

Раздел I. Нанoeлектроника

УДК 389.159

В.С. Климин, А.В. Еськов, Н.Н. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ПЛАЗМЕ $BCL_3/AR/SF_6$ *

Рассмотрены проблемы плазмохимического травления структур на основе арсенида галлия. Проанализированы характерные особенности данной технологии, показано, что плазмохимический метод по сравнению с жидкостным травлением является высокой анизотропией процесса и отсутствие необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах. Для экспериментального исследования взаимодействия GaAs с индуктивно связанной плазмой использовался цилиндрический проточный плазмохимический реактор. Давление смеси плазмообразующих газов составляло 2 Па. В качестве экспериментальных образцов были использованы фрагменты пластин GaAs, имеющие поверхность после стандартной жидкостной полировки. Подготовка подложки арсенида галлия заключалась в том, что на поверхности наносился рисунок из защитной маски плазмостойкого фоторезиста. Проведено исследование влияния мощности различных источников плазмы на толщину вытравленного слоя при травлении поверхности арсенида галлия плазмохимическим методом в среде технологических газов $BCL_3/AR/SF_6$. Проведен анализ поверхности методом атомно-силовой микроскопии, изучена шероховатость вытравленной поверхности. Показано, что при больших значениях мощности источника индуктивно связанной плазмы толщина вытравленного слоя увеличивается, что связано с большим количеством частиц, отвечающих за образование летучих соединений с продуктами реакций реакционно-ионного травления. Также было показано, что скорость травления арсенида галлия с течением времени при увеличении мощности, а соответственно и напряжения смещения возрастает. Было установлено, что при увеличении мощности источника индуктивно связанной плазмы шероховатость остается относительно постоянной, а при изменениях мощности источника емкостной плазмы увеличивается средняя квадратичная шероховатость вытравленной поверхности.

Нанотехнологии; наноструктуры; наноматериалы; арсенид галлия; плазмохимическое травление; планарные технологии; атомно-силовая микроскопия.

V.S. Klimin, A.V. Eskov, N.N. Petrov

STUDY EFFECT OF PLASMA ETCHING GALLIUM ARSENIDE SURFACE IN PLASMA OF $BCL_3/AR/SF_6$

This article deals with the problems of plasma chemical etching of structures based on gallium arsenide. Analyzed the characteristics of the technology, it is shown that the plasma-chemical method in comparison with the liquid is high anisotropy etching process and the absence of the need for additional steps for removing the reaction products from the surface and outside of impurities contained in the initial reagents. For the experimental investigation of the interaction of GaAs with a inductively coupled plasma used cylindrical flow plasma chemical reactor. The pressure of a mixture of plasma-forming gas was 2 Pa. As experimental samples were used fragments GaAs wafers, having

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 15-19-10006).

a standard liquid surface after polishing. Preparation of the substrate of gallium arsenide was that the surface was applied a pattern of a protective mask of photoresist plazmostoykogo. The influence of different power sources, the thickness of the plasma etched layer by etching the surface of gallium arsenide by the plasma chemical environment of process gases $BCl_3/Ar/SF_6$. The analysis of the surface by atomic force microscopy, the etched surface roughness was studied. It is shown that for large power source inductively coupled plasma etched layer thickness increases, due to the large number of particles, are responsible for the formation of volatile compounds from the reaction products of reactive-ion etching. It was also shown that the rate of etching of GaAs over time with increasing power, and thus the bias voltage increases. It was found that when the power source is inductively coupled plasma burr remains relatively constant, and changes in capacitance of the plasma source power increases the rms roughness of the etched surface.

Nanotechnology; nanostructures; nanomaterials; gallium arsenide; plasma etching; planar technolog ; atomic force microscopy.

Введение. Полупроводниковые соединения группы АЗВ5 являются одними из наиболее перспективных материалов в твердотельной электронике [1–5]. Область применения этих материалов чрезвычайно широка: от дискретных диодов до приборов на гетеропереходах [6–10]. Основными областями применения этого ряда соединений и твердых растворов на их основе является производство широкого спектра светоизлучающих диодов [11–14].

