

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

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

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

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

Чинь Ван Мьюй – e-mail: tvn0209@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

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

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

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

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

Trinh Van Muoi – e-mail: tvn0209@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

УДК 621.38-022.532

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

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ*

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

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

амплитуды и длительности импульсов приложенного напряжения при ЛАО приводит к увеличению высоты, глубины и диаметра оксидных и профилированных наноразмерных структур на поверхности ЭС арсенида галлия. Таким образом, показано, что локальное анодное окисление является перспективным методом нанолитографии, использование которого позволяет проводить профилирование поверхности подложки с нанометровым разрешением. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники на основе арсенида галлия.

Нанолитография; наноматериалы; локальное анодное окисление; молекулярно-лучевая эпитаксия; атомно-силовая микроскопия; оксидные наноразмерные структуры; арсенид галлия.

**V.A. Smirnov, V.I. Avilov, L.R. Saubanova, M.S. Solodovnik, V.V. Polyakova,
O.G. Tsukanova, S.Yu. Krasnoborodko**

GALLIUM ARSENIDE EPITAXIAL STRUCTURES PROFILING BY LOCAL ANODIC OXIDATION

The development of electronic device technology is related to the application of nanotechnology methods, which make it possible to decrease sizes, to increase the density of structures of active cells of integrated chips on a crystal and to decrease the power consumed. Among a wide spectrum of methods of nanodimensional profiling of the surface based on probe nanolithography, one of the most promising for positioning and localization of self-organizing semiconductor nanostructures (SSN) growth is the local anodic oxidation (LAO), the use of which provides a high spatial resolution, the possibility of profiling the surface of the substrate without any additional operations associated with the deposition of a photoresist, and high reproducibility at minimum disturbances in the structural perfection of the epitaxial layer. The results of studies of the effect of technological modes of local anodic oxidation on the formation of oxide nanostructures (ONS) on the surface of epitaxial structures (ES) of gallium arsenide. The influence of the amplitude and duration of the voltage pulses applied to the tip-substrate system and the oscillation amplitude of the cantilever on the geometrical parameters of the gallium arsenide ONS. The influence of the modes of LAO on the geometrical parameters profiled nanostructures (PNS) obtained on the surface of ES GaAs after etching of ONS formed by LAO. It has been established that the increase of the amplitude and pulse width of the applied voltage in the LAO leads to an increase height, depth and diameter of profiled and oxide nanostructures on the ES surface of gallium arsenide. It has been shown that increasing the vibration amplitude of the cantilever leads to a decrease in depth and a diameter of PNS. Thus, it is shown that local anodic oxidation is a promising method of nanolithography, the use of which allows us to profile the substrate surface with a nanometer resolution. The results may be used in developing technological processes for fabricating the element base of nanoelectronics.

Nanolithography; local anodic oxidation; atomic force microscopy; oxide nanostructures; gallium arsenide.

Введение. Развитие нанотехнологии является актуальным направлением современной науки и техники, включающим процессы, связанные с разработкой и применением новых приборов и устройств микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники на основе массивов самоорганизующихся полупроводниковых наноструктур (СПН), которые относятся к перспективному классу наноматериалов [1]. Арсенид галлия и твердые растворы на его основе являются перспективным материалом нанoeлектроники, который широко используется при производстве ИС, работающих на частотах свыше 10 ГГц, а также малошумящих и мощных СВЧ-приборах [2].

Для создания элементов нанoeлектроники с использованием СПН на основе арсенида галлия необходимо прецизионное управление геометрическими параметрами, плотностью, а также локальным расположением формируемых наноструктур. К перспективным методам позиционирования и локализации роста СПН арсенида галлия относится формирование СПН с использованием массивов профилированных наноразмерных структур (ПНС), сформированных на поверхности подложки методами оптической литографии, фокусированных ионных пучков или зондовой нанолитографии [1].

