

УДК 621.38-022.532

В.А. Смирнов**ПРИМЕНЕНИЕ ЗОНДОВОЙ НАНОЛИТОГРАФИИ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ
ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ПЛЕНКИ ТИТАНА***

Представлены экспериментальные исследования возможностей формирования оксидных наноразмерных структур на поверхности тонкой пленки титана при проведении локального анодного окисления в векторном и растровом режимах. Представлены результаты формирования макетов структур элементов нанoeлектроники методом локального анодного окисления в векторном и растровом режимах на поверхности тонкой пленки титана. Исследовано влияние режимов работы атомно-силового микроскопа на процесс ЛАО поверхности тонкой пленки титана. Исследовано влияние длительности импульсов напряжения прикладываемого к системе зонд-подложка на геометрические параметры ОНС титана. Показано, что при увеличении длительности импульсов напряжения от 10 до 100 мс происходит увеличение высоты ОНС от $0,58 \pm 0,18$ до $1,37 \pm 0,32$ нм. С использованием растрового метода ЛАО в тонкой пленке титана были получены: макет матрицы из 25 мемристоров, а также макет элемента металлической нанoeлектроники на основе наноразмерного канала проводимости с поперечными размерами около 10 нм. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники с применением зондовых нанотехнологий.

Нанотехнологии; наноматериалы; атомно-силовая микроскопия; локальное анодное окисление; тонкая пленка титана; оксидные наноразмерные структуры; нанолитография.

V.A. Smirnov**APPLICATION OF PROBE NANOLITHOGRAPHY
FOR NANOELECTRONICS ELEMENTS FORMATION BY LOCAL ANODIC
OXIDATION OF TITANIUM FILM**

In this paper, experimental studies of the possibility of forming oxide nanostructures on the surface of a thin film of titanium during local anodic oxidation (LAO) in vector and raster modes. The results of the formation of nanoelectronics elements structures by local anodic oxidation in vector and raster mode on the surface of a thin titanium film. The influence of the modes of operation of an atomic force microscope on the surface of the LAO process of a thin film of titanium. The influence of the duration of the voltage pulses applied to the tip-substrate system for geometrical parameters of the ONS titanium. It is shown that by increasing the voltage pulse duration from 10 to 100 ms is an increase in the height of oxide nanostructures from $0,58 \pm 0,18$ to $1,37 \pm 0,32$ nm. Using raster method of LAO in thin film of titanium were obtained matrix of 25 memristors, and the metal nanoelectronics element based on nanoscale conduction channel with lateral dimensions of about 10 nm. The results obtained can be used to develop technological processes of nanoelectronics element base using probe nanotechnology.

Nanotechnology; nanomaterials; atomic force microscopy; local anodic oxidation; thin titanium film; oxide nanostructures; nanolithography.

Введение. Тенденцией развития нанотехнологии является разработка методов нанолитографии для получения наноразмерных структур, обладающих новыми функциональными возможностями, которые могут быть использованы при разработке элементной базы нанoeлектроники [1–4].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-07-31322 мол_а, а также в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России проекта № 2014/174.

Зондовая нанолитография методом локального анодного окисления (ЛАО) с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) является перспективным методом и позволяет формировать оксидные наноразмерные структуры с высоким пространственным разрешением, а также возможностью *in situ*-диагностики результатов формирования. Методом ЛАО были получены мемристоры с высокой плотностью записи информации, наноструктуры на основе двумерного электронного газа, одноэлектронные транзисторы, квантовые точки, резистивные маски для селективного жидкостного травления и т.д. [1–10].

Формирование ОНС на поверхности подложки методом ЛАО происходит за счет приложения к системе зонд-подложка импульсов напряжения. При этом в образующемся между зондом и подложкой мениске из адсорбированной на поверхности подложки воды протекает электрохимическая реакция, сопровождающаяся процессами электро- и массопереноса ионизированных атомов подложки и гидроксильных групп с образованием оксидов и водорода [1, 2, 6–8]. При повышении относительной влажности происходит увеличение геометрических параметров оксидных наноразмерных структур в сочетании с меньшим временем роста оксида в высоту [5–9]. Также из экспериментальных исследований установлено, что на кинетику процесса ЛАО, кроме параметров импульсов напряжения (длительности, амплитуды) и влажности, влияние оказывают фотонное излучение [5–9]. Имеются сообщения о влиянии амплитуды колебания кантилевера на геометрические параметры ОНС, сформированные методом ЛАО в полуконтактном режиме АСМ [11, 12].

