

№ 4 (189)

Раздел III. Нанотехнологии

УДК 621.38-022.532

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-158-169

В.А. Смирнов

ЗОНДОВЫЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ МЕМРИСТОРНЫХ СТРУКТУР*

Представлены результаты разработки технологического процесса формирования элемента резистивной памяти на основе мемристорных структур методами зондовых нанотехнологий на поверхности тонкой пленки титана. Для этого актуальным решением является использование новых процессов профилирования поверхности подложки на основе силовой зондовой нанолитографии и технологии локального анодного окисления поверхности тонких пленок металлов. Исследованы режимы наноразмерного профилирования фоторезиста методом силовой зондовой нанолитографии. Показано, что при увеличении времени дубления при одинаковой силе прижима зонда к поверхности образца глубина сформированных ПНС уменьшалась. Получены зависимости геометрических параметров ПНС фоторезиста от силы прижима зонда к поверхности образца при различном времени дубления пленки фоторезиста, а также зависимости ширины полученных ПНС от силы прижима зонда к образцу при различном времени дубления маски. Исследовано влияние основных управляющих параметров процесса ЛАО на геометрические размеры оксидных наноразмерных структур, сформированных на поверхности тонкой пленки титана. Исследовано влияние амплитуды импульсов напряжения при ЛАО на высоту и диаметр ОНС титана. Показано, что при увеличении амплитуды напряжения при ЛАО от 5 до 29 В происходило увеличение высоты ОНС титана от $0,25 \pm 0,1$ до $5,9 \pm 1,1$ нм и диаметра от $101,4 \pm 15,7$ до $205,6 \pm 44,7$ нм, соответственно. Показано, что оксидные наноразмерные структуры титана, сформированные методом ЛАО, обладают мемристорным эффектом, равномерным в пределах структуры макета элемента резистивной памяти. При приложении отрицательного напряжения 5 В, структура переключалась в состояние с "высоким" сопротивлением $1,4 \pm 0,4$ ГОм, а при приложении положительного напряжения 5 В структура переключалась в состояние с "низким" сопротивлением $0,2 \pm 0,1$ ГОм. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники с применением зондовых нанотехнологий.

Нанотехнологии; наноматериалы; нанoeлектроника, RRAM; мемристорные структуры; силовая зондовая нанолитография; локальное анодное окисление; пленка титана; оксидные наноразмерные структуры.

V.A. Smirnov

PROBE NANOTECHNOLOGIES OF RESISTIVE MEMORY ELEMENTS BASED ON MEMRISTOR STRUCTURES

The paper presents the results of the development of the technological process of forming an element of resistive memory based on memristor structures using probe nanotechnology on the surface of a thin titanium film. To do this, the actual solution is the use of new processes for profiling the substrate surface based on the scanning force nanolithography and the technology of local

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-14023 офи_м. Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" ЮФУ.

anodic oxidation of the surface of thin metal films. The regimes of nanoprofilng of photoresist by the force nanolithography method are studied. It is shown that when the tanning time is increased with the same force of the probe pressing against the sample surface, the depth of the formed PNS decreases. Dependences of the geometrical parameters of the PNS photoresist on the force of the probe pressing against the surface of the sample at different tanning times of the photoresist film, as well as the dependence of the width of the obtained PNS on the force of the probe clamping on the sample are obtained for different masking times. The effect of the main control parameters of the LAO process on the geometric dimensions of oxide nanostructures formed on the surface of a thin titanium film is studied. The influence of the amplitude of the voltage pulses in the LAO on the height and diameter of the ONS of titanium is investigated. It is shown that with an increase in the voltage amplitude for LAO from 5 to 29 V, an increase in the height of the ONS of titanium from 0.25 ± 0.1 to 5.9 ± 1.1 nm and a diameter from 101.4 ± 15.7 to 205.6 ± 44.7 nm, respectively. It is shown that oxide titanium nanostructures formed by the LAO method have a memristor effect that is uniform within the structure of the resistive memory element. When a negative voltage of 5 V is applied, the structure is switched to a state with a "high" resistance of 1.4 ± 0.4 G Ω , and when a positive voltage of 5 V is applied, the structure is switched to a state with a "low" resistance of 0.2 ± 0.1 G Ω . The obtained results can be used in the development of technological processes for manufacturing the elemental base of nanoelectronics using probe nanotechnology.

Nanotechnology; nanomaterials, nanoelectronics; RRAM, memristor structures; scanning force nanolithography; local anodic oxidation; titanium film; oxide nanostructures.