Одной из многочисленных проблем в технологии создания твердотельных электронных устройств на основе соединения АЗВ5 является поиск эффективных способов обработки и травления поверхности монокристаллов, которые обеспечили бы требуемое качество поверхности (минимальную микрошероховатость и дефектность), неизменность химического состава поверхности перед формированием очередного слоя гетероструктуры и возможность управления этими характеристиками [15–18]. Одним из перспективных методов травления подобных структур является метод плазменного травления. Преимуществом данного метода по сравнению с жидкостным травлением является высокая анизотропия процесса и отсутствие необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах [19–21].

Целью данной работы являлось исследование влияния режимов плазмохимического травления поверхности арсенида галлия в плазме смеси газов BCl_3/Ar .

Методическая часть. Для экспериментального исследования взаимодействия GaAs с индуктивно связанной плазмой использовался цилиндрический проточный плазмохимический реактор. Давление смеси плазмообразующих газов составляло 2 Па. В процессах использовались газы из баллонов с маркой «ОСЧ».

Для проведения плазмохимического травления использовалась установка STE ICPe68. Диаметр обрабатываемых пластин – до 100 мм, с возможностью использования образцов произвольной формы, что позволяет применять платформу как для прикладных исследований и разработок, так и для производственного выпуска продукции. Установка оснащена реактором с продуманной системой подачи газов, позволяет оптимизировать однородность проведения процессов и снизить время откачки, также в установке предусмотрено гелиевое охлаждение для длительных процессов травления [22].

В качестве экспериментальных образцов были использованы фрагменты пластин GaAs, имеющие поверхность после стандартной жидкостной полировки. Подготовка подложки арсенида галлия заключалась в том, что на поверхности наносился рисунок из защитной маски плазмостойкого фоторезиста.

Контроль поверхности после обработки в плазме проводился посредством зондовой нанолaborатории NTegra с использованием «полуконтактного» режима. Перед проведением измерений на микроскопе фоторезистивная маска удалялась.

Травление экспериментальных образцов проводилось в два этапа. На первом этапе исследовалось влияние мощности источника индуктивно связанной плазмы, при постоянной мощности $W_{\text{РИТ}} = 35$ Вт. На втором этапе выявлялось влияние мощности источника емкостной плазмы обеспечивающей реактивное ионное травление, при постоянной мощности $W_{\text{ИСП}} = 300$ Вт. На каждом этапе обработка проводилась для трех групп образцов, в которых менялась мощность плазмы, в каждой группе образцы подвергались обработке в плазме в течение различного времени, все остальные параметры процесса оставались неизменными.

Примеры режимов травления на первом этапе для второй группы образцов показаны в табл. 1. В таблице также показаны измеренные результаты толщины вытравленного слоя,

Таблица 1

Режимы травления арсенида галлия плазменным методом

№	$N_{\text{ВСГЗ}}$, см ³ /мин	$N_{\text{Аг}}$, см ³ /мин	$W_{\text{ИСП}}$, Вт	$W_{\text{РИТ}}$, Вт	$U_{\text{см}}$, В	t, мин
1	10	100	400	35	101	1
2	10	100	400	35	102	2
3	10	100	400	35	104	3

где $N_{\text{ВСГЗ}}$ – потоки технологических газов; $W_{\text{ИСП}}$ – значение мощности источника индуктивно связанной плазмы; $W_{\text{РИТ}}$ – значение мощности источника ёмкостной плазмы, отвечающей за реактивно-ионное травление; $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения; t – время травления.

Результаты и их обсуждения. Для образцов, обработанных в плазме на первом этапе, были получены АСМ-изображения. По полученным АСМ-изображениям строилась профилограмма, по которой определялась глубина травления. Также с помощью специализированного пакета «Image Analysis» оценивалась шероховатость вытравленной поверхности.

