозитов с углеродными нанотрубками // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 9 (170). – С. 116-136.
14. *Климин В.С.* Исследование влияния режимов профилирования поверхности структур на основе арсенида галлия методом плазмохимического травления с учетом потока хлоросодержащего газа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 4 (189). – С. 169-178.
15. *Avilov V.I., Polupanov N.V., Tominov R.V., Smirnov V.A., Ageev O.A.* Scanning probe nanolithography of resistive memory element based on titanium oxide memristor structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 256. – P. 012001.
16. *Смирнов В.А.* Зондовые нанотехнологии элементов резистивной памяти на основе мемристорных структур // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 4 (189). – С. 158-169.
17. *Авилов В.И., Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А., Солодовник М.С., Цуканова О.Г.* Исследование фазового состава наноразмерных структур, полученных локальным анодным окислением пленок титана // *Физика и техника полупроводников*. – 2016. – Т. 50, № 5. – С. 612-618.
18. *Авилов В.И., Агеев О.А., Смирнов В.А. и др.* Формирование и исследование матрицы мемристоров на основе оксида титана методами зондовой нанотехнологии // *Известия вузов. Электроника*. – 2014. – № 2 (106). – С. 50-57.
19. *Pablo F. Siles, B.S. Archanjo, D.L. Baptista, V.L. Pimentel, J. Joshua et al.* Nanoscale lateral switchable rectifiers fabricated by local anodic oxidation // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110, No. 2, 024511. – P. 4.
20. *Смирнов В.А., Агеев О.А.* Нанолитография методом локального анодного окисления полупроводников и металлов // *Известия ТРТУ*. – 2005. – № 9 (53). – С. 61.
21. *Агеев О.А., Поляков В.В., Смирнов В.А., Коломийцев А.С.* Исследование влияния режимов фотонной стимуляции на процессы нанолитографии методом локального анодного окисления // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2006. – № 9-1 (64). – С. 117.
22. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А. и др.* Исследование режимов фотонностимулированной зондовой нанолитографии методом локального анодного окисления пленки титана // *Нано- и микросистемная техника*. – 2008. – № 1(90). – С. 14-16.
23. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А. и др.* Зондовая фотонно-стимулированная нанолитография структур на основе пленки титана // *Микроэлектроника*. – 2007. – Т. 36, № 6. – С. 403-408.
24. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И.* Модификация зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – № 4. – С. 4-8.