Введение. Развитие современной вычислительной техники связано с разработкой новой быстродействующей и энергоэффективной элементной базы нанoeлектроники, к которой относится резистивная память (RRAM) на основе мемристорных структур [1–6]. К основным достоинствам такой памяти можно отнести энергонезависимость, высокое быстродействие, малые размеры ячейки записи информации, а также низкое энергопотребления [3–6].

Создание мемристорных структур для элементов RRAM связано с разработкой и исследованием процессов нанолитографии с высоким пространственным разрешением [6–11]. Анализ существующих литографических методов профилирования поверхности подложки, таких как электронно-лучевой литографии, рентгеновской литографии и ионной литографии, показал, что их применение ограничено. Актуальным решением этой проблемы является использование новых процессов профилирования поверхности подложки на основе зондовой нанолитографии.

Кроме того, уменьшение размеров элементов интегральных микросхем (ИМС) является одной из основных задач микро- и нанoeлектроники. В настоящее время уровень развития технологий требует формирование элементов, имеющих размеры менее 100 нм [12–15]. Из-за предела разрешающей способности методы фотолитографии не могут быть использованы для формирования структур, имеющих столь малые геометрические размеры. Поэтому возникает необходимость в разработке новых технологий, позволяющих изготавливать элементы ИМС в нанометровом масштабе. Одним из перспективных методов формирования наноструктур является силовая зондовая нанолитография (СЗН) с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) [14–19]. Метод СЗН представляет собой модификацию поверхности фоторезиста (ФР) с помощью зонда, при этом в ФР получают профилированные наноразмерные структуры (ПНС), через которые можно осуществлять химическое жидкостное травление (ХЖТ) подложки.

Метод ЛАО также является одним из перспективных методов, позволяющих формировать оксидные наноразмерные структуры на поверхности различных проводящих и полупроводниковых материалов, которые могут быть использованы при разработке элементной базы нанoeлектроники, а также в микро- и наносистемной технике. Основным достоинством ЛАО является высокая разрешающая способность, возможность исследования электрических и топографических характеристик, сформированных наноразмерных структур в реальном времени, а также относительно низкая себестоимость технологического процесса [20–24].

Целью работы является разработка технологии и исследование возможности формирования элемента резистивной памяти с использованием методов зондовых нанотехнологий, выявление влияния режимов силовой нанолитографии на формирование профилированных наноразмерных структур в пленке фоторезиста, а также исследование режимов формирования и мемристорного эффекта оксидных наноразмерных структур титана.

Разработка технологического маршрута. Для изготовления элемента памяти на основе мемристорных структур на подложку Si/SiO₂ наносят тонкую пленку титана толщиной около 60 нм (рис. 1,а,б). Затем сверху этой пленки методом центрифугирования при 3000 об/мин наносят позитивный фоторезист ФП-383, предварительно разбавленный диметилформамидом в пропорции 1:1. Полученная структура сушится в печи при 90 °С в течении 30 минут (рис. 1,в). После этого, методом силовой зондовой нанолитографии на поверхности фоторезиста/диметилформамида формируется шаблон нижних электродов в виде маски (рис. 1,г).

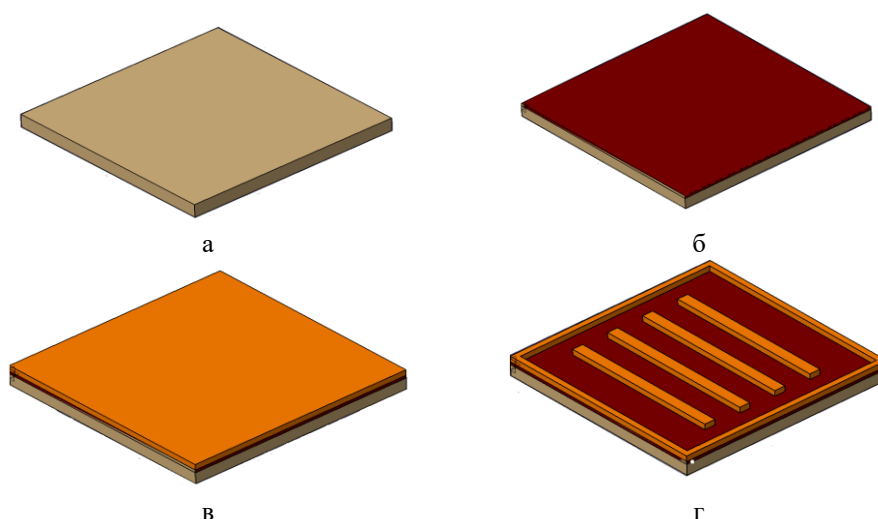


Рис. 1. Схема технологического маршрута формирования элемента RRAM на основе мемристорных структур: а – исходная подложка кремния Si; б – нанесение пленки Ti нижнего электрода; в – нанесение фоторезиста; г – формирование шаблона нижних электродов методом СЗН