Кроме того, существует два метода проведения ЛАО: векторный и растровый метод нанолитографии. При проведении ЛАО векторным методом, шаблон нанолитографии задается с использованием встроенных в программу управления сканирующим зондовым микроскопом (СЗМ) инструментов и фигур (точек, линий, прямоугольников, окружностей и др.). Особенностью векторного метода являются высокая скорость процесса вследствие того, что при проведении нанолитографии зонд подводится к образцу только в тех точках, которые соответствуют графическим объектам на шаблоне.

При выполнении ЛАО растровым методом, в память компьютера загружается шаблон, в виде изображения в современном растровом формате (например, файл с расширением *.bmp). Затем происходит сканирование поверхности образца, при подаче в каждой точке напряжения, величина которого устанавливается пропорционально полутонам растрового шаблона. Растровая литография проводится медленнее, так как сканирование осуществляется по всей площади участка подложки, на которой выполняется ЛАО.

Целью работы является исследование процесса формирования макетов структур элементов наноэлектроники на основе оксидных наноразмерных структур на поверхности тонкой пленки титана при проведении локального анодного окисления в векторном и растровом режимах.

Методика исследования. При экспериментальном исследовании влияния режимов атомно-силового микроскопа на процесс формирования ОНС титана, нанолитография методом ЛАО проводилась в контактном и полуконтактном режимах АСМ на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 Pro (NT-MDT, Россия). В качестве экспериментального образца использовалась тонкая пленка титана толщиной около 10 нм. Сканирующий зондовый микроскоп помещался в камеру, влажность в которой контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R и составляла 70 ± 1 %.

Затем векторным методом ЛАО, используя программу управления Nova RC1 (1.0.26.1055), поставляемую в комплекте с оборудованием, кантилеверами NSG 11 с проводящим W_2C покрытием, при приложении импульсов напряжения амплитудой 8 В и скорости сканирования 1 мкм/с, формировались оксидные наноразмерные структуры (ОНС), АСМ-изображения которых представлены на рис. 1.