На рис. 1 показано АСМ-изображение и профилограмма, полученные сканированием образца вытравленного при мощности источника индуктивно связанной плазмы $W_{\text{ИСП}} = 400$ Вт в течение $t = 2$ мин. Толщина вытравленного слоя составила $h = 28,2$ нм., средняя квадратичная шероховатость вытравленной области составила $S = 0,542$ нм.

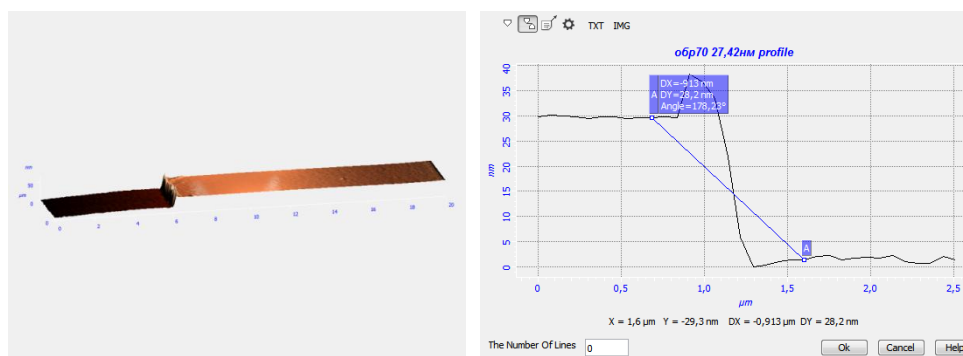


Рис. 1. АСМ-изображение и профилограмма вытравленного слоя GaAs при $W_{\text{ИСП}} = 400$ Вт

На рис. 2 показано АСМ-изображение и профилограмма, полученные сканированием образца вытравленного при мощности источника индуктивно связанной плазмы $W_{ИСП} = 200$ Вт в течение $t = 3$ минут. Толщина вытравленного слоя составила $h = 34$ нм., средняя квадратичная шероховатость вытравленной области составила $S = 0,911$ нм.

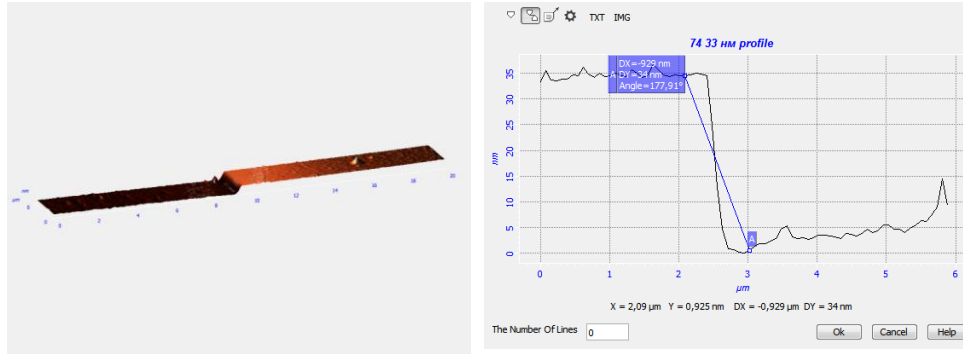


Рис. 2. АСМ-изображение и профилограмма вытравленного слоя GaAs при $W_{ИСП} = 200$ Вт

По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены зависимости толщины вытравленного слоя от времени травления для различных значений мощности источника индуктивно связанной плазмы, показанные на рис. 3.