После формирования шаблона нижних электродов для дублирования фоторезиста полученную структуру необходимо поместить в печь при температуре 110 °С на 25 минут. Затем методом химического жидкостного травления во вскрытых окнах фоторезиста слой металла нижнего электрода удаляется. При этом, фоторезист маскировал пленку титана от химического травления в тех областях, в которых он не был удален. Травление проводится в растворе плавиковой, азотной кислот и воды в соотношении 1:3:2 в течение 10 с (рис. 2,а). После травления пленки титана структура промывается в диметилформамиде с целью удаления остатков фоторезиста на поверхности титана (рис. 2,б).

Далее на поверхность сформированной структуры нижних электродов снова наносится маска фоторезиста/диметилформамида, как и на предыдущем этапе. Методом силовой зондовой нанолитографии на поверхности фоторезиста/диметилформамида формируется шаблон массива мемристорных структур (рис. 2,г).

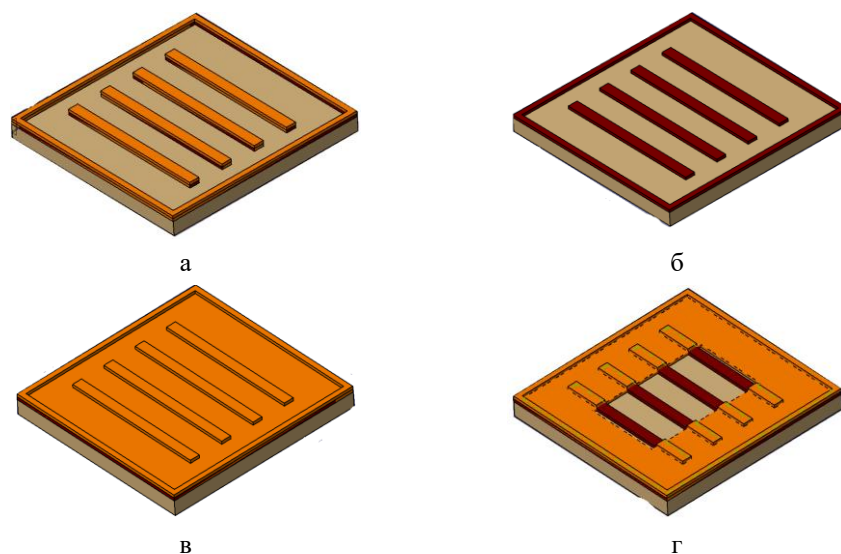


Рис. 2. Схема технологического маршрута формирования элемента RRAM на основе мемристорных структур: а – химическое травление пленки металла; б – удаление фоторезиста; в – нанесение фоторезиста; г – формирование шаблона мемристорных структур методом СЗН

На следующем этапе методом локально-анодного окисления во вскрытом окне фоторезиста формируется окисел титана (рис. 3,а). Затем, после удаления фоторезиста в диметилформамиде (рис. 3,б), на поверхность окисла титана наносится верхний электрод (рис. 3,в).

