

В.С. Климин**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ
ЛОКАЛЬНЫМ АНОДНЫМ ОКИСЛЕНИЕМ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ
ТРАВЛЕНИЕМ**

Основной целью работы являлось исследование режимов обработки и профилирования структур на основе арсенида галлия комбинацией методов локального анодного окисления и методом комбинированного плазмохимического травления с учетом напряжения формирования оксидного маскирующего слоя и времени травления. В данной работе для обработки приповерхностных структур на основе арсенида галлия использовалась комбинация методов локального анодного окисления и плазмохимического травления. Локальное анодное окисление проводилось посредством сканирующей зондовой микроскопии с применением кремниевого зонда. Плазмохимическая обработка осуществлялась в разряде комбинированной плазмы с использованием двух типов разряда емкостного и индуктивно-связанного. Данная технология позволяет объединить достоинства двух типов разрядов. Высокая концентрация электронов и ионов обеспечивают высокую скорость травления, а емкостной разряд позволяет направлять полученные ионы по полю и направлять их перпендикулярно к обрабатываемой подложке, позволяет снизить затраты энергии на производство, а также повысить выход годных изделий, что приводит к уменьшению себестоимости приборов, основанных на данной технологии. Избавляясь от операций, связанных с жидкостной литографией снижается относительная токсичность процессов нанопрофилирования. Локальное анодное окисление было использовано для получения оксидного слоя толщиной $6,6 \pm 0,2$ нм, который служит в качестве маскирующего покрытия для последующего плазмохимического травления. Шероховатость поверхности после удаления оксидного слоя составила $0,51 \pm 0,09$ нм. Рассмотрено применение для наноразмерного профилирования комбинированного плазменного разряда с использованием двух типов разряда - емкостного и индуктивно-связанного, что позволяет объединить достоинства обоих типов разрядов. Высокая концентрация электронов и ионов обеспечивают высокую скорость травления, а емкостной разряд позволяет ориентировать полученные ионы по полю и направлять их перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Проведены исследования влияния режимов травления на морфологию поверхности и параметры наноразмерных структур. Получены зависимости высоты оксидных структур от напряжения формирования и толщины оксидного слоя.

Нанотехнологии; атомно-силовая микроскопия; арсенид галлия; наноструктуры; локальное анодное окисление; плазмохимическое травление; наноматериалы; планарные технологии; низкотемпературная плазма.

V.S. Klimin**FORMATION OF NANOSCALE STRUCTURES OF GALLIUM ARSENIDE
BY LOCAL ANODIC OXIDATION AND PLASMA-CHEMICAL ETCHING**

The main goal of the work was to study the modes of processing and profiling structures based on gallium arsenide by a combination of local anodic oxidation methods and the combined plasma chemical etching method taking into account the formation voltage of the oxide masking layer and the etching time. In this paper, a combination of local anodic oxidation and plasma-chemical etching was used to treat near-surface structures based on gallium arsenide. Local anodic oxidation was carried out by means of scanning probe microscopy using a silicon probe. Plasma chemical treatment was carried out in a discharge by a combined plasma using two types of capacitive and inductively coupled discharge. This technology allows you to combine the advantages of two types of categories. The high concentration of electrons and ions provides a high etching rate, and the capacitive discharge allows the ions to be guided along the field and directed perpendicular to the substrate to be treated, allows to reduce energy costs for production, and also

to increase the yield of suitable products, which leads to a reduction in the cost of devices based on this technology. Eliminating the operations associated with liquid lithography reduces the relative toxicity of processes. Local anodic oxidation was used to obtain an oxide layer of thickness 6.6 ± 0.2 nm, which serves as a masking coating for subsequent plasma chemical etching. The surface roughness after removal of the oxide layer was 0.51 ± 0.09 nm. The application of a combined plasma discharge for nano sized profiling with the use of two types of discharge - capacitive and inductively coupled, which allows combining the advantages of both types of discharges is considered. A high concentration of electrons and ions ensures a high etching rate, and a capacitive discharge allows you to orient the ions obtained along the field and direct them perpendicular to the surface being treated. The influence of etching modes on surface morphology and parameters of nanoscale structures is studied. Dependences of the height of oxide structures on the formation stress and the thickness of the oxide layer are obtained.

