

Раздел I. Нанoeлектроника

УДК 621.38-022.532

О.А. Агеев, В.А. Смирнов, М.С. Солодовник, В.И. Авилон

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЛОКАЛЬНОГО АНОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов локального анодного окисления (ЛАО) эпитаксиальных структур арсенида галлия. Исследовано влияние амплитуды и длительности импульсов напряжения, приложенного к системе “зонд–подложка”, на геометрические размеры оксидных наноразмерных структур (ОНС), сформированных на поверхности слоя арсенида галлия. Установлено, что увеличение относительной влажности с 70 ± 1 до 90 ± 1 % приводит к увеличению высоты и диаметра ОНС и сопровождается снижением амплитуды с 7 до 6 В.

Нанолитография; локальное анодное окисление; атомно-силовая микроскопия; оксидные наноразмерные структуры; арсенид галлия.

O.A. Ageev, V.A. Smirnov, M.S. Solodovnik, V.I. Avilov

GALLIUM ARSENIDE EPITAXIAL STRUCTURES LOCAL ANODIC OXIDATION REGIMES INVESTIGATION

In work results of experimental researches of arsenide gallium epitaxial structures local anodic oxidation (LAO) modes are presented. Influence of amplitude and duration of voltage impulses enclosed to probe-substrate system, for the oxide nanostructures (ONS) geometrical sizes, generated in an arsenide gallium layer is investigated. It is established that the increase in relative humidity with 70 ± 1 to 90 ± 1 %, leads to increase ONS height and diameter and is accompanied by decrease in amplitude with 7 to 6 V.

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

Развитие нанотехнологии является актуальным направлением современной науки и техники, включающим процессы, связанные с разработкой и применением новых материалов, процессов, явлений, теоретических и экспериментальных методик, направленных на получение инновационных электронных и механических наносистем, а также наноструктурированных материалов. Длительное время оптическая и электронная литография являлись стандартными методами структурирования поверхности полупроводниковых подложек. Однако с развитием сканирующей зондовой микроскопии появились новые методы формирования наноразмерных структур с использованием зондовой нанолитографии [1].

Метод локального анодного окисления является одним из перспективных методов зондовой нанолитографии, который позволяет формировать структуры элементов нанoeлектроники и наносистемной техники на поверхности широкого диапазона материалов (металлы, полупроводники, органические и неорганические соединения и т.д.) с высокой разрешающей способностью и воспроизводимостью [1–3]. Основными достоинствами данного метода по отношению к стандартной фотолитографии являются: отсутствие существенных ограничений, связанных с использованием источников света, работающих на длине волны ниже 100 нм;

формирование наноструктур происходит без использования фоторезистов и сложных операций травления; снижение загрязнения окружающей среды [1–3].

Формирование оксидных наноразмерных структур методом ЛАО происходит за счет воздействия на поверхность подложки путем приложения к системе “проводящий зонд–подложка” напряжения смещения. 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 оксида [3].

Целью работы является исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия, исследование влияния амплитуды и длительности импульсов прикладываемого к системе “зонд–подложка” напряжения, а также воздействия относительной влажности внутри технологической камеры на особенности формирования оксидных наноразмерных структур арсенида галлия.

В качестве экспериментальных образцов использовались эпитаксиальные структуры арсенида галлия, легированного кремнием (толщина слоя порядка 2 мкм, концентрация электронов $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке арсенида галлия с помощью многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (производитель – ЗАО “Нанотехнология-МДТ”, г. Зеленоград). Формирование ОНС проводилось с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver P47 Pro (производитель – ЗАО “Нанотехнология-МДТ”, г. Зеленоград) при приложении импульсов напряжения к системе “зонд–подложка” амплитудой от 5 до 10 В, сигнале цепи обратной связи СЗМ (параметр Set Point) 0,1 нА и длительности импульсов напряжения 1000 мс. При проведении ЛАО применялись кремниевые кантилеверы марки DSP 20 [4] с проводящим углеродным покрытием, относительная влажность воздуха внутри технологической камеры СЗМ контролировалась с помощью цифрового измерителя влажности Oregon Scientific ETHG913R. В результате на поверхности слоя арсенида галлия формировались наноструктуры, состоящие из 49 островковых ОНС (рис. 1).