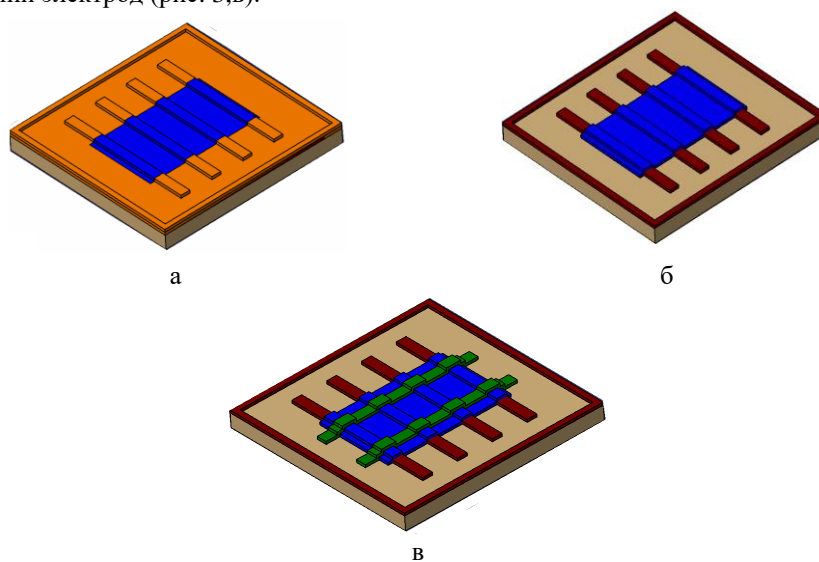


Рис. 3. Схема технологического маршрута формирования элемента RRAM на основе мемристорных структур: а – формирование оксидных наноразмерных структур титана методом локально-анодного окисления; б – удаление фоторезиста; в – напыление верхнего электрода

Исследование режимов наноразмерного профилирования фоторезиста методом силовой зондовой нанолитографии. Для формирования профилированных наноразмерных структур методом СЗН необходимо исследовать режимы нанесения фоторезиста. При исследовании зависимости глубины ПНС от силы прижима зонда к поверхности образца при различном времени дублирования фоторезиста был использован фоторезист ФП-383. Анализ представленных на рис. 4 результатов показал, что при увеличении времени дублирования при одинаковой силе прижима зонда к поверхности образца глубина сформированных ПНС уменьшалась.

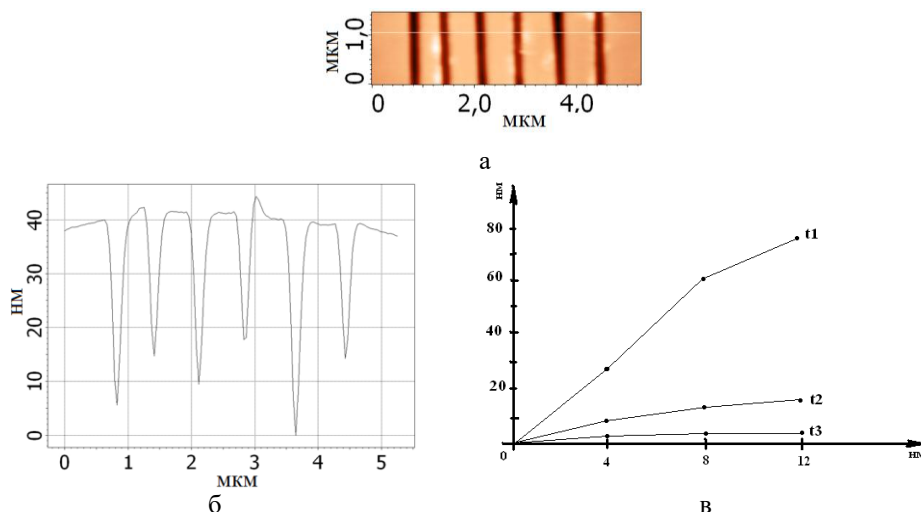


Рис. 4. Исследование влияния силы прижима зонда к поверхности образца на глубину ПНС фоторезиста: а – топология модифицированной поверхности фоторезиста при силе прижима (SetPoint 4 нм); б – профилограмма вдоль линии на (а); в – зависимость глубины ПНС от силы прижима зонда при различном времени дублирования фоторезиста: t_1 – 30 мин., t_2 – 45 мин., t_3 – 60 мин.

Одной из основных проблем процесса силовой зондовой нанолитографии является определение режимов СЗН, при которых сила прижима зонда к поверхности фоторезиста будет достаточной для формирования ПНС с глубиной до нижележащей пленки титана, пробивая зондом маску фоторезиста насквозь. Поэтому, в качестве маски необходимо использовать такой резист, толщина которого при нанесении на подложку составляла не более 150 нм. Для исследования режимов формирования ПНС на поверхности фоторезиста использовалась смесь позитивного фоторезиста ФП-383 с диметилформамидом в соотношении 1:1, которая была нанесена на поверхность подложки кремния методом центрифугирования. Данные структуры сушились в печи при 90°C в течение 5, 10, и 15 мин. Затем методом АСМ проводились измерения ступеньки нанесенного слоя смеси фоторезиста и диметилформамида. В результате было выявлено, что для разных случаев, высота ступеньки составляла от 20 до 150 нм. После этого, на каждом образце проводилась силовая зондовая нанолитография по шаблону из 6 параллельных линий на области $10 \times 10 \text{ мкм}^2$. На рис. 5 представлены АСМ-изображения и профилограммы сформированных ПНС. В результате обработки АСМ-изображений, были получены зависимости геометрических параметров ПНС фоторезиста от силы прижима зонда к поверхности образца (рис. 6,а) при различном времени дублирования пленки фоторезиста, а также зависимости ширины полученных ПНС от силы прижима зонда к образцу при различном времени дублирования маски (рис. 6,б).