Длительное время оптическая и электронная литография являлись стандартными методами структурирования поверхности полупроводниковых подложек. Однако с развитием сканирующей зондовой микроскопии появились новые возможности формирования наноразмерных структур методом локального анодного окисления (ЛАО), использование которого обеспечивает высокое пространственное разрешение, возможность профилирования поверхности подложки без дополнительных операций, связанных с нанесением фоторезиста, высокую воспроизводимость при минимальных нарушениях структурного совершенства эпитаксиального слоя [6–14].

Формирование оксидных наноразмерных структур методом ЛАО происходит за счет воздействия на поверхность путем приложения к системе проводящий зонд-подложка напряжения. При этом под острием зонда протекает электрохимическая реакция с участием электролита, основу которого составляет адсорбированная на поверхности подложки вода, поставляющая заряженные частицы к поверхности растущего окисла [3].

Однако, несмотря на большое количество научных публикации по данной проблеме, влияние режимов локального анодного окисления на геометрические параметры профилированных наноразмерных структур на поверхности эпитаксиальных слоев арсенида галлия остается не достаточно изученным.

Целью работы является исследование режимов наноразмерного профилирования поверхности эпитаксиальных слоев арсенида галлия методом локального анодного окисления, исследование влияния амплитуды и длительности импульсов напряжения, а также силы прижима кантилевера к поверхности подложки при ЛАО на геометрические параметры сформированных оксидных и профилированных наноразмерных структур на поверхности арсенида галлия.

Методика исследования. При проведении экспериментальных исследований в качестве образцов использовались эпитаксиальные структуры GaAs, полученные в модуле молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) STE35 (НТО, Россия) многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия). Рост структур проводился на полуизолирующих пластинах GaAs (001) «*per-ready*». При давлении $3,5 \cdot 10^5$ Па в течение 10 мин осуществлялся рост буфера путем осаждения 800 нм нелегированного GaAs, после чего осаждался легированный кремнием слой GaAs толщиной 2 мкм с концентрацией примеси $3 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Формирование ОНС GaAs проводилось с использованием зондовой нанолaborатории Ntegra (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме АСМ. При проведении ЛАО применялись кремниевые кантилеверы марки NSG 10 с проводящим покрытием из платины. Относительная влажность воздуха внутри технологической камеры Ntegra контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R и составляла 90 ± 1 %. В качестве зондов для проведения процесса ЛАО использовались кантилеверы марки NSG 10 с проводящим покрытием из платины. Амплитуда импульсов напряжения в системе зонд-подложка изменялась в диапазоне от 8 до 15 В, длительность импульсов от 100 до 800 мс, а также величина тока цепи обратной связи (в программе управления Nova параметр Set Point) от 0,5 до 2 нА. В результате на поверхности подложки формировался массив из 25 ОНС GaAs, АСМ-изображение которого представлено на рис. 1.

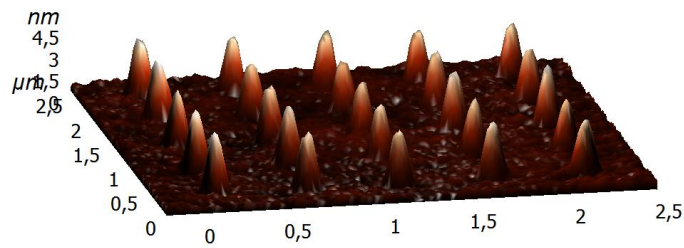


Рис. 1. АСМ-изображение массива ОНС GaAs, сформированного методом ЛАО

Для исследования влияния технологических параметров процесса ЛАО на геометрические параметры профилированных наноразмерных структур, проводилось ЛАО на поверхности эпитаксиального слоя GaAs, в результате чего было сформировано 18 массивов, состоящих из 9 островковых ОНС GaAs каждый (рис. 2,а,в). После чего исследуемые образцы помещались в модуль МЛЭ, где проводилось удаление окисла с поверхности подложки GaAs (рис. 2,б,в).