Nanotechnology; atomic force microscopy; gallium arsenide; nanostructures; local anodic oxidation; plasma chemical etching; nanomaterials; planar technology, low-temperature plasma.

Введение. Повышенный интерес к устройствам оптоэлектроники ускорил развитие передовых технологий обработки полупроводниковых структур на основе GaAs. Освоение технологии селективного травления GaAs по сравнению к AlGaAs было ключевым процессом для формирования электронных устройств на основе GaAs, например, таких как гетеропереходных биполярных транзисторов (HBT) и транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) [1–10].

Наиболее распространенным способом формирования рельефа на поверхности структур на основе GaAs является способ реактивного ионного травления. Данный метод основан на использовании высокой энергии ионов, что приводит к разрушению связей в молекулах и десорбции распыленных продуктов травления с поверхности. Данный метод является весьма эффективным, однако из-за высоких энергий ионов, данное воздействие может нанести вред структуре, что приводит к ухудшению электрических и оптических характеристик готовых устройств [11–13]. При уменьшении энергии ионов или увеличении химической активности в плазме значительно замедляются темпы роста или ухудшается аспектное отношение профиля, который значительно ограничивает применение данных структур. В связи с этим актуальной задачей является поиски режимов формирования наноразмерного рельефа, которые сочетают в себе высококачественные характеристики травления, таких как (шероховатость вытравленной поверхности, высокое аспектное отношение) с низким уровнем повреждений наносимых плазменной обработкой. Одним из перспективных решений данной задачи является использование комбинированного плазменного разряда реактивного ионного травления и индуктивно связанной плазмы. Комбинирование двух типов разрядов позволяет значительно улучшить характеристики травления, это связано с повышенной плотностью плазмы, которая на 2–4 порядка выше, что улучшает эффективность разрыва связей III–V, скорость распыления и десорбцию продуктов травления, образующихся на поверхности [14–16]. Основными преимуществами данной системы являются контроль энергии ионов и их плотности, отдельно от емкостного разряда, что приводит к наименьшим повреждениям поверхности структуры и то, что смещение постоянного тока контролируется отдельно от источника плазмы, что обеспечивает больший контроль над параметрами травления. Данные достоинства позволяют обеспечить необходимую однородность плазмы, но большой плотности при низкой стоимости эксплуатации, что является весьма важным фактором в производстве современных устройств микро- и нанoeлектроники [17–18].

Применение процесса плазмохимического травления для наноразмерного профилирования поверхности совместно с нежидкостной модификацией поверхности позволяет избавить процесс производства устройств микро- и нанoeлектроники от жидкостных фоторезистивных материалов и отравителей [26–25]. Одним из таких способов модификации поверхности является метод локального анодного

окисления. Данная методика позволяет получать наноразмерные оксидные структуры на поверхности подложки, служащие маскирующим покрытием для последующего плазмохимического травления. Топологические нормы элементов определяются радиусом зонда для локального анодного окисления [19–20].

Целью работы являлось исследование режимов обработки и профилирования структур на основе арсенида галлия комбинацией методов локального анодного окисления и методом комбинированного плазмохимического травления с учетом напряжения формирования оксидного маскирующего слоя и времени травления.

Методическая часть. В данной работе для обработки приповерхностных структур на основе арсенида галлия использовалась комбинация методов локального анодного окисления и плазмохимического травления. Локальное анодное окисление проводилось посредством сканирующей зондовой микроскопии с применением кремниевого зонда. Плазмохимическая обработка осуществлялась в разряде комбинированной плазме с использованием двух типов разряда емкостного и индуктивно-связанного. Данная технология позволяет объединить достоинства двух типов разрядов. Высокая концентрация электронов и ионов обеспечивают высокую скорость травления, а емкостной разряд позволяет направлять полученные ионы по полю и направлять их перпендикулярно к обрабатываемой подложке, позволяет снизить затраты энергии на производство, а также повысить выход годных изделий, что приводит к уменьшению себестоимости приборов, основанных на данной технологии. Избавляясь от операций, связанных с жидкостной литографией снижается относительная токсичность процессов нанопрофилирования.