Статистическая обработка полученных АСМ-изображений производилась с использованием программного пакета Image Analysis 3.5 [4], по разработанной методике выполнения измерений, аттестованной в соответствии с ГОСТ Р 8. 563-96 [5].

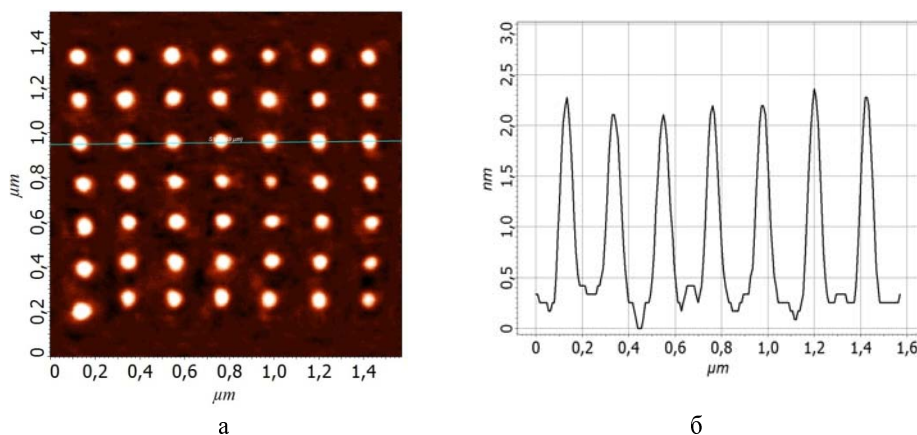


Рис. 1. АСМ-изображение (а) и профилограмма (б) ОНС после проведения ЛАО слоя арсенида галлия

В результате по полученным статистическим данным были построены зависимости средних значений высоты и диаметра ОНС арсенида галлия от амплитуды приложенного напряжения при различных значениях относительной влажности (рис. 2).

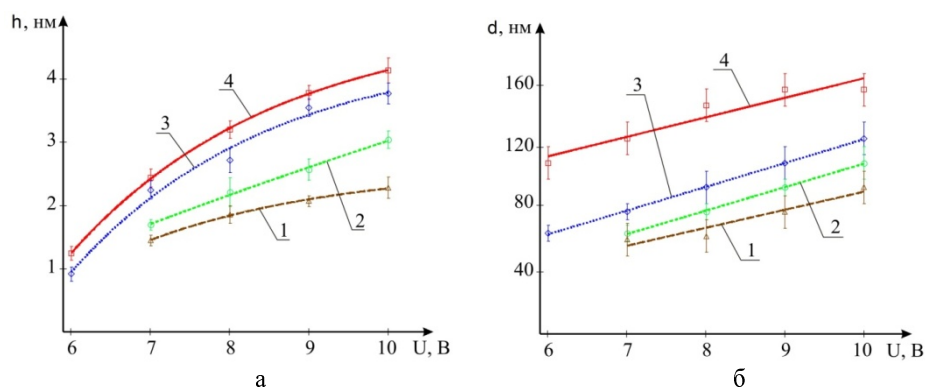


Рис. 2. Зависимость высоты (а) и диаметра (б) ОНС арсенида галлия от амплитуды приложенного напряжения при относительной влажности: 1 – $60\pm 1\%$; 2 – $70\pm 1\%$; 3 – $80\pm 1\%$; 4 – $90\pm 1\%$

Анализ полученных зависимостей показывает, что электрическое поле в системе “зонд–подложка” оказывает значительное влияние на процесс формирования ОНС методом ЛАО, так как при повышении амплитуды приложенного напряжения геометрические параметры сформированных ОНС арсенида галлия возрастали. Большее напряжение смещения приводит к формированию большего количества заряженных частиц, достигающих поверхности раздела оксид–подложка, где происходит рост ОНС.