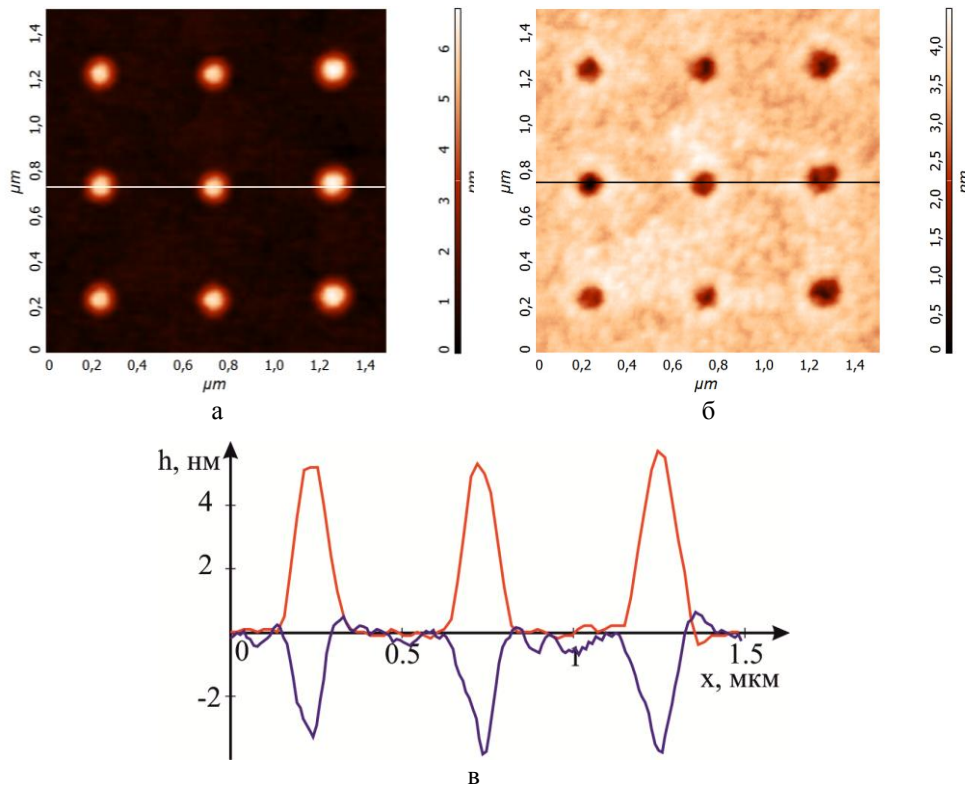


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности GaAs: а – после формирования массива ОНС; б – после формирования ПНС; в – профилограмма вдоль линий

Результаты и обсуждение. Статистическая обработка полученных АСМ-изображений производилась с использованием программного пакета Image Analysis 3.5, по разработанной методике выполнения измерений, аттестованной в соответствии с ГОСТ Р 8.563-96 [15]. По полученным статистическим данным были построены зависимости значений геометрических параметров ОНС GaAs (вы-

соты и диаметра) и ПНС GaAs (глубины и диаметра) от амплитуды, длительности импульса прикладываемого напряжения и параметра SetPoint при фиксированном на уровне $90 \pm 1\%$ значении относительной влажности, представленные на рис. 2–7.

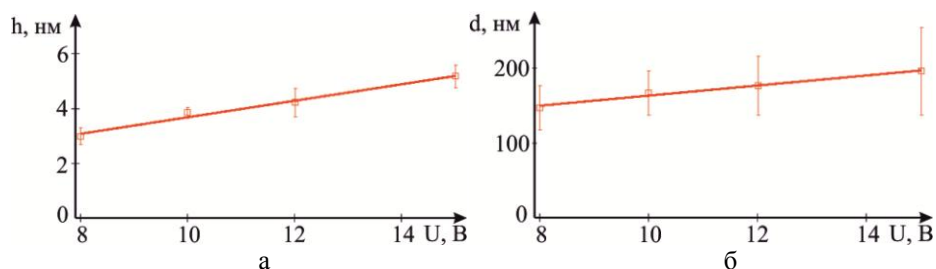


Рис. 2. Зависимости высоты (а) и диаметра (б) ОНС GaAs от амплитуды импульсов напряжения при ЛАО