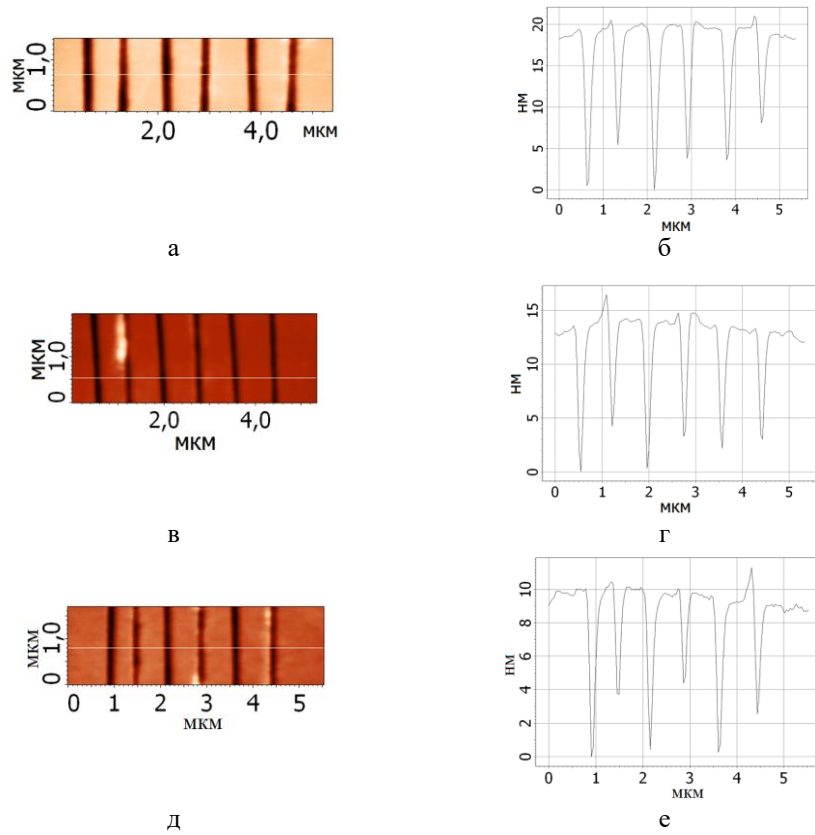


Рис. 5. Исследование режимов формирования ПНС методом СЗН на поверхности пленки фоторезиста, высушенной при температуре 90°C в течение различного времени: а – АСМ-изображение ПНС, полученных при времени сушки 5 мин.; б – профиллограмма вдоль линии на (а); в – АСМ-изображение ПНС, полученных при времени сушки 10 мин.; г – профиллограмма вдоль линии на (в); д – АСМ-изображение ПНС, полученных при времени сушки 15 мин.; е – профиллограмма вдоль линии на (д)

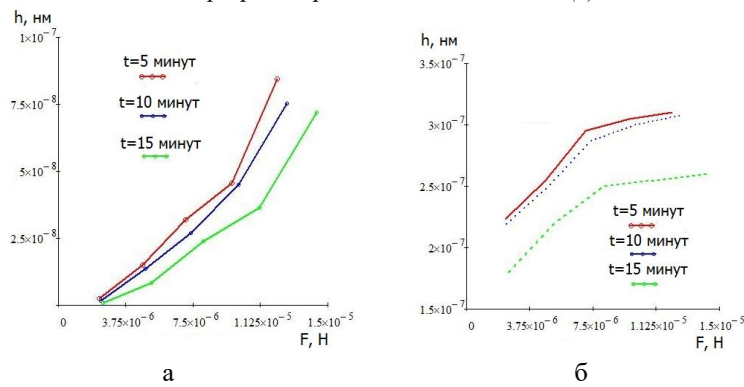


Рис. 6. Экспериментальные результаты исследования режимов формирования ПНС фоторезиста методом СЗН: а – зависимости глубины ПНС фоторезиста от силы прижима зонда к поверхности образца; б – зависимости ширины ПНС фоторезиста от силы прижима зонда к поверхности образца

Исследование режимов локального анодного окисления пленки титана.