Модифицирование поверхности проводилось при помощи атомно-силовой микроскопии на поверхности химически очищенных подложек был образован тонкий слой оксида. Оксидные наноструктуры были сформированы при передвижении зонда микроскопа со скоростью 2,5 мкм/сек, относительная влажность камеры составляла 90 %, число активных частиц (ионов кислорода и гидроксильных групп) контролировалось вариацией напряжением формирования от 6 до 10 В, ток цепи обратной связи Set Point, характеризующий амплитуду колебания кантилевера в полуконтактном режиме, равнялся 1 нА.

Полученные оксидные наноструктуры использовались в качестве маскирующих слоев при проведении плазмохимического травления на установке STE ICPe68. Реакционным газом являлся боратрихлорид (BCl_3), имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими хлорсодержащими газами при процессах плазмохимической обработки структур на основе арсенида галлия. Давление газовой атмосферы газов в реакторе составляло 1 Па. Скорость потока буферного газа-транспорта, позволяющего повысить управляемость процесса за счет снижения потенциал ионизации $N_{\text{Ar}} - 100 \text{ см}^3/\text{мин}$. Мощность источника индуцировано-связанной плазмы составила $W_{\text{ICP}} - 400 \text{ Вт}$, мощность источника емкостной плазмы, отвечающего за реактивное ионное распыление составила $W_{\text{RIE}} - 20 \text{ Вт}$ напряжении смещения $U_{\text{bias}} = 85 \text{ В}$. Скорость потока рабочего хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} - 15 \text{ см}^3/\text{мин}$. Время травления t эксперимента варьировалась от составляло 0,5 до 2 минут.

Контроль поверхности осуществлялся посредством зондовой нанолаборатории NTegra. АСМ - изображения обрабатывались с помощью специализированного программного пакета «Image Analysis», так же с помощью данного программного обеспечения были получены профиллограммы, по которым определялась высота полученных наноструктур.

Результаты и их обсуждения. При применении данной технологии необходимо учитывать, что после локального анодного окисления на обработанной поверхности образуется оксидный слой. Проведены исследования толщины данного образующегося оксидного слоя, а также шероховатость поверхности после удаления данного ок-

сидного слоя, так как эта область будет являться поверхностью готовых наноструктур. АСМ-изображения с образованным оксидом и поверхностью с удаленным после локального анодного окисления оксидным слоем показаны на рис. 1.

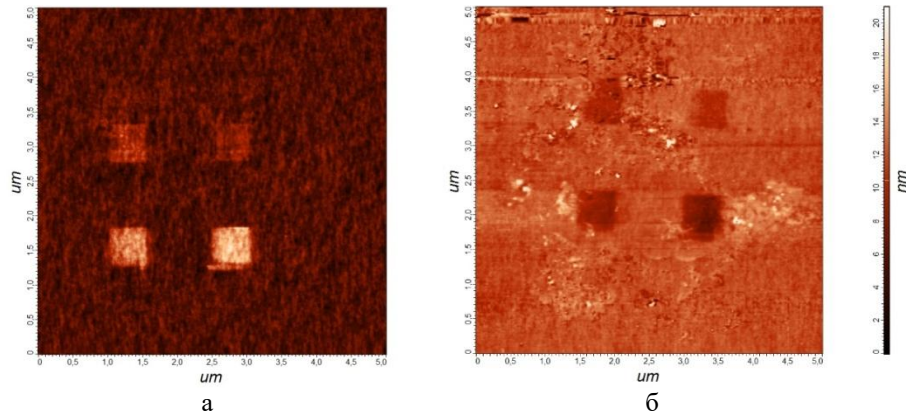


Рис. 1. АСМ-изображение (а) после локального анодного окисления и (б) те же структуры с удаленным оксидным слоем

Толщина полученного оксидного слоя составила $h_o = 6,6 \pm 0,2$ нм, высота оксидного слоя над поверхностью необработанной области поверхности GaAs составила $h_n = 2,7 \pm 0,09$ нм, толщина оксидного слоя, находящейся ниже необработанной поверхности составила $h_u = 3,9 \pm 0,14$ нм. При дальнейшей реализации технологического процесса необходимо учитывать размеры оксидных слоев на поверхности структур. Также большое значение имеет шероховатость поверхности под оксидным слоем. Значение шероховатости должно иметь допустимые значения для формирования устройств микро- и нанoeлектроники, в данном эксперименте оно составило $S_d = 0,51 \pm 0,09$ нм.