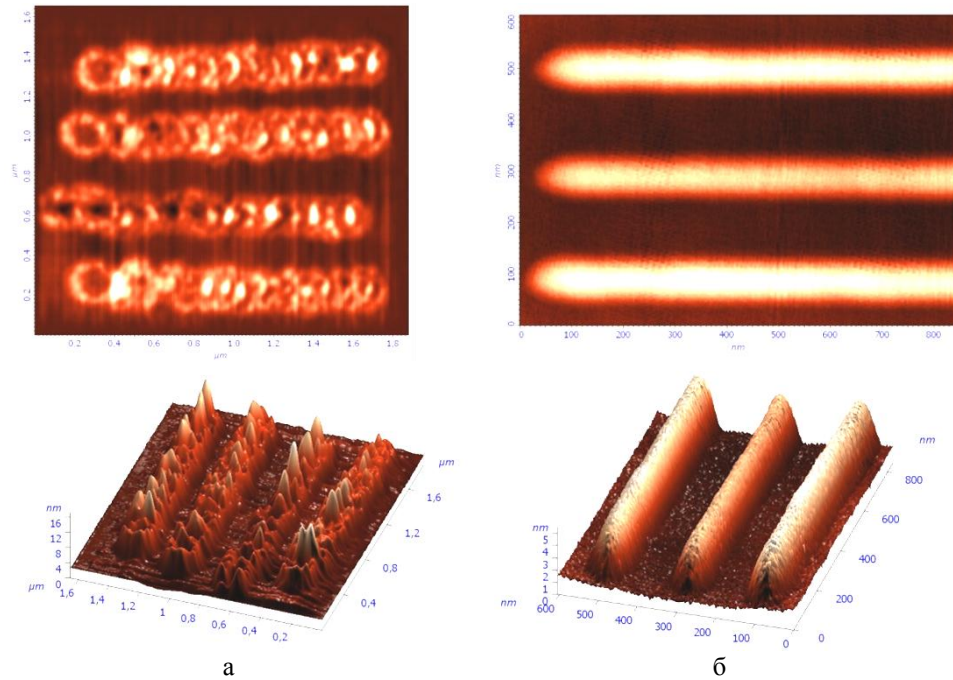


Рис. 1. АСМ-изображение ОНС на поверхности тонкой пленки титана, сформированных векторным методом ЛАО при сканировании в различных режимах АСМ: а – в контактном режиме; б – в полуконтактном режиме

Для формирования макетов структур элементов нанoeлектроники методом ЛАО в векторном режиме на поверхности тонкой пленки титана были сформированы структуры: массив островковых ОНС; массив концентрических окружностей – квантовых колец, массив квантовых точек, а также структура на основе наноразмерных каналов проводимости, которая может выполнять функцию логического вентиля, АСМ-изображения которых представлены на рис. 2, 3.

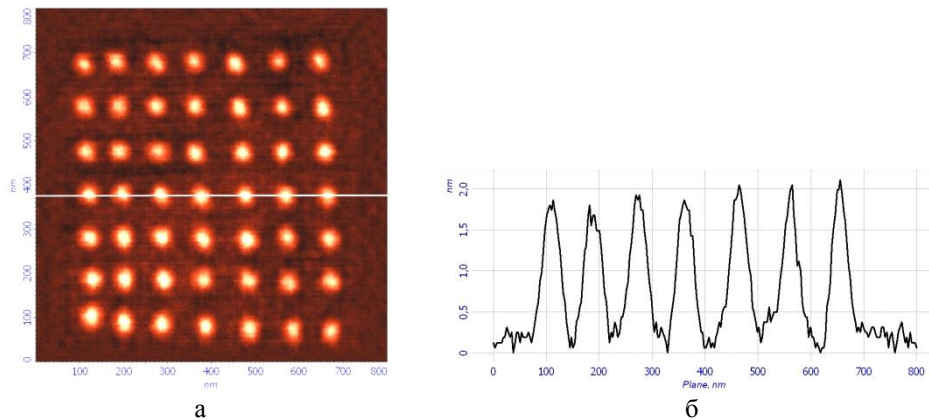


Рис. 2. Оксидные наноразмерные структуры, сформированные на поверхности тонкой пленки титана векторным методом ЛАО: а – АСМ-изображение; б – профилограмма вдоль линии на (а)

Формирование ОНС проводилось с использованием кремниевых кантилевиров марки NSG11 с проводящим W_2C покрытием, при приложении импульсов напряжения амплитудой 10 В, длительностью 100 мс и скорости сканирования 1 мкм/с. Влажность воздуха в технологической камере составляла 70 ± 1 %.

В работе также проводилось исследование влияния длительности импульсов напряжения на геометрические параметры формируемых ОНС титана. На поверхности пленки титана векторным методом ЛАО формировались ОНС (рис. 4) при приложении импульсов напряжения амплитудой 10 В с различной длительностью от 10 до 1000 мс. Относительная влажность составляла 50 ± 1 %, скорость сканирования 1,5 мкм/с, SetPoint = 0,5 нА. Определение значений высоты ОНС проводилось 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 [13]. На рис. 4 представлены АСМ-изображения полученных оксидных наноразмерных структур на поверхности пленки титана, а также зависимость высоты ОНС от длительности импульсов напряжения при ЛАО.