Экспериментальные исследования режимов формирования ОНС проводились на тонкой пленке титана, толщиной около 20 нм, полученной на кремниевой полупроводниковой подложке Si/SiO₂ с помощью многофункциональной установки Auto 500 (BOC Edwards, Англия) методом магнетронного распыления. ЛАО на полученной пленке проводилось на зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов NSG11 с проводящим платиновым покрытием путем подачи прямоугольных импульсов напряжения определенной амплитуды и длительности. В результате на поверхности были сформированы массивы ОНС при различных значениях амплитуды приложенного напряжения, а также при различных уровнях влажности воздуха, представленные на рис. 7. Уровень влажности атмосферы внутри технологической камеры во время процесса ЛАО контролировался с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R и составлял 40±1 %. Значения геометрических параметров ОНС (высота и диаметр) определялись путем статистической обработки полученных АСМ-изображений массивов ОНС титана с использованием программного пакета Image Analysis 3.5 по разработанной методике измерений, аттестованной в соответствии с ГОСТ Р 8. 563-96.

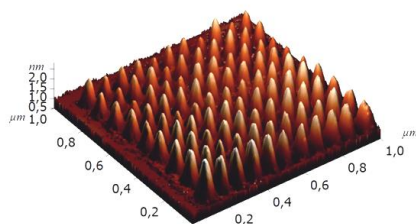


Рис. 7. АСМ-изображение ОНС титана, сформированных методом ЛАО

В результате проведения экспериментальных исследований были сформированы тестовые ОНС титана для выбора рабочего диапазона напряжения. При этом амплитуда импульса приложенного напряжения изменялась от 5 до 29 В, влажности воздуха 90 %, длительность импульса напряжения составляла 100 мс, ток цепи обратной связи составлял 0,5 нА.

В результате проведения экспериментальных исследований были получены зависимости высоты и диаметра тестовых ОНС титана, сформированных в диапазоне амплитуды импульса ЛАО от 5 до 29 В, представленные на рис. 8, при влажности воздуха 90 %, длительности импульса 100 мс, токе цепи обратной связи 0,5 нА. Анализ полученных зависимостей показал, что наибольший рост структур наблюдается в диапазоне до 15 В, при напряжениях свыше 15 В высота и диаметр структур практически не изменяется.

Исследования мемристорного эффекта ОНС титана проводились на воздухе. Нижний электрод подводился к пленке Ti, в качестве верхнего электрода использовался кантилевер марки NSG 20 с проводящим Pt покрытием. Измерение ВАХ проводилось в контактном режиме АСМ-спектроскопии. При приложении напряжения от -5 до 5 В была получена несимметричная ВАХ, представленная на рис. 9.

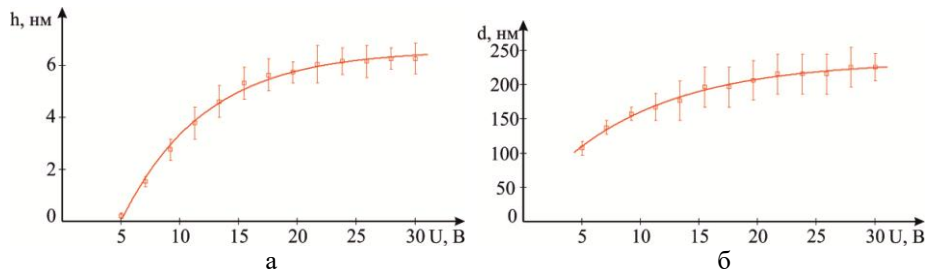


Рис. 8. Зависимости геометрических параметров ОНС титана от амплитуды импульсов напряжения при ЛАО: а – высоты; б – диаметра

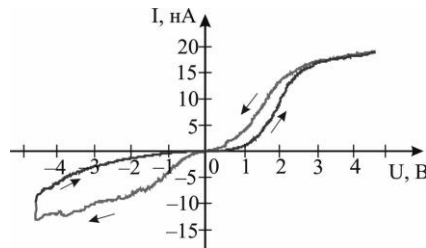


Рис. 9. ВАХ структур Ti/TiO_x/Pt

Анализ представленной на рис. 9 вольтамперной характеристики ОНС титана показал, что при отрицательном напряжении 5 В, ОНС титана переключалась в состояние с “высоким” сопротивлением $1,4 \pm 0,4$ ГОм. Затем при приложении положительного напряжения 5 В ОНС титана переключалась в состояние с “низким” сопротивлением $0,2 \pm 0,1$ ГОм. Возникновение мемристорного эффекта в структуре Ti/TiO_x/Pt может быть связано с механизмом, согласно которого, при приложении внешнего электрического поля дефекты в окисле формируют наноразмерные каналы проводимости, приводящие к переходу оксида из высокоомного в низкоомное состояние.