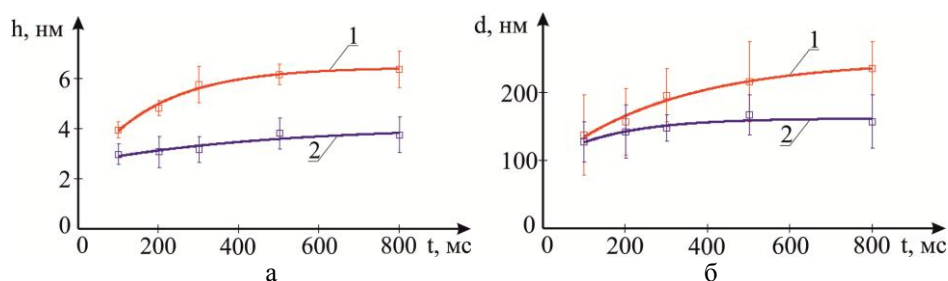


Рис. 3. Зависимости высоты (а) и диаметра (б) ОНС GaAs от длительности импульсов приложенного напряжения при амплитуде 1 – 15 В, 2 – 10 В

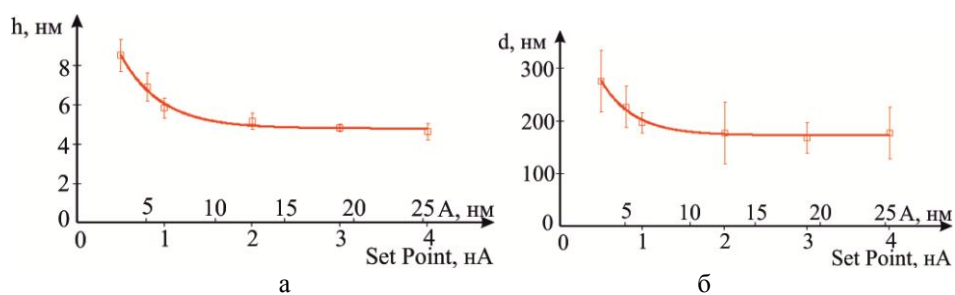


Рис. 4. Зависимости высоты (а) и диаметра (б) ОНС GaAs от амплитуды колебания кантилевера и параметра Set Point

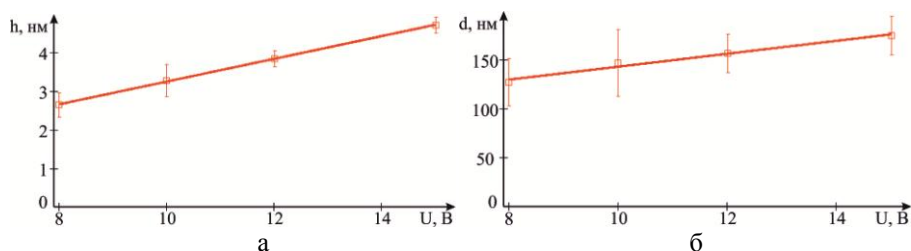


Рис. 5. Зависимости глубины (а) и диаметра (б) ПНС GaAs от амплитуды импульсов напряжения при ЛАО