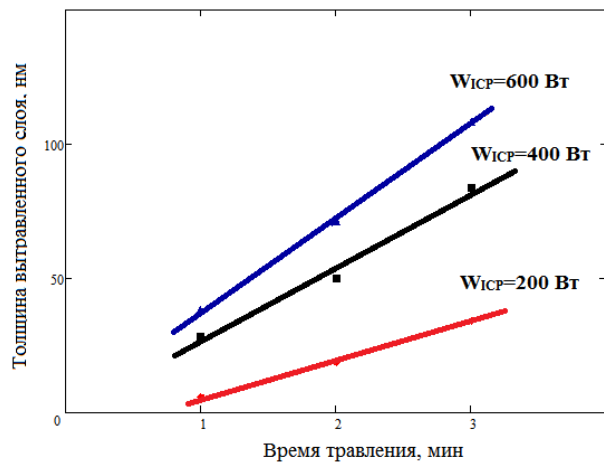


Рис. 3. Зависимость толщины вытравленного GaAs от времени

Таким образом, по результатам проведенных исследований из зависимостей, представленных на рис. 3, можно оценить скорость травления. Скорость травления арсенида галлия составила: 28,2 нм/мин, 24,9 нм/мин, 27,8 нм/мин, при значениях мощности источника индуктивно связанной плазмы 200 Вт, 400 Вт и 600 Вт соответственно.

На втором этапе оценивалась толщина вытравленного слоя по полученным АСМ-изображениям с помощью профилограммы.

На рис. 4 показано АСМ-изображение и профилограмма полученные сканированием образца вытравленного при мощности источника емкостной плазмы $W_{\text{РИТ}} = 70$ Вт в течение $t = 1$ минуты. Толщина вытравленного слоя составила $h = 480,4$ нм., средняя квадратичная шероховатость вытравленной области составила $S = 3,196$ нм. Напряжение смещения при данном режиме составило $U_{\text{см}} = 154$ В.

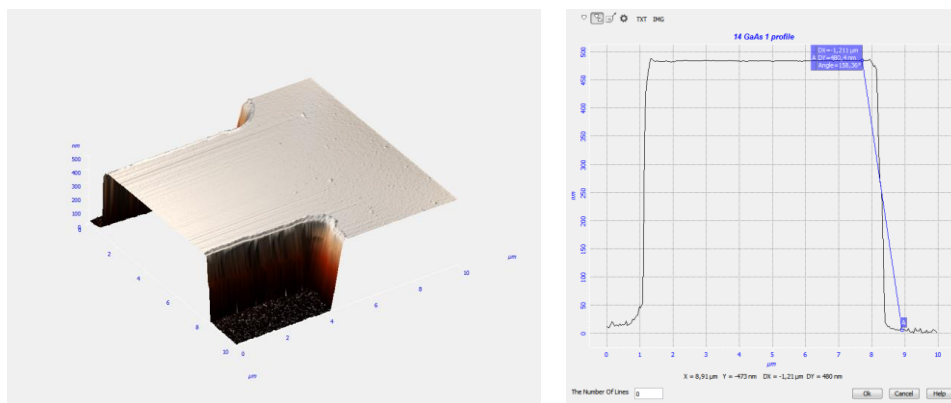


Рис. 4. АСМ-изображение и профилограмма вытравленного слоя GaAs при $W_{\text{РИТ}} = 70$ Вт

На рис. 5 показано АСМ-изображение и профилограмма, полученные сканированием образца вытравленного при мощности источника емкостной плазмы $W_{\text{РИТ}} = 10$ Вт в течение $t = 1$ минуты. Толщина вытравленного слоя составила $h = 528$ нм., средняя квадратичная шероховатость вытравленной области составила $S = 3,450$ нм. Напряжение смещения при данном режиме составило $U_{\text{см}} = 45$ В.