Далее после проведения модификации локальным анодным окислением проводилась плазмохимическая обработка. АСМ-изображения структур после плазмохимического травления показаны на рис. 2.

Полученные экспериментальные данные были обработаны и построены зависимости высоты полученных структур от различных напряжений формирования оксидной модифицированной поверхности, при различных временах плазмохимической обработки, показанные на рис. 3.

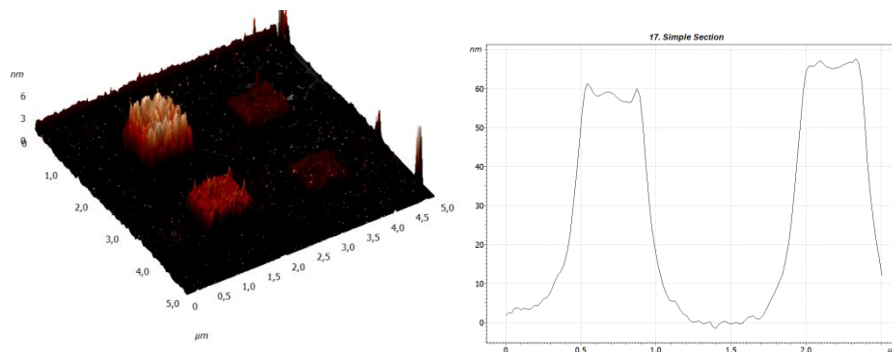


Рис. 2. АСМ-изображение и профиллограмма полученной структуры после плазмохимического травления

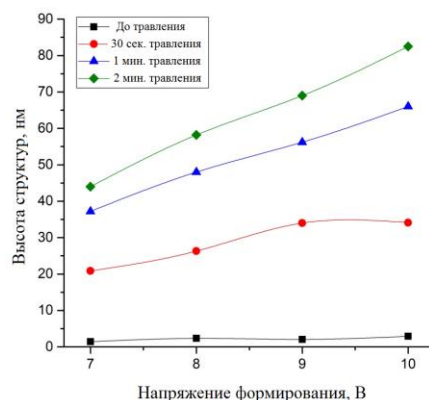


Рис. 3. Зависимость высоты наноструктур от напряжения формирования и времени плазмохимической обработки

Из полученных зависимостей видно, что высота структур напрямую зависит от толщины оксидного слоя, который является маскирующим, а также от времени плазмохимического травления.

Заключение. В данной работе проведены экспериментальные исследования по влиянию режимов формирования маскирующего покрытия для последующего плазмохимического травления, методом локального анодного окисления. Показано, что поверхность после удаления оксида имеет низкую шероховатость, пригодную, для формирования наноразмерных структур на основе GaAs.

В работе получены результаты экспериментальных исследований зависимости высоты структур от напряжения формирования маскирующего оксидного покрытия для различных времен плазмохимической обработки.

Данные зависимости показали, что имеется прямая зависимость высоты структур от толщины оксидного слоя на поверхности подложки арсенида галлия и от напряжения формирования такого слоя соответственно. Так же на высоту структур влияет время травления, однако при наибольшем времени травления возростала и шероховатость вытравленной поверхности.

По результатам проведенных экспериментальных исследований, представляется возможным разработка оптимальных режимов формирования наноразмерных структур, которые позволят, контролировать высоту структур, аспектное отношение и шероховатость обработанной поверхности.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев О.А., Федотов А.А., Ильин О.И., Климин В.С. Получение наноразмерных структур и материалов на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 203.
2. Агеев О.А., Сюрик Ю.В., Климин В.С., Федотов А.А. Получение нанокомпозитных полимерных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, на основе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90) – С. 135-142.
3. Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Колодийцев А.С., Федотов А.А. Исследование режимов формирования и модификации ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 69-77.