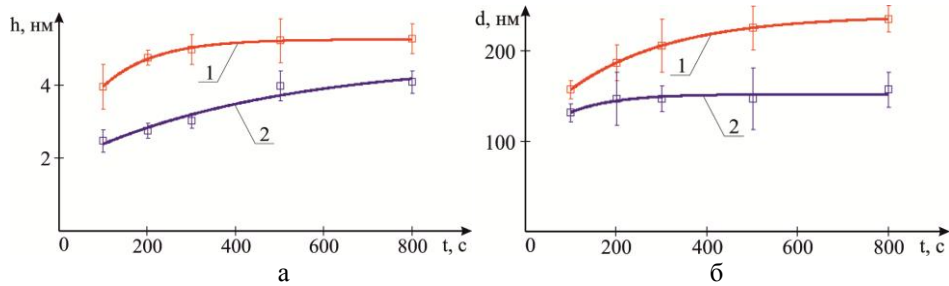


Рис. 6. Зависимости глубины (а) и диаметра (б) ПНС GaAs от длительности импульсов приложенного напряжения при амплитуде 1 – 15 В, 2 – 10 В

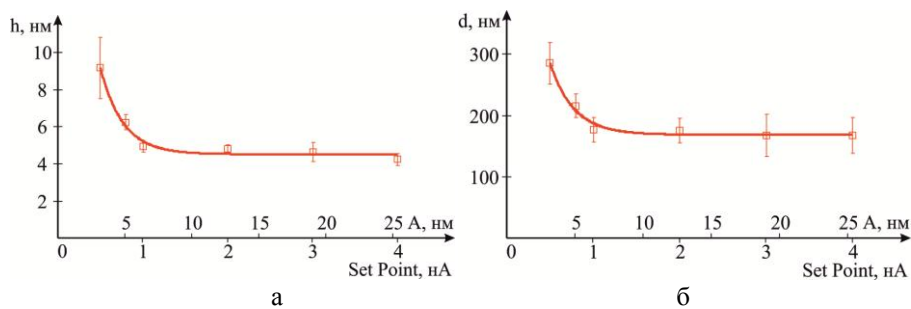


Рис. 7. Зависимости глубины (а) и диаметра (б) ПНС GaAs от амплитуды колебания кантилевера и параметра Set Point при ЛАО

Анализ рис. 2 и 5 показал, что при $SetPoint = 2$ нА, $t = 500$ мс увеличение амплитуды импульса напряжения от 8 до 15 В приводит к линейному возрастанию высоты ОНС и глубины ПНС GaAs от $2,9 \pm 0,3$ до $5,1 \pm 0,4$ нм и от $2,6 \pm 0,3$ до $4,5 \pm 0,2$ нм соответственно. Диаметр ОНС и ПНС на поверхности GaAs при этом также линейно увеличивался от 147 ± 28 до 195 ± 21 нм и от 103 ± 24 до 157 ± 19 нм соответственно. Полученные для ОНС GaAs зависимости $h(U)$ и $d(U)$ хорошо коррелируют с данными [10, 11].

На рис. 3 и 6, представлены экспериментальные зависимости высоты ОНС и глубины ПНС, а также диаметра ОНС и ПНС от длительности импульса напряжения, полученные при различных значениях напряжения 10 и 15 В и $SetPoint = 2$ нА.

Из анализа рис. 3 и 6 видно, что при 10 В и изменении длительности импульса от 100 до 800 мс высота ОНС, а также глубина ПНС возрастают от $1,9 \pm 0,2$ до $3,8 \pm 0,3$ нм и от $1,7 \pm 0,3$ до $4,1 \pm 0,3$ нм, соответственно. Диаметр при этом увеличивался от 137 ± 29 до 156 ± 39 нм и от 137 ± 10 до 167 ± 20 нм для ОНС и ПНС соответственно. Увеличение амплитуды импульса до 15 В, как следует из зависимостей, представленных на рис. 3 и 6, приводит к возрастанию высоты ОНС и глубины ПНС от $3,8 \pm 0,3$ до $6,3 \pm 0,7$ нм и от $3,4 \pm 0,6$ до $4,9 \pm 0,4$ нм, а диаметра – от 157 ± 59 до 235 ± 59 нм и от 157 ± 10 до 235 ± 15 нм в том же диапазоне изменения длительности импульса.