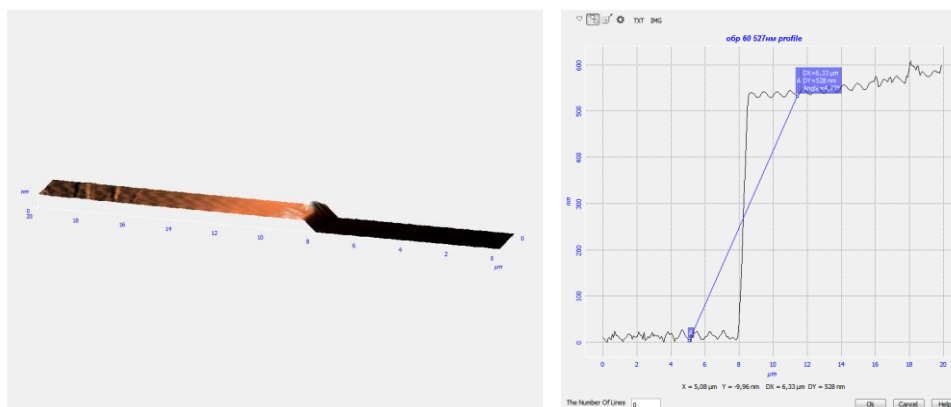


Рис. 5. АСМ-изображение и профилограмма вытравленного слоя GaAs при $W_{\text{РИТ}} = 10$ Вт

По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены зависимости толщины вытравленного слоя от времени травления для различных значений мощности источника емкостной плазмы, обеспечивающей основу реактивно-ионного травления, показанные на рис. 6.

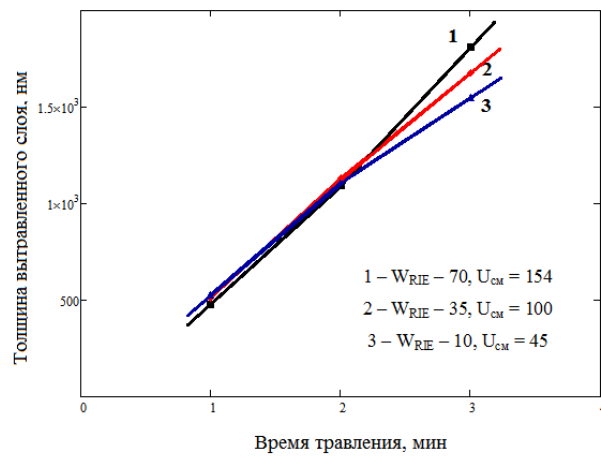


Рис. 6. Зависимость толщины вытравленного GaAs от времени, при различных значениях мощности источника емкостной плазмы

Таким образом, по результатам проведенных исследований из зависимостей, представленных на рис. 6, можно оценить скорость травления при изменении мощности источника емкостной плазмы.

Заключение. Проведено исследование влияния мощности различных источников плазмы на толщину вытравленного слоя, при травлении поверхности арсенида галлия плазмохимическим методом в среде технологических газов $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$. Показано, что при больших значениях мощности источника индуктивно связанной плазмы толщина вытравленного слоя глубже, что связано с большим количеством частиц, отвечающих за образование летучих соединений с продуктами реакций реактивно-ионного травления. Также было показано, что скорость травления арсенида галлия с течением времени при увеличении мощности, а соответственно и напряжения смещения возрастает. Было установлено, что при увеличении мощности источника индуктивно связанной плазмы шероховатость остается относительно неизменной, а при изменениях мощности источника емкостной плазмы увеличивается средняя квадратичная шероховатость вытравленной поверхности. При комбинировании режимов можно подобрать оптимальный режим травления, который позволит наиболее точно контролировать толщину вытравленного слоя и шероховатость вытравленной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. White A.M., Portecus P., Sherman W.F., Stadtmuller A.A. Photocapacitance. Measurements on Deep levels in GaAs under Hydrostatic Pressure // Solid State Phys. – 1987. – Vol. 10, No. 17. – P. 1473-1476.
2. Mircea A., Mitonmean A.A. Study of Electron Trap in Vapour Phase Epitaxial GaAs // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85, No. 2. – P. 234-247.
3. Берман А.С., Данильченко В.Г., Корольков В.И., Солдатенков Ф.Ю. Глубокоуровневые центры в легированных слоях p-GaAs, выращенных методом жидкофазной эпитаксии // ФТП. – 2000. – Т. 34. – Вып. 5. – С. 558-561.
4. Sakurai-Hiromi, Yamanaka Zusao, Yoshida Kohichi, Ohshima Naoto, Suzuki Katsuo. Ultrasonic Attenuation in p-type GaSb // G. Appl Phys. – 1984. – Vol. 56, No. 6. – P. 1613-1616.
5. Mitrokhin V.I., Rembeza S.I., Sviridov V.V., Yaroslavtsev N.P. Acoustic Probing of Deep Centers in III-V semiconductors // Phys. Status Sol. (a). – 1990. – Vol. 119, No. 2. – P. 535-544.