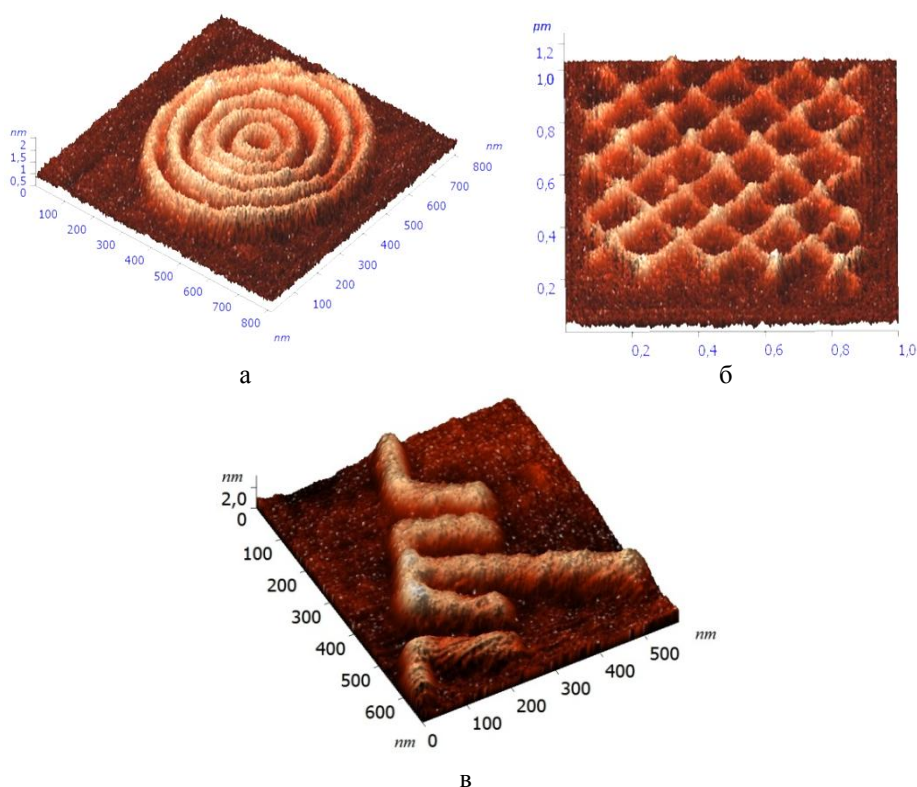


Рис. 3. АСМ-изображение макетов элементов наноэлектроники на основе ОНС, сформированных векторным методом ЛАО в пленке титана: а – массив кольцевых резонаторов; б – массив квантовых точек; в – логический элемент

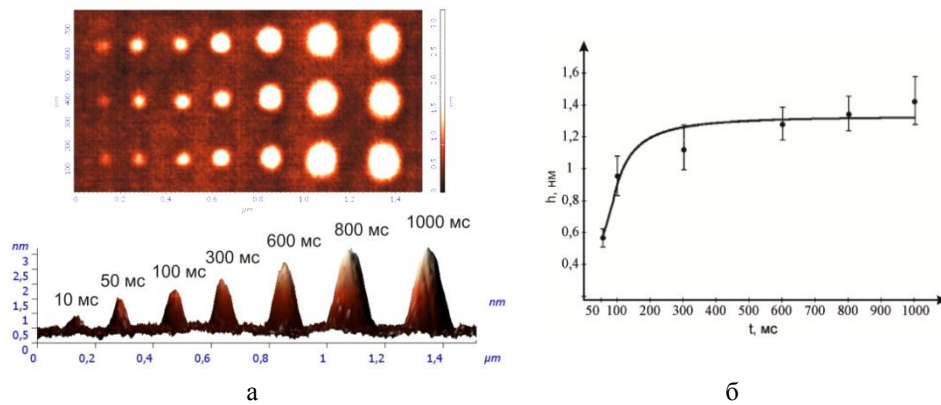


Рис. 4. АСМ-изображение ОНС, сформированных векторным методом ЛАО, при различной длительности импульсов напряжения, подаваемого к системе зонд-подложки (а). Зависимость высоты ОНС от длительности импульсов напряжения при ЛАО (б)

При исследовании возможностей ЛАО в растровом режиме на поверхности тонкой пленки титана были сформированы тестовые объекты в виде массива из 99 островковых ОНС, АСМ-изображения которых представлены на рис. 5. Формирование ОНС проводилось с использованием кремниевых кантилеверов марки NSG11 с проводящим W_2C покрытием, при приложении импульсов напряжения амплитудой 10 В и скорости сканирования 1 мкм/с. Влажность воздуха в технологической камере составляла $70 \pm 1\%$.