Кроме того, при увеличении амплитуды напряжения при ЛАО начало участков насыщения характеристик смещаются от 300 мс при $U = 10$ В до 600 мс при $U = 15$ В. Это хорошо коррелирует с экспериментальными данными и объяснением данного эффекта, приведенными в [10, 11].

Зависимости геометрических параметров профилированных наноразмерных структур, сформированных методом ЛАО на поверхности GaAs от параметра *SetPoint*, полученные при $t=500$ мс и $U=15$ В, представлены на рис. 4 и 7. Значение параметра *SetPoint* при этом изменялось в диапазоне (0,5–4) нА. Анализ представленных на рис. 4 и 7 зависимостей показал, что при увеличении *SetPoint* от 0,5 до 4 нА значения высоты ОНС и глубины ПНС GaAs уменьшаются от $8,0\pm 0,8$ до $4,6\pm 0,4$ нм и от $9,1\pm 1,6$ до $3,4\pm 0,3$ нм, а также диаметра – от 274 ± 59 до 176 ± 49 нм и от 274 ± 34 до 167 ± 29 нм соответственно.

Уменьшение геометрических параметров формируемых структур можно объяснить тем, что увеличение параметра *SetPoint* в полуконтактном режиме АСМ эквивалентно возрастанию амплитуды колебаний кантилевера, что в свою очередь приводит к уменьшению времени взаимодействия с образцом, снижению скорости формирования ОНС и уменьшению геометрических размеров профилированных наноразмерных структур арсенида галлия [10].

Заключение. В результате проведенных исследований получены зависимости геометрических параметров оксидных и профилированных наноразмерных структур на поверхности эпитаксиальных слоев арсенида галлия от амплитуды и длительности импульсов напряжения, приложенного к системе зонд-подложка и амплитуды колебания кантилевера при проведении локального анодного окисления в полуконтактном режиме АСМ. Установлено, что увеличение амплитуды и длительности импульсов приложенного напряжения при ЛАО приводит к увеличению высоты и диаметра ОНС, а также увеличению глубины и диаметра ПНС на поверхности ЭС арсенида галлия. Показано, что амплитуда колебаний кантилевера также является управляющим параметром процесса ЛАО, при ее увеличении происходит уменьшение высоты, глубины и диаметра формируемых оксидных и профилированных наноразмерных структур.

Таким образом, показано, что локальное анодное окисление является перспективным методом профилирования поверхности с нанометровым разрешением. Результаты работы могут использоваться при разработке технологических процессов изготовления наноразмерных структур элементов нанoeлектроники [16–20].

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Taylor C. et al.* Directed self-assembly of quantum structures by nanomechanical stamping using probe tips // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19. – P. 1-10.
2. *Nakamura H. et al.* Novel nano-scale site-controlled InAs quantum dot assisted by scanning tunneling microscope probe // *Physica E*. – 2000. – Vol. 7. – P. 331-336.
3. *Kapsa J. et al.* STM and FIB nano-structuration of surfaces to localize InAs/InP(001) quantum dots // *Applied Surface Science*. – 2004. – Vol. 226. – P. 31-35.
4. *Song H.Z. et al.* Growth process of quantum dots precisely controlled by an AFM-assisted technique // *Physica E*. – 2004. – Vol. 21. – P. 625-630.
5. *Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г.* Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
6. *Ageev O.A., Alyab'eva N.I., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A.* Photoactivation of the processes of formation of nanostructures by local anodic oxidation of a titanium film // *Semiconductors*. – 2010. – Vol. 44, No. 13. – P. 1703-1708.
7. *Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Поляков В.В., Светличный А.М., Смирнов В.А.* Исследование режимов фотоннотимулированной зондовой нанолитографии методом локального анодного окисления пленки титана // *Нано- и микросистемная техника*. – 2008. – № 1 (90). – С. 14–16.