Кроме того анализ показал, что при повышении относительной влажности с $70\pm 1\%$ до $90\pm 1\%$ происходило снижение амплитуды порогового напряжения процесса формирования ОНС методом ЛАО с 7 до 6 В, а также увеличение высоты ОНС арсенида галлия с $2,3\pm 0,4$ до $4,2\pm 0,2$ нм и диаметра с $95,8\pm 0,8$ до $156,9\pm 0,7$ нм соответственно. Относительная влажность является одним из основных параметров процесса ЛАО, характеризующим количество адсорбированной на поверхности подложки воды. Зависимость порогового напряжения ЛАО эпитаксиальной структуры арсенида галлия может быть обусловлена количеством молекул воды в системе “зонд–подложка”. При низкой относительной влажности количества молекул адсорбированной влаги недостаточно, чтобы обеспечить протекание реакции окисления поверхности подложки. Поэтому пороговое напряжение, при котором начинается реакция окисления, будет уменьшаться с увеличением относительной влажности внутри технологической камеры СЗМ. Также рост геометрических параметров, сформированных ОНС при повышении относительной влажности, может быть за счет увеличения контактной области между зондом и водой, в результате чего происходит увеличение диаметра сформированного мостика влаги.

Затем, с использованием полученных статистических данных, была построена зависимость высоты и диаметра ОНС арсенида галлия от относительной влажности для ОНС, сформированных при амплитуде напряжения 10 В, длительности импульсов напряжения 1000 мс и токе цепи обратной связи 0,1 нА (рис. 3).

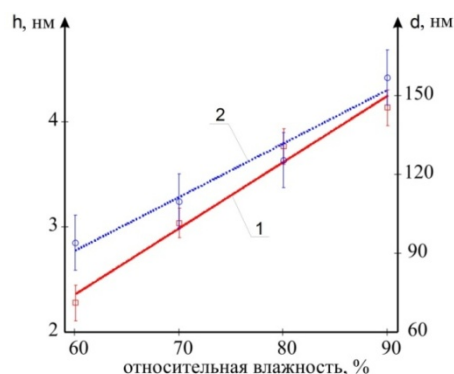


Рис. 3. Зависимость высоты (1) и диаметра (2) ОНС арсенида галлия от относительной влажности в технологической камере

Исследование зависимости геометрических параметров ОНС от длительности импульсов напряжения проводилось при подаче импульсов напряжения длительностью от 10 до 500 мс, амплитуде приложенного напряжения 10 В, относительной влажности $90 \pm 1\%$ и Set Point 0,1 нА. В результате статистической обработки полученных АСМ-изображений были построены зависимости высоты и диаметра ОНС от длительности импульса напряжения, приведенные на рис. 4.

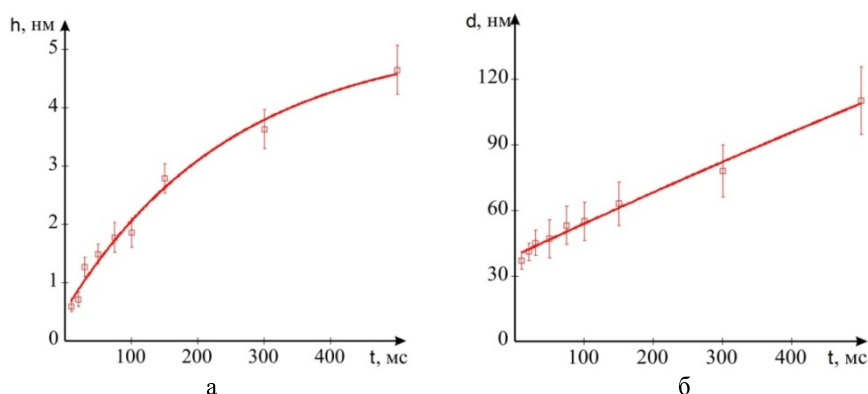


Рис. 4. Зависимость высоты (а) и диаметра (б) ОНС арсенида галлия от длительности импульса напряжения

Анализ полученных зависимостей показал, что при формировании ОНС наблюдалось характерное насыщение графиков зависимостей (рис. 4), рост оксидных наноразмерных структур более интенсивно происходил на ранних стадиях проведения ЛАО. На поздних стадиях формирование ОНС происходило более медленно. Это может быть связано с тем, что заряженные частицы диффундируют к поверхности подложки через слой растущего окисла, высота которого в начале процесса ЛАО незначительная, следовательно, скорость роста ОНС высокая. При увеличении высоты формируемых ОНС происходит понижение величины электрического поля в слое окисла, при этом поток заряженных частиц окислителя к поверхности подложки снижается и скорость роста ОНС уменьшается.

С использованием результатов исследований режимов формирования ОНС методом ЛАО был получен наноразмерный канал (рис. 5) с поперечными размерами около 10 нм, который может быть использован при разработке и создании наноструктур различных элементов наноэлектроники [6].