25. *Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С., Громов А.Л.* Применение метода фокусированных ионных пучков для модификации зондовых датчиков атомно-силовых микроскопов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 166-171.
26. *Быков А.В., Коломийцев А.С., Полякова В.В., Смирнов В.А.* Профилирование зондов для сканирующей зондовой нанодиагностики методом фокусированных ионных пучков // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С. 133-140.
27. *Смирнов В.А.* Применение зондовой нанолитографии для формирования элементов нанoeлектроники методом локального анодного окисления пленки титана // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С. 15-24.
28. *Смирнов В.А.* Нанолитография элементов нанoeлектроники на основе оксида титана // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2016. – № 10 (183). – С. 27-40.
29. *Smirnov V.A.* Nanolithography by local anodic oxidation of thin titanium film // In book: *Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications.* – 2015. – P. 85-103.
30. *Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Smirnov V.A., Kots I.N., Vykov A.V.* Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam // *Microelectronics Reliability.* – 2015. – Vol. 55, No. 9-10. – P. 2131-2134.
31. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А. и др.* Фотоактивация процессов формирования наноструктур методом локального анодного окисления пленки титана // *Известия вузов. Электроника.* – 2010. – № 2 (82). – С. 23-30.
32. *Авилов В.И., Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Коноплев Б.Г., Поляков В.В., Смирнов В.А., Цуканова О.Г.* Моделирование процесса формирования оксидных наноразмерных структур методом локального анодного окисления поверхности металла // *Журнал технической физики.* – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 88-93.
33. *Агеев О.А., Солодовник М.С., Смирнов В.А. и др.* Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 8-13.
34. *Агеев О.А., Солодовник М.С., Смирнов В.А. и др.* Исследование режимов формирования оксидных наноразмерных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // *Известия вузов. Электроника.* – 2012. – № 2 (94). – С. 43-50.
35. *Авилов В.И., Агеев О.А., Смирнов В.А., Солодовник М.С., Цуканова О.Г.* Исследование режимов наноразмерного профилирования поверхности эпитаксиальных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // *Российские нанотехнологии.* – 2015. – Т. 10, № 3-4. – С. 42-46.
36. *Смирнов В.А., Авилов В.И., Саубанова Л.Р., Солодовник М.С., Полякова В.В., Цуканова О.Г., Краснобородько С.Ю.* Профилирование эпитаксиальных слоев арсенида галлия методом локального анодного окисления // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 9 (170). – С. 84-93.
37. *Choi B.J., Jeong D.S., Kim S.K., Rohde C., Choi S.* Resistive switching mechanism of TiO₂ thin films grown by atomic-layer deposition // *Journal of Applied Physics.* – 2005. – Vol. 98, 033715. – P. 1-10.
38. *Omura Yasuhisa, Kondo Yusuke.* Impact-ionization-based resistive transition model for thin TiO₂ films // *Journal of Applied Physics.* – 2013. – Vol. 114, No. 4. – P. 6.
39. *Jeong D.S., Schroeder H., Waser R.* Mechanism for bipolar switching in a Pt/TiO₂/Pt resistive switching cell // *Physical Review B.* – 2009. – Vol. 79, 195317. – P. 1-10.
40. *Bersuker G., Gilmer D.C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L.* Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties // *Journal of Applied Physics.* – 2011. – Vol. 110, 124518. – P. 1-12.

REFERENCES

1. *Ting-Chang Chang, Kuan-Chang Chang, Tsung-Ming Tsai, Tian-Jian Chu and Simon M. Sze* Resistance random access memory, *Materials Today*, 2016, Vol. 19, No. 5, pp. 254-264.
2. *Cong Ye, JiayiWu, Gang He, Jieqiong Zhang, Tengfei Deng, Pin He, HaoWang.* Physical Mechanism and Performance Factors of Metal Oxide Based Resistive Switching Memory: A Review, *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, Vol. 32, pp. 1–11.
3. *An Chen* A review of emerging non-volatile memory (NVM) technologies and Applications, *Solid-State Electronics*, 2016, Vol. 125, pp. 25-38.