8. Ageev A.O., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Svetlichnyi A.M., Smirnov V.A. Photoassisted scanning-probe nanolithography on Ti films // *Russian Microelectronics*. – 2007. – Vol. 36, No. 6. – P. 353-357.
9. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Formation of a memristor matrix based on titanium oxide and investigation by probe-nanotechnology methods // *Semiconductors*. – 2014. – Vol. 48, No. 13. – C. 1757-1762.
10. Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Rukomoikin A.V., Avilov V.I. A study of the formation modes of nanosized oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation // *Semiconductors*. – 2012. – Vol. 46, No. 13. – C. 1616-1621.
11. Ageev O.A., Smirnov B.A., Avilov B.I. и др. Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 8-13.
12. Allwood D.A. et al. Characterization of oxide layers on GaAs substrates // *Thin Solid Films*. – 2000. – Vol. 364. – P. 333-39.
13. Tanner B.K. et al. Kinetics of native oxide film growth on epitaxial GaAs // *Materials Science and Engineering B*. – 2001. – Vol. 80. – P. 99-103.
14. Vilar M.R. et al. Characterization of wet-etched GaAs (100) surfaces // *Surface and Interface Analysis*. – 2005. – Vol. 37. – P. 673-682.
15. МВИ 14-2009 Методика выполнения измерений геометрических параметров массивов оксидных наноразмерных структур методом атомно-силовой микроскопии.
16. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A. The formation and study of the memristors matrix based on titanium oxide by using probe nanotechnologies methods // *Semiconductors*. – 2014. – Vol. 48, No. 13. – P. 1757-1762.
17. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Lisitsyn S.A., Smirnov V.A., Zamburg E.G. Formation of High Aspect Ratio Nanostructures using Focused Ion Beam Induced Deposition of Carbon // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 752-753. – P. 154-158.
18. Avilov V.I., Ageev O.A., Blinov Yu.F., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A., and Tsukanova O.G. Simulation of the Formation of Nanosize Oxide Structures by Local Anode Oxidation of the Metal Surface // *Technical Physics*. – 2015. – Vol. 60, No. 5. – P. 717-723.
19. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., and Tsukanova O.G. Studying the Modes of Nanodimensional Surface Profiling of Gallium Arsenide Epitaxial Structures by Local Anodic Oxidation // *Nanotechnologies in Russia*. – 2015. – Vol. 10, No. 3-4. – P. 214-219.
20. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam // *Microelectronics Reliability*. – 2015. – No. 55. – P. 2131-2134.

REFERENCES

1. Taylor C. et al. Directed self-assembly of quantum structures by nanomechanical stamping using probe tips, *Nanotechnology*, 2008, Vol. 19, pp. 1-10.
2. Nakamura H. et al. Novel nano-scale site-controlled InAs quantum dot assisted by scanning tunneling microscope probe, *Physica E*, 2000, Vol. 7, pp. 331-336.
3. Kapsa J. et al. STM and FIB nano-structuration of surfaces to localize InAs/InP(001) quantum dots, *Applied Surface Science*, 2004, Vol. 226, pp. 31-35.
4. Song H.Z. et al. Growth process of quantum dots precisely controlled by an AFM-assisted technique, *Physica E*, 2004, Vol. 21, pp. 625-630.
5. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
6. Ageev O.A., Alyab'eva N.I., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A. Photoactivation of the processes of formation of nanostructures by local anodic oxidation of a titanium film, *Semiconductors*, 2010, Vol. 44, No. 13, pp. 1703-1708.
7. Ageev O.A., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Svetlichnyi A.M., Smirnov V.A. Issledovanie rezhimov fotonostimulirovannoy zondovoy nanolitografii metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya plenki titana [Study modes potentialities probe nanolithography using local anodic oxidation film of titanium], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2008, No. 1 (90), pp. 14-16.