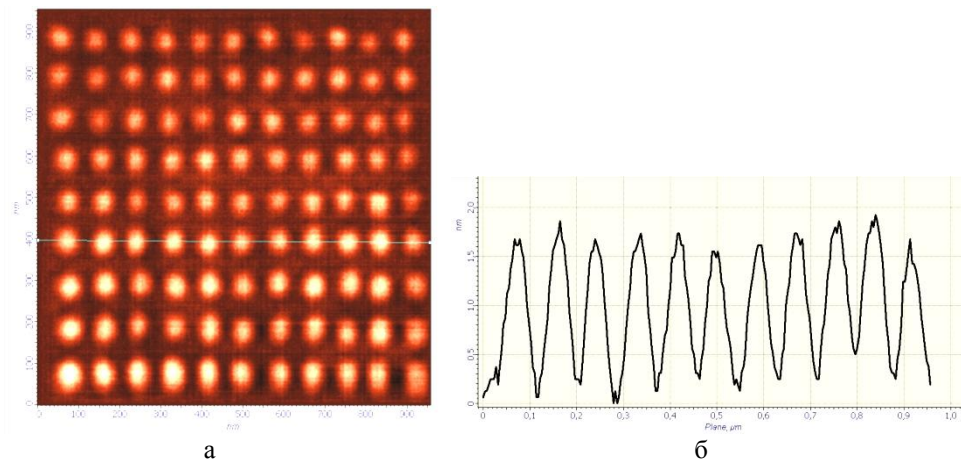


Рис. 5. Оксидные наноразмерные структуры, сформированные на поверхности тонкой пленки титана растровым методом ЛАО: а – АСМ-изображение; б – профилограмма вдоль линии на (а)

Разработка и создание элементов металлической нанoeлектроники основано на использовании наноразмерных каналов проводимости в тонких металлических пленках, которые проявляют квантовые свойства проводимости при комнатной температуре. Для наблюдения эффекта квантования проводимости необходимо, чтобы поперечные размеры канала были менее 30 нм [1–4].

В работе формирование наноразмерных каналов проводилось в тонкой пленке титана в режиме растровой нанолитографии методом ЛАО при подаче импульсов напряжения амплитудой 10 В, скорости сканирования 1 мкм/с, относительной влажности $70 \pm 1\%$ и SetPoint 0,5 нА. На рис. 6 представлены АСМ-изображения полученного макета элемента металлической наноэлектроники на основе наноразмерного канала проводимости.

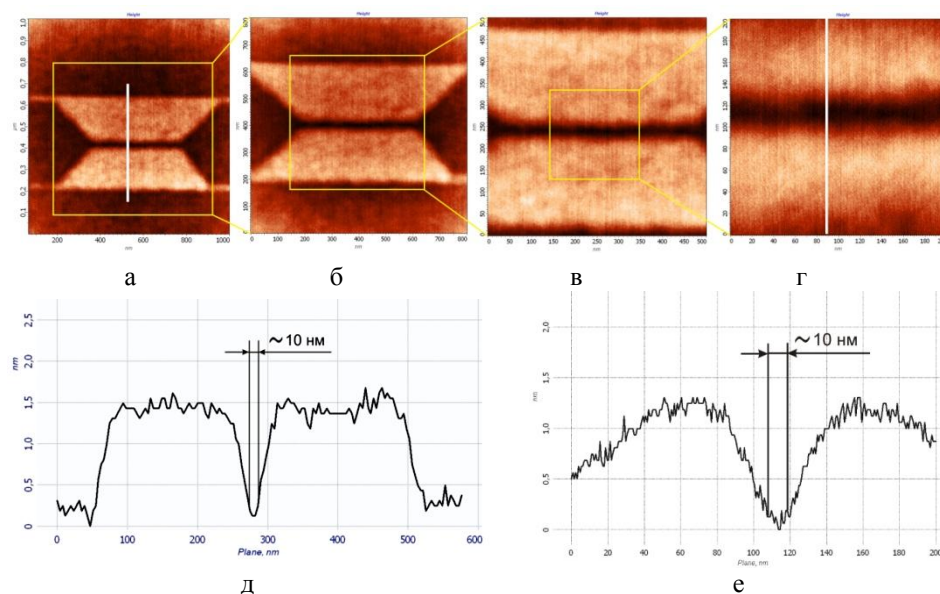


Рис. 6. Формирование макета элемента металлической наноэлектроники на основе наноразмерного канала проводимости в пленке титана методом ЛАО: а-г – АСМ-изображения; д – профилограмма вдоль линии на (а); е – профилограмма вдоль линии на (г)