4. Pan F., Gao S., Chen C., Song C., Zeng F. Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance, *Materials Science and Engineering*, R 83 (2014), pp. 1-59.
5. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomyitsev A.S., 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, T. 894, pp. 355-359.
6. Sieu D. Ha, Ramanathan S. Adaptive oxide electronics: A review, *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 110, 071101, pp. 1-20.
7. Linggang Zhu, Jian Zhou, Zhonglu Guo, Zhimei Sun. An overview of materials issues in resistive random access memory, *J. Materiomics*, 2015, No. 1, pp. 285-295.
8. Szot K., Rogala M., Speier W., Klusek Z., and al. TiO₂ – a prototypical memristive material, *Nanotechnology*, 2011, Vol. 22, pp. 21.
9. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'in O.I., Kolomyitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Memristornyy effekt na puchkakh vertikal'no orientirovannykh ugleodnykh nanotrubok pri issledovanii metodom skaniruyushchey tunnel'noy mikroskopii [Memristor effect on beams of vertically oriented carbon nanotubes in the study by scanning tunneling microscopy], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2013, Vol. 83, No. 12, pp. 128-133.
10. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'in O.I., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Issledovanie rezistivnogo pereklyucheniya vertikal'no orientirovannoy ugleodnoy nanotrubki metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Investigation of the resistive switching of a vertically oriented carbon nanotube by the methods of scanning probe microscopy], *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid body], 2015, Vol. 57, No. 4, pp. 807-813.
11. Ageev O.A., Zolotarev D.V., Klimin V.S., Cherednichenko D.I. Izuchenie zakonornostey rosta ugleodnykh nanotrubok pri plazmenno-khimicheskom osazhdenii iz gazovoy fazy [Study of the growth patterns of carbon nanotubes in plasma-chemical deposition from the gas phase], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 61-68.
12. Klimin V.S., Es'kov A.V., Petrov N.N. Issledovanie vliyaniya rezhimov plazmokhimicheskogo travleniya poverkhnosti arsenida galliya v plazme BCl₃/Ar/SF₆ [Research of influence of modes of plasma-chemical etching of the surface of the gallium arsenide in the plasma of a BCl₃/Ar/SF₆], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 6-14.
13. Il'in O.I., Klimin V.S., Nadda M.Z., Petrov V.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Chin' V.M., Yanenko V.Yu. Issledovanie gazochuvstvitel'nykh svoystv plenok nanokompozitov s ugleodnymi nanotrubkami [Investigation of gas-sensitive properties of nanocomposite films with carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 116-136.
14. Klimin V.S. Issledovanie vliyaniya rezhimov profilirovaniya poverkhnosti struktur na osnove arsenida galliya metodom plazmokhimicheskogo travleniya s uchetom potoka khlorosoderzhashchego gaza [Investigation of the influence of surface profiling modes of structures based on gallium arsenide by plasma chemical etching taking into account the flow of chlorine-containing gas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 169-178.
15. Avilov V.I., Polupanov N.V., Tominov R.V., Smirnov V.A., Ageev O.A. Scanning probe nanolithography of resistive memory element based on titanium oxide memristor structures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 256, pp. 012001.
16. Smirnov V.A. Zondovye nanotekhnologii elementov rezistivnoy pamyati na osnove memristornykh struktur [Probe nanotechnology of elements of resistive memory based on memristor structures], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 158-169.
17. Avilov V.I., Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Tsukanova O.G. Issledovanie fazovogo sostava nanorazmernykh struktur, poluchennykh lokal'nym anod'nym okisleniem plenok titana [Study of phase composition of nanosized structures, obtained by local anodic oxidation of titanium films], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technicals of semiconductors], 2016, Vol. 50, No. 5, pp. 612-618.

18. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. *i dr.* Formirovanie i issledovanie matritsy memristorov na osnove oksida titana metodami zondovoy nanotekhnologii [Formation and study of memristor matrix based on titanium oxide by methods of probe nanotechnology], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2014, No. 2 (106), pp. 50-57.
19. Pablo F. Siles, B.S. Archanjo, D.L. Baptista, V.L. Pimentel, J. Joshua *et al.* Nanoscale lateral switchable rectifiers fabricated by local anodic oxidation, *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 110, No. 2, 024511, pp. 4.
20. Smirnov V.A., Ageev O.A. Nanolitografiya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya poluprovodnikov i metallov [Nanolithography by local anodic oxidation of semiconductors and metals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2005, No. 9 (53), pp. 61.
21. Ageev O.A., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S. Issledovanie vliyaniya rezhimov fotonnoy stimulyatsii na protsessy nanolitografii metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Study of the effect of photon stimulation on the processes nanolithography by local anodic oxidation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2006, No. 9-1 (64), pp. 117.
22. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. *i dr.* Issledovanie rezhimov fotonnostimulirovannoy zondovoy nanolitografii metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [Investigation of the modes of photonstimulated probe nanolithography by local anodic oxidation of titanium film], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2008, No. 1(90), pp. 14-16.
23. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. *i dr.* Zondovaya fotonno-stimulirovannaya nanolitografiya struktur na osnove plenki titana [Probe photon-stimulated nanolithography of structures based on titanium film], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2007, Vol. 36, No. 6, pp. 403-408.
24. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Il'in O.I. Modifikatsiya zondovykh datchikov-kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probe sensors-cantilevers for atomic force microscopy by the method of focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technique], 2011, No. 4, pp. 4-8.
25. Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Gromov A.L. Primenenie metoda fokusirovannykh ionnykh puchkov dlya modifikatsii zondovykh datchikov atomno-silovyykh mikroskopov [The application of the method of focused ion beams for the modification of the probe of an atomic-force microscope], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 166-171.
26. Bykov A.V., Kolomiitsev A.S., Polyakova V.V., Smirnov V.A. Profilirovanie zondov dlya skaniruyushchey zondovoy nanodiagnostiki metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Profiling probes for scanning probe nanodiagnostics using focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 133-140.
27. Smirnov V.A. Primenenie zondovoy nanolitografii dlya formirovaniya elementov nanoelektroniki metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [The application of scanning probe nanolithography for the formation of the elements of nanoelectronics with the method of local anodic oxidation film of titanium], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 15-24.
28. Smirnov V.A. Nanolitografiya elementov nanoelektroniki na osnove oksida titana [Nanolithography nanoelectronics elements on the basis of titanium dioxide], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10 (183), pp. 27-40.
29. Smirnov V.A. Nanolithography by local anodic oxidation of thin titanium film, *In book: Piezoelectrics and Nanomaterials: Fundamentals, Developments and Applications*, 2015, pp. 85-103.
30. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Smirnov V.A., Kots I.N., Bykov A.V. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam, *Microelectronics Reliability*, 2015, Vol. 55, No. 9-10, pp. 2131-2134.
31. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. *i dr.* Fotoaktivatsiya protsessov formirovaniya nanostruktur metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [The photo-activation of processes of formation of nanostructures by local anodic oxidation film of titanium], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2010, No. 2 (82), pp. 23-30.