6. *Lagowski G, Jatos H.C., Parsey G.M., Wada K., Kaminska M., Walukiewicz W.* Origin of the 0.82 eV Electron Trap in GaAs and its Annihilation by Shallow Donors // *Appl. Phys. Letts.* – 1982. – Vol. 40, No. 4. – P. 342-344.
7. *Aronov D.A., Matatkulov V.V.* The Capacitance and Characteristics Relaxation Times in Carrier Exclusion in Compensated Semiconductors with Deep Traps and Non-Injecting Contacts // *Phys. Stat. Sol.* – 1984. – A. 81, No. 1. – P. 85-89.
8. *Агеев О.А., Варзарев Ю.Н., Солодовник М.С., Рукомойкин А.В.* Получение и исследование НЕМТ-структур на основе GaAs для СВЧ-полевых транзисторов на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 13-21.
9. *Агеев О.А., Коноплева Б.Г., Рубашкина М.В., Рукомойкин А.В., Смирнов В.А., Солодовник М.С.* Исследование влияния геометрических параметров на модуль Юнга ориентированных нитевидных нанокристаллов GaAs-методом атомно-силовой микроскопии // *Российские нанотехнологии.* – 2013. – Т. 8, № 1-2. – С. 20-25.
10. *Агеев О.А., Смирнов В.А., Солодовник М.С., Авилев В.И.* Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 8-13.
11. *Joyce B.A., Vvedensky D.D., Bell G.R., Belk J.G., Itoh M., Jones T.S.* Nucleation and growth mechanisms during MBE of III-V compounds // *Mat. Sci. Eng. B.* – 1999. – Vol. 67. – P. 7-16.
12. *LaBella V.P., Bullock D.W., Ding Z., Emery C., Harter W.G., Thibado P.M.* Monte Carlo derived diffusion parameters for Ga on the GaAs(001)-(2x4) surface: A molecular beam epitaxy-scanning tunneling microscopy study // *J. Vac. Sci. Tech. A.* – 2000. – Vol. 18, No. 4. – P. 1526-1531.
13. *Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д.* Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // *Физика и техника полупроводников.* – 1998. – Т. 32, № 4. – С. 385-410.
14. *Ohtake A., Ozeki M.* In situ observation of surface processes in InAs/GaAs(001) heteroepitaxy: The role of As on the growth mode // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – Vol. 78. – P. 431.
15. *Riel B.J., Hinzer K., Moisa S., Fraser J., Finnie P., Piercy P., Fafard S., Wasilewski Z.R.* InAs/GaAs(100) self-assembled quantum dots: arsenic pressure and capping effects // *J. Cryst. Growth.* – 2002. – Vol. 236. – P. 145-154.
16. *Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M.* Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As₂ Molecules on GaAs Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 82, No. 24. – P. 4886-4889.
17. *Shchukin V., Scholl E., Kratzer P.* Thermodynamics and Kinetics of Quantum Dot Growth // *Semiconductor Nanostructures* / ed. Bimberg D. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
18. *Daweritz L., Ploog K.* Contribution of reflection high-energy electron diffraction to nanometre tailoring of surfaces and interfaces by molecular beam epitaxy // *Semicond. Sci. Tech.* – 1994. – Vol. 9, No. 2. – P. 123-136.
19. *Frenkel J.* Theorie der Adsorption und verwandter Erscheinungen // *Zeitschrift für Physik.* – 1924. – Vol. 26, No. 1. – P. 117-138.
20. *Nakamura S.* High-power GaN p-n junction blue-light-emitting diodes // *Annu. Rev. Mater. Sci.* – 1998. – Vol. 28. – P. 125-152.
21. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Михайличенко А.В., Смирнов В.А., Пташник В.В., Солодовник М.С., Федотов А.А., Замбург Е.Г., Климин В.С., Ильин О.И., 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.
22. *Рукомойкин А.В., Солодовник М.С.* Формирование и исследование арсенид-галлиевых наноструктур на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 237-238.
23. Электронный ресурс: <http://www.semiteq.ru>.