4. Ageev O.A., Alyab'eva N.I., Ilyin O.I., Klimin V.S., Fedotov A.A., Polyakov V.V. Исследование режимов формирования каталитических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – С. 159.
5. Ageev O.A., Zolotarev D.V., Klimin V.S., Cherednichenko D.I. Изучение закономерностей роста углеродных нанотрубок при плазменно-химическом осаждении из газовой фазы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 61-68.
6. Klimin V.S., Ageev O.A., Ilyin O.I., Fedotov A.A. Исследование режимов получения каталитических структур из пленки Ni для выращивания углеродных нанотрубок // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 222-225.
7. Ageev O.A., Kolomyitsev A.S., Михайличенко А.В., Смирнов В.А., Пташник В.В., Солодовник М.С., Федотов А.А., Замбург Е.Г., Klimin V.S., Ilyin O.I., Громов А.Л., Рукомойкин А.В. Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
8. Ageev O.A., Ilyin O.I., Klimin V.S., Коноплев Б.Г., Федотов А.А. Исследование режимов формирования каталитических центров для выращивания ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 226-231.
9. Lim W.T., Baek I.G., Jung P.G., et al. Investigation of GaAs dry etching in a planar inductively coupled BCl_3 plasma // J Electrochem Soc. – 2004; 151:G163-G166.
10. Смирнов В.А. Зондовые нанотехнологии элементов резистивной памяти на основе мемристорных структур // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 4 (189). – С. 158-169.
11. Pearton S.J., Abernathy C.R., Ren F., et al. Dry and wet etching characteristics of InN, AlN and GaN deposited by ECR metalorganic MBE // J Vac Sci Technol A. – 1993; 11: 1772-5.
12. Braga N., Mickevicius R., Gaska R., et al. Simulation of gate lag and current collapse in GaN FET // Appl Phys Lett. – 2004; 85: 4780-2.
13. Klimin V.S., Еськов А.В., Петров Н.Н. Исследование влияния режимов плазмохимического травления поверхности арсенида галлия в плазме $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 9 (170). – С. 6-14.
14. Ageev O.A., Klimin V.S., Solodovnik M.S., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. The study of influence of the gas flow rate to etched layer thickness, and roughness of the anisotropy field of gallium arsenide is etched in the plasma chemical etching process // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741, No. 1. – P. 012178.
15. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Smirnov V.A., Eskov A.V., Tominov R.V., Ageev O.A. A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Ser. "International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016" 2016. – P. 102241Z.
16. Klimin V.S. Исследование влияния режимов профилирования поверхности структур на основе арсенида галлия методом плазмохимического травления с учетом потока хлорсодержащего газа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 4 (189). – С. 169-178.
17. Tominov R.V., Bepoludin V.V., Klimin V.S., Smirnov V. A. and Ageev O.A. Profiling of nanostructures by scratching probe nanolithography and plasma chemical etching // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 256. – P. 012023.
18. Klimin V.S., Tominov R.V., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. and Ageev O.A. The influence of the chemical and physical component of the plasma etching of the surface of gallium arsenide on the etching rate in the chloride plasma of the combined discharge // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 092005.
19. Ageev O.A., 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.
20. Ageev O.A., Solodovnik M.S., et al. Effect of GaAs native oxide upon the surface morphology during GaAs MBE growth // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741, No. 1. – P. 012012.