Заключение. В работе представлены результаты разработки технологического процесса формирования элемента резистивной памяти на основе мемристорных структур методами зондовых нанотехнологий на поверхности тонкой пленки титана. Исследованы режимы наноразмерного профилирования фоторезиста методом силовой зондовой нанолитографии. Показано, что при увеличении времени дублирования при одинаковой силе прижима зонда к поверхности образца глубина сформированных ПНС уменьшалась. Получены зависимости геометрических параметров ПНС фоторезиста от силы прижима зонда к поверхности образца при различном времени дублирования пленки фоторезиста, а также зависимости ширины полученных ПНС от силы прижима зонда к образцу при различном времени дублирования маски. Исследовано влияние основных управляющих параметров процесса ЛАО на геометрические размеры оксидных наноразмерных структур, сформированных на поверхности тонкой пленки титана. Исследовано влияние амплитуды импульсов напряжения при ЛАО на высоту и диаметр ОНС титана. Показано, что при увеличении амплитуды напряжения при ЛАО от 5 до 29 В происходило увеличение высоты ОНС титана от $0,25 \pm 0,1$ до $5,9 \pm 1,1$ нм и диаметра от $101,4 \pm 15,7$ до $205,6 \pm 44,7$ нм, соответственно. Показано, что оксидные наноразмерные структуры титана, сформированные методом ЛАО, обладают мемристорным эффектом, равномерным в пределах структуры макета элемента резистивной памяти. При приложении отрицательного напряжении 5 В, структура переключалась в состояние с

“высоким” сопротивлением $1,4 \pm 0,4$ ГОм, а при приложении положительного напряжения 5 В структура переключалась в состояние с “низким” сопротивлением $0,2 \pm 0,1$ ГОм.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники с применением зондовых нанотехнологий.

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, 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. – P. 1-11.
3. *Strukov D, Snider G, Stewart D*. The missing memristor found // *Nature*. – 2008. – No. 453. – P. 80-83.
4. *Kügeler C, Rosezin R, Linn E*: Materials, technologies, and circuit concepts for nanocrossbar-based bipolar RRAM // *Appl. Phys. A*. – 2011. – Vol. 102. – P. 791-809.
5. *Szot K., Rogala M., Speier W., Klusek Z*. TiO_2 – a prototypical memristive material // *Nanotechnology*. – 2011. – No. 22. – P. 21.
6. *Авилов В.И., Агеев О.А., Смирнов В.А. и др.* Формирование и исследование матрицы мемристоров на основе оксида титана методами зондовой нанотехнологии // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2014. – № 2 (106). – С. 50-57.
7. *Смирнов В.А., Агеев О.А.* Нанолитография методом локального анодного окисления полупроводников и металлов // *Известия ТРТУ*. – 2005. – № 9 (53). – С. 61.
8. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А. и др.* Фотоактивация процессов формирования наноструктур методом локального анодного окисления пленки титана // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2010. – № 2 (82). – С. 23-30.
9. *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 ТРТУ*. – 2006. – № 9-1 (64). – С. 117.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. *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.
17. *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.

18. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiytsev 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. – Vol. 894. – P. 355-359.
19. Смирнов В.А. Нанолитография элементов наноэлектроники на основе оксида титана // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2016. – № 10 (183). – С. 27-40.
20. 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.
21. Ageev O.A., Kolomiytsev 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.
22. Авиллов 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.
23. 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.
24. Авиллов 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.