REFERENCES

1. *White A.M., Portecus P., Sherman W.F., Stadtmuller A.A.* Photocapacitance. Measurements on Deep levels in GaAs under Hydrostatic Pressure, *Solid State Phys.*, 1987. Vol. 10, No. 17. pp. 1473-1476.

2. Mircea A., Mitonmean A.A. Study of Electron Trap in Vapour Phase Epitaxial GaAs, *J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 85, No. 2, pp. 234-247.
3. Berman A.S., Danil'chenko V.G., Korol'kov V.I., Soldatenkov F.Yu. Glubokourovnevye tsenyry v nelegirovannykh sloyakh p-GaAs, vyrashchennykh metodom zhidkofaznoy epitaksii [Glubokovodnye centers in non-alloyed layers of p-GaAs grown by liquid-phase epitaxy], *FTP [Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov]*, 2000, Vol. 34, Issue 5, pp. 558-561.
4. Sakurai-Hiromi, Yamanaka Zusao, Yoshida Kohichi, Ohshima Naoto, Suzuki Katsuo. Ultrasonic. Attenuation in p-type GaSb, *G. Appl Phys.*, 1984, Vol. 56, No. 6, pp. 1613-1616.
5. Mitrokhin V.I., Rembeza S.I., Sviridov V.V., Yaroslavtsev N.P. Acoustic Probing of Deep Centers in III-V semiconductors, *Phys. Status Sol. (a)*, 1990, Vol. 119, No. 2, pp. 535-544.
6. Lagouski G, Jatos H.C., Parsey G.M., Wada K., Kaminska M., Walukiewicz W. Origin of the 0.82 eV Electron Trap in GaAs and its Annihilation by Shallow Donors, *Appl. Phys. Letts.*, 1982, Vol. 40, No. 4, pp. 342-344.
7. Aronov D.A., Mamatkulov V.V. The Capacitance and Characteristics Relaxation Times it Carrier Exclusion in Compensated Semiconductors with Deep Traps and Non-Injecting Contacts, *Phys. Stat. Sol.*, 1984, A. 81, No. 1, pp. 85-89.
8. Ageev O.A., Varzarev Yu.N., Solodovnik M.S., Rukomoykin A.V. Poluchenie i issledovanie HEMT-struktur na osnove GaAs dlya SVCh-polevykh tranzistorov na nanotekhnologicheskom komplekse NANOFAB NTK-9 [Obtaining and investigation of HEMT-structure based on GaAs for ultra high frequency field effect transistors at nanotechnological system NANOFAB NTF-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2011, No. 4 (117), pp. 13-21.
9. Ageev O.A., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Rukomoykin A.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov na modul' Yunga orientirovannykh nitevidnykh nanokristallov GaAs metodom atomno-silovoy mikroskopii [Study of the influence of geometric parameters on young's modulus of oriented filamentary nanocrystals of GaAs by atomic force microscopy], *Rossiyskie nanotekhnologii [Nanotechnologies in Russia]*, 2013, Vol. 8, No. 1-2, pp. 20-25.
10. Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Avilov V.I. 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.
11. Joyce B.A., Vvedensky D.D., Bell G.R., Belk J.G., Itoh M., Jones T.S. Nucleation and growth mechanisms during MBE of III-V compounds, *Mat. Sci. Eng. B*, 1999, Vol. 67, pp. 7-16.
12. LaBella V.P., Bullock D.W., Ding Z., Emery C., Harter W.G., Thibado P.M. Monte Carlo derived diffusion parameters for Ga on the GaAs(001)-(2x4) surface: A molecular beam epitaxy-scanning tunneling microscopy study, *J. Vac. Sci. Tech. A*, 2000, Vol. 18, No. 4, pp. 1526-1531.
13. Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D. Geterostruktury s kvantovymi tochkami: poluchenie, svoystva, lazery [Heterostructures with quantum dots: fabrication, properties, lasers], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov]*, 1998, Vol. 32, No. 4, pp. 385-410.
14. Ohtake A., Ozeki M. In situ observation of surface processes in InAs/GaAs(001) heteroepitaxy: The role of As on the growth mode, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, Vol. 78, pp. 431.
15. Riel B.J., Hinzer K., Moisa S., Fraser J., Finnie P., Piercy P., Fafard S., Wasilewski Z.R. InAs/GaAs(100) self-assembled quantum dots: arsenic pressure and capping effects, *J. Cryst. Growth.*, 2002, Vol. 236, pp. 145-154.
16. Morgan C.G., Kratzer P., Scheffler M. Arsenic Dimer Dynamics during MBE Growth: Theoretical Evidence for a Novel Chemisorption State of As₂ Molecules on GaAs Surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 1999, Vol. 82, No. 24, pp. 4886-4889.
17. Shchukin V., Scholl E., Kratzer P. Thermodynamics and Kinetics of Quantum Dot Growth, *Semiconductor Nanostructures*, ed. Bimberg D. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
18. Daweritz L., Ploog K. Contribution of reflection high-energy electron diffraction to nanometre tailoring of surfaces and interfaces by molecular beam epitaxy, *Semicond. Sci. Tech.*, 1994, Vol. 9, No. 2, pp. 123-136.
19. Frenkel J. Theorie der Adsorption und verwandter Erscheinungen, *Zeitschrift für Physik*, 1924, Vol. 26, No. 1, pp. 117-138.