Применение метода ЛАО может быть использовано для изготовления мемристорных структур, перспективным применением которых является изготовление элементов энергонезависимой резистивной оперативной памяти (RRAM), обладающей высоким быстродействием, малыми размерами ячейки записи информации, а также низким энергопотреблением [8].

Создание мемристорных структур проводилось в пленке титана, толщиной 20 нм, нанесенной на поверхность структуры SiO_2/Si методом магнетронного распыления на многофункциональной установке Auto 500 (BOC Edwards, Англия). Далее, на многофункциональном сверхвысоковакуумном нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 (NT-MDT, Россия) методом фокусированных ионных пучков проводилось травление пленки титана, в результате чего были получены четыре структуры нижних контактов с размерами $0,30 \times 1,89$ мкм. Затем методом ЛАО в полуконтактном режиме АСМ на с использованием кремниевых кантилеверов марки NSG11 с проводящим Pt покрытием, формировались ОНС титана высотой около 6 нм (рис. 7). Локальное анодное окисление структур проводилось на зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) в растровом режиме, при приложении к системе зонд-подложка импульсов отрицательного напряжения амплитудой 10 В, скорости сканирования зонда 4 мкм/с и Set Point = 0,5 нА. Влажность контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R и составляла $40 \pm 1\%$.

На рис. 7 представлено АСМ-изображение экспериментального образца мемристорных структур на основе ОНС титана, сформированных методом ЛАО.

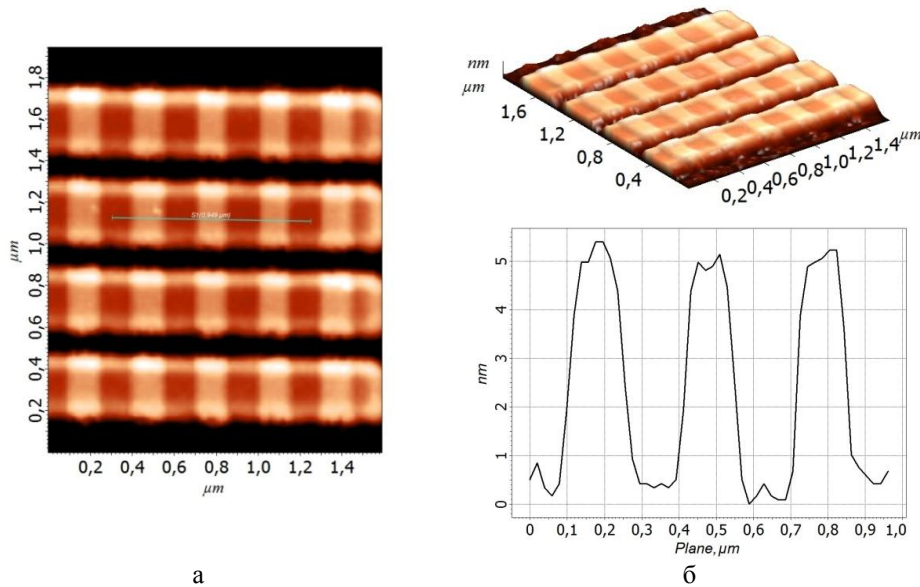


Рис. 7. АСМ-изображение макета матрицы мемристоров на основе ОНС титана, сформированных методом ЛАО: а – 2D; б – 3D и профилограмма вдоль линии на (а)

Результаты и обсуждение. Анализ представленных на рис. 1 изображений показывает, что при одинаковых параметрах ЛАО оксидные наноразмерные структуры, полученные в полуконтактном режиме АСМ (рис. 1,б), имели меньшие геометрические размеры, а также более высокую однородность, чем структуры, сформированные в контактном режиме АСМ (рис. 1,а). Такая зависимость геометрических параметров ОНС титана может быть объяснена тем, что при проведении ЛАО в полуконтактном режиме АСМ-колебания кантилевера вызывают периодическое формирование и разрушение водного мениска, во время существования которого происходит окисление [5–12]. При толщине пленки адсорбата, определяемой уровнем относительной влажности, увеличение амплитуды колебания кантилевера приводит к сокращению времени существования мениска, а следовательно и времени окисления за один период колебания. При этом окисление поверхности происходит не в течение всей длительности импульса прикладываемого напряжения, а в дискретные отрезки времени, зависящие от амплитуды колебаний кантилевера [10–12].