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, 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, pp. 1-11.
3. Strukov D, Snider G, Stewart D The missing memristor found, *Nature*. 2008, No. 453, pp. 80-83.
4. Kùgeler C, Rosezin R, Linn E: Materials, technologies, and circuit concepts for nanocrossbar-based bipolar RRAM, *Appl. Phys. A*, 2011, 102, pp. 791-809.
5. Szot K., Rogala M., Speier W., Klusek Z. TiO₂ – a prototypical memristive material, *Nanotechnology*, 2011, No. 22, pp. 21.
6. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. *i dr.* Formirovanie i issledovanie matritsy memristorov na osnove oksida titana metodami zondovoy nanotekhnologii [The formation and study of the memristor matrix based on titanium oxide by scanning probe nanotechnology], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2014, No. 2 (106), pp. 50-57.
7. 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 TRTU* [Izvestiya TSURE], 2005, No. 9 (53), pp. 61.
8. 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 vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2010, No. 2 (82), pp. 23-30.
9. Ageev O.A., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Kolomiytsev 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 TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 9-1 (64), pp. 117.
10. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. *i dr.* Issledovanie rezhimov fotonnostimulirovannoy zondovoy nanolitografii metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [The study of modes of potential-based probe nanolithography by local anodic oxidation film of titanium], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2008, No. 1 (90), pp. 14-16.

11. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. i dr. Zondovaya fotonno-stimulirovannaya nanolitografiya struktur na osnove plenki titana [The probe photon-induced nanolithography structures based on films of titanium], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2007, Vol. 36, No. 6, pp. 403-408.
12. Ageev O.A. Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of the modes of formation of nanoscale oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
13. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov lokal'nogo anodnogo okisleniya epitaksial'nykh struktur arsenida galliya [Gallium arsenide epitaxial structures local anodic oxidation regimes investigation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 8-13.
14. 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 the probe-cantilever for atomic force microscopy using focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 4, pp. 4-8.
15. Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Gromov A.L. Primenenie metoda fokusirovannykh ionnykh puchkov dlya modifikatsii zondovykh datchikov atomno-silovykh mikroskopov [Application of focused ion beams for atomic force microscopy probes modification], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 166-171.
16. Bykov A.V., Kolomiitsev A.S., Polyakova V.V., Smirnov V.A. Profilirovanie zondov dlya skaniruyushchey zondovoy nanodiagnostiki metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Profiling of the tips for scanning probe nanodiagnostics using focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 133-140.
17. Smirnov V.A. Primenenie zondovoy nanolitografii dlya formirovaniya elementov nanoelektroniki metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [Application of probe nanolithography for nanoelectronics elements formation by local anodic oxidation of titanium film], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 15-24.
18. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev 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, Vol. 894, pp. 355-359.
19. Smirnov V.A. Nanolitografiya elementov nanoelektroniki na osnove oksida titana [Nanolithography of elements of nanoelectronics based on titanium oxide], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10 (183), pp. 27-40.
20. 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.
21. 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.
22. 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 the process of forming the oxide nano structures by the local anodic oxidation of metal surface], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2015, Vol. 85, No. 5, pp. 88-93.
23. 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 uglerodnoy nanotrubki metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Study the resistive switching of vertically aligned carbon nanotubes using scanning probe microscopy], *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid state], 2015, Vol. 57, No. 4, pp. 807-813.

24. 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 [The study of modes of nanoscale profiling of the surface of epitaxial structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 42-46.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; к.т.н.; доцент;

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 389.159

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-169-178

В.С. Климин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ
МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОТОКА
ХЛОРСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА***

Рассмотрены проблемы профилирования поверхности структур на основе арсенида галлия для последующего эпитаксиального роста. Рассмотрено применения метода плазмохимического травления для решения данной задачи. Проанализированы характерные особенности данной технологии, показано, что плазмохимический метод травления в комбинированной плазме по сравнению с жидкостным травлением для формирования таких структур является более перспективным, благодаря высокой анизотропии процесса и отсутствию необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах. Для экспериментального исследования взаимодействия структур на основе арсенида галлия с комбинированной плазмой использовался цилиндрический проточный плазмохимический реактор, давление смеси плазмообразующих газов составляло 2 Па, которое оставалось постоянным в течении всего процесса. В данной работе проведено исследование влияния потока хлорсодержащего газа на толщину вытравленного слоя, шероховатость вытравленной поверхности, а так же анизотропию процесса по разным кристаллографическим областям. Были получены зависимости толщины вытравленного слоя от времени травления и оценены скорости травления для различных потоков хлорсодержащего газа. Проведен анализ поверхности методом атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии, изучена шероховатость вытравленной поверхности. Показано, что при больших значениях потоков хлорсодержащего газа шероховатость вытравленной области увеличивалась, что связано с большим количеством частиц, отвечающих за образование летучих соединений с продуктами реакций реактивно-ионного травления. Так же было показано, что угол отклонения от вертикали для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 15 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления $[110]$ был $\alpha_{[110]} = 65,5^\circ$; для направления $[111]$ был $\alpha_{[111]} = 45,58^\circ$. Для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10006).