20. Nakamura S. High-power GaN p-n junction blue-light-emitting diodes, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1998, Vol. 28, pp. 125-152.
21. Ageev O.A., Kolomiitsev 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 [Nanoscale structures' production based on modular nanotechnology platform NANOFAB] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
22. Rukomoykin A.V., Solodovnik M.S. Formirovanie i issledovanie arsenid-gallievyykh nanostruktur na nanotekhnologicheskoy komplekse NANOFAB NTK-9 [Forming and investigation of arsenide gallium nanostructure at nanotechnological system NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 237-238.
23. Available at: <http://www.semiteq.ru>.

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

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

Еськов Андрей Владимирович – e-mail: aeskow@gmail.com; НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ; с.н.с.; к.т.н.

Петров Николай Наранович – e-mail: halemgoob@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

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

Eskov Andrey Vladimirovich – e-mail: aeskow@gmail.com; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Petrov Nikolay Naranovich – e-mail: halemgoob@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

УДК 621.385.21

А.М. Светличный, А.С. Коломийцев, И.Л. Житяев, О.Б. Спиридонов

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОЭМИССИОННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ГРАФЕНА НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ*

Рассмотрено изготовление наноразмерных автоэмиссионных структур методом фокусированных ионных пучков (ФИП). Показано, что применение ФИП позволяет формировать структуры автоэмиссионной электроники острийного и планарного типа, а также варьировать геометрические параметры острия в широких пределах. В качестве материалов подложки при формировании автокатодов использованы карбид кремния и плёнки графена на поверхности карбида кремния. Графен получен методом деструкции карбида кремния в вакууме. В статье рассмотрены конструкции автоэмиссионных катодов острийного и планарного типа. Отработаны режимы фор-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31162 мол_а, а также Министерства образования и науки в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание №16.1154.2014/К).