REFERENCES

1. Ageev O.A., Fedotov A.A., Il'in O.I., Klimin V.S. Poluchenie nanorazmernykh struktur i materialov na osnove notekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanoscale structures and materials based on nanotechnologies complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 1 (78), pp. 203.
2. Ageev O.A., Syurik Yu.V., Klimin V.S., Fedotov A.A. Poluchenie nanokompozitnykh polimernykh materialov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanostrukturami, na osnove NANOFAB NTK-9 [Production of nanocompound polymeric materials based on multifunctional modular nanotechnological platform NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 135-142.
3. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Kolomytsev A.S., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya i modifikatsii orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD na nanotekhnologicheskom komplekse NANOFAB NTK-9 [Research modes of the formation and modification oriented arrays of carbon nanotubes by pecvd on nanotechnological complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 69-77.
4. Ageev O.A., Alyab'eva N.I., Il'in O.I., Klimin V.S., Fedotov A.A., Polyakov V.V. Issledovanie rezhimov formirovaniya kataliticheskikh tsentrov dlya vyrashchivaniya orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok [The study of the modes of formation of catalytic centers for growing oriented arrays of carbon nanotubes], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2009, pp. 159.
5. Ageev O.A., Zolotarev D.V., Klimin V.S., Cherednichenko D.I. Izuchenie zakonomernostey rosta uglerodnykh nanotrubok pri plazmenno-khimicheskom osazhdenii iz gazovoy fazy [Study of regularities of growth of carbon nanotubes by plasma-chemical deposition from the gas phase], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 61-68.
6. Klimin V.S., Ageev O.A., Il'in O.I., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov polucheniya kataliticheskikh struktur iz plenki Ni dlya vyrashchivaniya uglerodnykh nanotrubok [The study of modes of obtaining the catalytic structures of the film Ni for growing carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 222-225.
7. Ageev O.A., Kolomytsev A.S., Mikhaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomoykin A.V. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanoscale structures on the basis of nanotechnological complex NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
8. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Konoplev B.G., Fedotov A.A. Issledovanie rezhimov formirovaniya kataliticheskikh tsentrov dlya vyrashchivaniya orientirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD [Study of the modes of formation of catalytic centers for the cultivation of oriented arrays of carbon nanotubes by PECVD], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2011, Vol. 13, No. 2, pp. 226-231.
9. Lim W.T., Baek I.G., Jung P.G., et al. Investigation of GaAs dry etching in a planar inductively coupled BCl₃ plasma, *J Electrochem Soc.*, 2004; 151:G163-G166.
10. Smirnov V.A. Zondovye nanotekhnologii elementov rezistivnoy pamyati na osnove memristornykh struktur [Probe nanotechnology of elements of resistive memory based on memristor structures], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 158-169.
11. Pearton S.J., Abernathy C.R., Ren F., et al. Dry and wet etching characteristics of InN, AlN and GaN deposited by ECR metalorganic MBE, *J Vac Sci Technol A*, 1993; 11: 1772-5.
12. Braga N., Mickevicius R., Gaska R., et al. Simulation of gate lag and current collapse in GaN FET, *Appl Phys Lett*, 2004; 85: 4780-2.

13. Klimin V.S., Es'kov A.V., Petrov N.N. Issledovanie vliyaniya rezhimov plazmokhimicheskogo travleniya poverkhnosti arsenida galliya v plazme $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$ [Research of influence of modes of plasma-chemical etching of the surface of the gallium arsenide in the plasma of a $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 6-14.
14. Ageev O.A., Klimin V.S., Solodovnik M.S., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. The study of influence of the gas flow rate to etched layer thickness, and roughness of the anisotropy field of gallium arsenide is etched in the plasma chemical etching process, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No. 1, pp. 012178.
15. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Smirnov V.A., Eskov A.V., Tominov R.V., Ageev O.A. A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Ser. "International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016" 2016*, pp. 102241Z.
16. Klimin V.S. Issledovanie vliyaniya rezhimov profilirovaniya poverkhnosti struktur na osnove arsenida galliya metodom plazmokhimicheskogo travleniya s uchetom potoka khlorosoderzhashchego gaza [Research of influence of modes of surface profiling of structures based on gallium arsenide by plasma etching with consideration of the flow of the chlorine-containing gas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 169-178.
17. Tominov R.V., Bespoludin V.V., Klimin V.S., Smirnov V. A. and Ageev O.A. Profiling of nanostructures by scratching probe nanolithography and plasma chemical etching, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 256, pp. 012023.
18. Klimin V.S., Tominov R.V., Eskov A.V., Krasnoborodko S.Y. and Ageev O.A. The influence of the chemical and physical component of the plasma etching of the surface of gallium arsenide on the etching rate in the chloride plasma of the combined discharge, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 917, pp. 092005.
19. Ageev O.A. Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Study of modes of formation of oxide nanoscale structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
20. Ageev O.A., Solodovnik M.S., et al. Effect of GaAs native oxide upon the surface morphology during GaAs MBE growth, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No. 1, pp. 012012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Климин Виктор Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е»; тел.: 88634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Klimin Viktor Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: kliminv.s@mail.ru; 2, Shevchenko street, build. "E", Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.38-022.533

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-75-84

О.И. Ильин

БИОМИМИЧЕСКИЕ АДГЕЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Представлены результаты исследований закономерностей влияния режимов выращивания углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на геометрические размеры и адгезионные свойства массивов нанотрубок. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния времени активации, мощности плазмы, температуры и времени роста на параметры углеродных нанотрубок. Показано, что выдержка в плазме аммиака приводит к травлению каталитических центров Ni и уменьшению их диамет-