32. Avilov V.I., Ageev O.A., Blinov Yu.F., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Modelirovanie protsessa formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya poverkhnosti metalla [Modeling of formation of oxide nanoscale structures by local anodic oxidation of metal surface], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2015, Vol. 85, No. 5, pp. 88-93.
33. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov lokal'nogo anodnogo okisleniya epitaksial'nykh struktur arsenida galliya [The study of the local anodic oxidation of epitaxial structures of gallium arsenide], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 8-13.
34. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Study of modes of formation of oxide nanoscale structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
35. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Tsukanova O.G. Issledovanie rezhimov nanorazmernogo profilirovaniya poverkhnosti epitaksial'nykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Study of nanoscale surface profiling modes of gallium arsenide epitaxial structures by local anodic oxidation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 42-46.
36. Smirnov V.A., Avilov V.I., Saubanova L.R., Solodovnik M.S., Polyakova V.V., Tsukanova O.G., Krasnoborod'ko S.Yu. Profilirovanie epitaksial'nykh sloev arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Profiling of epitaxial layers of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 84-93.
37. Choi B.J., Jeong D.S., Kim S.K., Rohde C., Choi S. Resistive switching mechanism of TiO₂ thin films grown by atomic-layer deposition, *Journal of Applied Physics*, 2005, Vol. 98, 033715, pp. 1-10.
38. Omura Yasuhisa, Kondo Yusuke. Impact-ionization-based resistive transition model for thin TiO₂ films, *Journal of Applied Physics*, 2013, Vol. 114, No. 4, pp. 6.
39. Jeong D.S., Schroeder H., Waser R. Mechanism for bipolar switching in a Pt/TiO₂/Pt resistive switching cell, *Physical Review B*, 2009, Vol. 79, 195317, pp. 1-10.
40. Bersuker G., Gilmer D.C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L. Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties, *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 110, 124518, pp. 1-12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Г. Червяков.

Авилов Вадим Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: avilovvi@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е»; тел.: +78634371611; ассистент; к.т.н.

Смирнов Владимир Александрович – e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; тел.: +78634371629; зав. кафедрой РТЭ; к.т.н.

Шарапов Никита Алексеевич – e-mail: sharapovna@sfedu.ru; тел.: +78634371611; студент гр. ЭПб01-5; к.т.н.

Avilov Vadim Igorevich – Southern Federal University; e-mail: avilovvi@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, building “E”, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; assistant.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; phone: +78634371629; head of department; cand. of eng. sc.

Sharapov Nikita Alekseevich – e-mail: sharapovna@sfedu.ru; student; cand. of eng. sc.