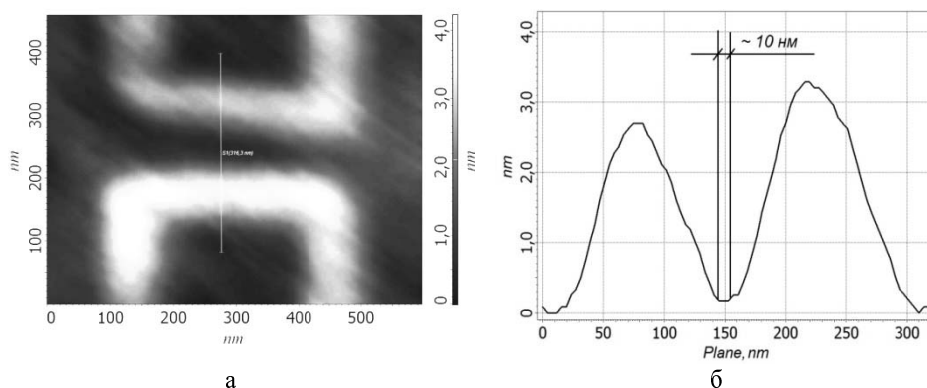


Рис. 5. АСМ-изображение (а) и профилограмма (б) наноразмерного канала проводимости на поверхности эпитаксиальной структуры арсенида галлия после проведения ЛАО

В результате работы исследованы режимы локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия, получены зависимости геометрических размеров оксидных наноразмерных структур от амплитуды и длительности импульсов напряжения, приложенного к системе “зонд–подложка”. Увеличение амплитуды и длительности импульсов приложенного напряжения приводит к увеличению геометрических размеров ОНС. Установлено, что повышение влажности внутри технологической камеры приводит к повышению геометрических размеров ОНС и уменьшению порогового напряжения, что может быть связано с увеличением количества активных частиц, обеспечивающих протекание реакции окисления.

Результаты работы могут использоваться при разработке технологических процессов изготовления наноразмерных структур элементов нанoeлектроники.

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. 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.
4. Официальный сайт ЗАО «Нанотехнология - МДТ» <http://www.ntmdt.ru>.
5. МВИ 14-2009 Методика выполнения измерений геометрических параметров массивов оксидных наноразмерных структур методом атомно-силовой микроскопии.
6. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology // 3rd edition, 2010. – 1964 p.

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

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Смирнов Владимир Александрович

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; к.т.н.; доцент.

Солодовник Максим Сергеевич

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Авилов Вадим Игоревич

E-mail: Avir89@yandex.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Smirnov Vladimir Alexandrovich

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Solodovnik Maksim Sergeevich

E-mail: solodovnikms@mail.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Avilov Vadim Igorevich

E-mail: Avir89@yandex.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

УДК 621.373.8.002

О.А. Агеев, Ю.Н. Варзарёв, А.В. Рукомойкин, М.С. Солодовник

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМТ-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs
ДЛЯ СВЧ-ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
КОМПЛЕКСЕ НАНОФАБ НТК-9**

Различные типы гетероструктур с селективным легированием на основе GaAs для создания приборов СВЧ-электроники были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии, реализованным в составе сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9. НЕМТ-структуры оптимизированной конструкции имеют концентрацию $1,28 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $5465 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. В структурах типа pHEMT подвижность носителей достигает $7400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации $1,83 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. НЕМТ-структуры всех типов имеют высокую однородность и воспроизводимость параметров.

Молекулярно-лучевая эпитаксия; GaAs; гетероструктуры; НЕМТ; pHEMT.

O.A. Ageev, Yu.N. Varzarev, A.V. Rukomoykin, M.S. Solodovnik

**OBTAINING AND INVESTIGATION OF HEMT-STRUCTURE BASED
ON GaAs FOR ULTRA HIGH FREQUENCY FIELD EFFECT TRANSISTORS
AT NANOTECHNOLOGICAL SYSTEM NANOFAB NTF-9**

Different types of heterostructures with selective doping based on GaAs for making microwave electronics was obtain by method molecular-beam epitaxy, integrated in consist ultrahigh-vacuum nanotechnological system NANOFAB NTF-9. HEMT structure of optimized construction