8. Ageev A.O., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Svetlichnyi A.M., Smirnov V.A. Photoassisted scanning-probe nanolithography on Ti films, *Russian Microelectronics*, 2007, Vol. 36, No. 6, pp. 353-357.
9. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Formation of a memristor matrix based on titanium oxide and investigation by probe-nanotechnology methods, *Semiconductors*, 2014, Vol. 48, No. 13, pp. 1757-1762.
10. Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Rukomoikin A.V., Avilov V.I. A study of the formation modes of nanosized oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation, *Semiconductors*, 2012, Vol. 46, No. 13, pp. 1616-1621.
11. Ageev O.A., Smirnov V.A., Avilov V.I. *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.
12. Allwood D.A. *et al.* Characterization of oxide layers on GaAs substrates, *Thin Solid Films*, 2000, Vol. 364, pp. 333-39.
13. Tanner B.K. *et al.* Kinetics of native oxide film growth on epi-ready GaAs, *Materials Science and Engineering B*, 2001, Vol. 80, pp. 99-103.
14. Vilar M.R. *et al.* Characterization of wet-etched GaAs (100) surfaces, *Surface and Interface Analysis*, 2005, Vol. 37, pp. 673-682.
15. MVI 14-2009 Metodika vypolneniya izmereniy geometricheskikh parametrov massivov oksidnykh nanorazmernykh struktur metodom atomno-silovoy mikroskopii [MIM 14-2009 a Methodology for measuring geometrical parameters of arrays of nanoscale oxide structures by atomic force microscopy].
16. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A. The formation and study of the memristors matrix based on titanium oxide by using probe nanotechnologies methods, *Semiconductors*, 2014, Vol. 48, No. 13, pp. 1757-1762.
17. Ageev O.A., Ilin O.I., Kolomiitsev A.S., Lisitsyn S.A., Smirnov V.A., Zamburg E.G. Formation of High Aspect Ratio Nanostructures using Focused Ion Beam Induced Deposition of Carbon, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 752-753, pp. 154-158.
18. Avilov V.I., Ageev O.A., Blinov Yu.F., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A., and Tsukanova O.G. Simulation of the Formation of Nanosize Oxide Structures by Local Anode Oxidation of the Metal Surface, *Technical Physics*, 2015, Vol. 60, No. 5, pp. 717-723.
19. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., and Tsukanova O.G. Studying the Modes of Nanodimensional Surface Profiling of Gallium Arsenide Epitaxial Structures by Local Anodic Oxidation, *Nanotechnologies in Russia*, 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 214-219.
20. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam, *Microelectronics Reliability*, 2015, No. 55, pp. 2131-2134.

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.

Солодовник Максим Сергеевич – e-mail: solodovnikms@sfned.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Авилов Вадим Игоревич – e-mail: avilovvi@sfned.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; ассистент.

Полякова Виктория Витальевна – e-mail: vik5702935@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Цуканова Олеся Геннадьевна – e-mail: azmarrin@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Краснобородько Сергей Юрьевич – e-mail: sergkrasnoborodko@gmail.com; НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ; к.т.н.; м.н.с.

Саубанова Лолита Равилевна – e-mail: lolitkasaub@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfned.ru; 2, Shevchenko street, corps. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Solodovnik Maxim Sergeevich – e-mail: solodovnikms@sfned.ru; the department of nanotechnologies and Microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Avilov Vadim Igorevich – e-mail: avilovvi@sfned.ru; the department of nanotechnologies and Microsystems; assistant.

Polyakova Viktoria Vadimovna – e-mail: vik5702935@mail.ru; the department of nanotechnologies and Microsystems; postgraduate student.

Tsukanova Olesya Gennad`evna – e-mail: azmarrin@mail.ru; the department of nanotechnologies and Microsystems; postgraduate student.

Krasnoborodko Sergey Yurievich – e-mail: sergkrasnoborodko@gmail.com; cand. of eng. sc. scientific associate.

Saubanova Lolira Ravilevna – e-mail: lolitkasaub@gmail.com; the department of nanotechnologies and Microsystems; student.