На рис. 2, 3 представлены АСМ-изображения сформированных методом ЛАО макетов структур элементов нанoeлектроники на основе ОНС титана. Возможность формирования островковых структур может быть использована при исследовании влияния технологических режимов ЛАО на геометрические параметры ОНС, за счет достаточного количества тестовых объектов для более достоверной статистической обработки экспериментальных результатов. Кроме того, такие наноструктуры широко применяются в приборах нанoeлектроники в качестве центров рассеяния с регулируемой топологией и параметрами [1–4]. Оксидные наноразмерные структуры, представленные на рис. 3, могут быть использованы при формировании элементов нанoeлектроники на основе квантовых точечных контактов, квантовых точек, квантовых колец, а также элементов металлической нанoeлектроники на основе наноразмерных каналов проводимости [1–4].

После обработки данных АСМ-изображений, представленных на рис. 4,а, была построена зависимость средней высоты сформированных ОНС титана от длительности импульсов напряжения при ЛАО (рис. 4,б). Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении длительности импульсов напряжения от 10 до 100 мс происходит увеличение высоты ОНС от $0,58 \pm 0,18$ до $1,37 \pm 0,32$ нм. Увеличение времени окисления приводит к снижению скорости роста ОНС за счет уменьшения напряженности электрического поля вследствие увеличения толщины оксида, что хорошо коррелирует с результатами [5–12].

Из анализа АСМ-изображения, представленного на рис. 5, видно, что при формировании островковых ОНС растровым методом ЛАО повышается однородность и воспроизводимость геометрических параметров ОНС в сочетании с более высокой плотностью ОНС.

На рис. 6 представлено АСМ-изображение макета элемента металлической электроники на основе наноразмерного канала проводимости с поперечными размерами около 10 нм, сформированного методом ЛАО в растровом режиме на поверхности пленки титана по *.bmp шаблону. Анализ рис. 6 показал, что важной составляющей при проведении ЛАО в растровом режиме, является предварительная подготовка графического изображения-шаблона, наиболее важной особенностью которого являются высокая контрастность рисунка шаблона.

Из анализа ВАХ макета матрицы мемристоров, АСМ-изображение которых представлено на рис. 7, показано, что оксидные наноразмерные структуры титана, сформированные методом ЛАО, обладают мемристорным эффектом, равномерным в пределах матрицы [8]. Возможный механизм возникновения мемристорного эффекта связан с изменением контактной разности потенциалов и ширины потенциального барьера при дрейфе кислородных вакансий в слое оксида, направление которого изменяется при изменении полярности внешнего электрического поля [8].

Заключение. В работе проведены экспериментальные исследования процесса формирования оксидных наноразмерных структур на поверхности тонкой пленки титана, при проведении локального анодного окисления в векторном и растровом режимах. Представлены результаты формирования макетов структур элементов наноэлектроники методом локального анодного окисления в векторном и растровом режимах на поверхности тонкой пленки титана. Исследовано влияние режимов работы атомно-силового микроскопа на процесс ЛАО поверхности тонкой пленки титана. Показано, что оксидные наноразмерные структуры, сформированные в полуконтактном режиме АСМ, имели большую однородность и меньшие латеральные размеры. Исследовано влияние длительности импульсов напряжения прикладываемого к системе зонд-подложки на геометрические параметры ОНС титана. Показано, что при увеличении длительности импульсов напряжения от 10 до 100 мс происходит увеличение высоты ОНС от $0,58 \pm 0,18$ до $1,37 \pm 0,32$ нм. С использованием растрового метода ЛАО в тонкой пленке титана были получены макеты элементов наноэлектроники: матрица из 25 мемристоров; элемент металлической наноэлектроники на основе наноразмерного канала проводимости с поперечными размерами около 10 нм.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чаплыгин Ю.А.* Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
2. *Неволин В.К.* Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
3. *Heinzel T.* Mesoscopic Electronics in Solid State Nanostructures. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007. – 416 p.
4. *Curson N. J., Nemutudi R. and Jones G.A.C.* Ballistic transport in a GaAs/Al_xGa_{1-x}As one-dimensional channel fabricated using an atomic force microscope // *Applied Physics Letters*. – 2001. – № 78. – P. 3466.
5. *Смирнов В.А., Агеев О.А.* Нанолитография методом локального анодного окисления полупроводников и металлов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2005. – № 9 (53). – С. 61.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
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. МВИ 14-2009 Методика выполнения измерений геометрических параметров массивов оксидных наноразмерных структур методом атомно-силовой микроскопии.

REFERENCES

1. *Chaplygin Yu.A.* Nanotekhnologii v elektronike [Nanotechnology in electronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 448 p.
2. *Nevolin V.K.* Zondovye nanotekhnologii v elektronike [Probe nanotechnology in electronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 160 p.
3. *Heinzel T.* Mesoscopic Electronics in Solid State Nanostructures. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2007, 416 p.
4. *Curson N. J., Nemutudi R. and Jones G.A.C.* Ballistic transport in a GaAs/Al_xGa_{1-x}As one-dimensional channel fabricated using an atomic force microscope, *Applied Physics Letters*, 2001, No. 78, pp. 3466.
5. *Smirnov V.A., Ageev O.A.* Nanolitografiya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya poluprovodnikov i metallov [Nanolithography using local anodic oxidation of semiconductors and metals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2005, No. 9 (53), pp. 61.
6. *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 [Investigation of the influence of the modes of photonic stimulation processes nanolithography using local anodic oxidation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2006, No. 9-1 (64), pp. 117.
7. *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 process of the formation of nanostructures using local anodic oxidation film of titanium], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of Higher Educational Institutions. Electronics], 2010, No. 2 (82), pp. 23-30.

8. 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 matrix of memristor-based titanium oxide methods probe nanotechnology], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of Higher Educational Institutions. Electronics], 2014, No. 2 (106), pp. 50-57.
9. 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 formation of the oxide nano-structures of titanium using local anodic oxidation film of titanium], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem Technology], 2008, No. 1 (90), pp. 14-16.
10. Ageev O.A., Konoplev B.G., Smirnov V.A. *i dr.* Zondovaya fotonno-stimulirovannaya nanolitografiya struktur na osnove plenki titana [Probe photon stimulated nanolithography structures based on the film of titanium], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2007, Vol. 36, No. 6, pp. 403-408.
11. 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 gallium arsenide], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 8-13.
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 modes of formation of the oxide nano-structures of gallium arsenide using local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya vuzov. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
13. MVI 14-2009 Metodika vypolneniya izmereniy geometricheskikh parametrov massivov oksidnykh nanorazmernykh struktur metodom atomno-silovoy mikroskopii [MIM 14-2009 the Method of measurement of the geometric parameters of the arrays of oxide nano-structures by atomic force microscopy].

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

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

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

УДК 621.382.211

**А.Н. Алексеев, С.И. Петров, Д.М. Красовицкий, В.П. Чалый, В.В. Мамаев,
В.Г. Сидоров**

ВЫРАЩИВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ БУФЕРНЫХ СЛОЕВ ALN/ALGAN ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ В НЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GAN

Рассмотрены особенности получения нитридных НЕМТ гетероструктур методом аммиачной и плазменной МЛЭ. Показано, что использование высокотемпературных буферных слоев AlN/AlGa_n, выращенных при использовании аммиака и экстремально высокой температуре (до 1150 °С), позволяет кардинально улучшить структурное совершенство активных слоев GaN и понизить плотность дислокаций в них до значений $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Использование таких буферных слоев позволяет получать гетероструктуры GaN/AlGa_n высокого качества обоими методами. С другой стороны, в отличие от аммиачной МЛЭ,