

24. Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A., Solodovnik M.S., Tsukanova O.G. Issledovanie rezhimov nanorazmernogo profilirovaniya poverkhnosti epitaksial'nykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of modes of nanoscale profiling of the surface of epitaxial structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 42-46.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

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

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

УДК 389.159

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-169-178

В.С. Климин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ
МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОТОКА
ХЛОРСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА ***

Рассмотрены проблемы профилирования поверхности структур на основе арсенида галлия для последующего эпитаксиального роста. Рассмотрено применения метода плазмохимического травления для решения данной задачи. Проанализированы характерные особенности данной технологии, показано, что плазмохимический метод травления в комбинированной плазме по сравнению с жидкостным травлением для формирования таких структур является более перспективным, благодаря высокой анизотропии процесса и отсутствию необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах. Для экспериментального исследования взаимодействия структур на основе арсенида галлия с комбинированной плазмой использовался цилиндрический проточный плазмохимический реактор, давление смеси плазмообразующих газов составляло 2 Па, которое оставалось постоянным в течении всего процесса. В данной работе проведено исследование влияния потока хлорсодержащего газа на толщину вытравленного слоя, шероховатость вытравленной поверхности, а так же анизотропию процесса по разным кристаллографическим областям. Были получены зависимости толщины вытравленного слоя от времени травления и оценены скорости травления для различных потоков хлорсодержащего газа. Проведен анализ поверхности методом атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии, изучена шероховатость вытравленной поверхности. Показано, что при больших значениях потоков хлорсодержащего газа шероховатость вытравленной области увеличивалась, что связано с большим количеством частиц, отвечающих за образование летучих соединений с продуктами реакций реактивно-ионного травления. Так же было показано, что угол отклонения от вертикали для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 15 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления $[110]$ был $\alpha_{[110]} = 65,5^\circ$; для направления $[111]$ был $\alpha_{[111]} = 45,58^\circ$. Для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10006).

[110] было $\alpha_{[110]} = 20,94^\circ$; для направления [111] был $\alpha_{[111]} = 11,37^\circ$. Для образцов, для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} - 5 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления [110] был $\alpha_{[110]} = 0,32^\circ$; для направления [111] был $\alpha_{[111]} = 0,21^\circ$.

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

V.S. Klimin

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MODES OF PROFILING THE SURFACES OF STRUCTURES BASED ON ARSENIDE OF GALLIUM BY METHOD OF PLASMA ETCHING WITH ACCOUNT OF THE CHLORINE-CONTAINING GAS FLOW

This article deals with the problems of profiling the surface of structures based on gallium arsenide for subsequent epitaxial growth. The application of the method of plasma-chemical etching to solve this problem is considered. The characteristic features of this technology are analyzed, it is shown that the plasma-chemical etching method in a combined plasma in comparison with liquid etching for the formation of such structures is more promising due to the high anisotropy of the process and the absence of the need for additional operations to remove reaction products and foreign impurities contained in the starting reagents. For an experimental study of the interaction of structures based on gallium arsenide with combined plasma, a cylindrical flow-through plasma chemical reactor was used; the pressure of the mixture of plasma-forming gases was 2 Pa, which remained constant throughout the process. In this paper, the effect of a chlorine-containing gas stream on the thickness of the etched layer, the roughness of the etched surface, as well as the anisotropy of the process over different crystallographic regions were studied. The dependence of the thickness of the etched layer on the etching time was obtained and the etching rates for various chlorine-containing gas streams were estimated. The analysis of the surface by atomic force microscopy and scanning electron microscopy was carried out, and the roughness of the etched surface was studied. It is shown that for large values of chlorine-containing gas flows, the roughness of the etched region is increased, which is associated with a large number of particles responsible for the formation of volatile compounds with products of reactions of reactive ion etching. It was also shown that the deviation angle from the vertical for samples treated with a chlorine-containing gas N_{BCl_3} of 15 cc / m for the crystallographic direction [110] was $\alpha_{[110]} = 65.5^\circ$; for the [111] direction was $\alpha_{[111]} = 45.58^\circ$. For samples treated with a flow of chlorine gas $N_{\text{BCl}_3} - 10 \text{ cc} / \text{m}$ for the crystallographic direction [110], $\alpha_{[110]} = 20.94^\circ$; for the [111] direction was $\alpha_{[111]} = 11.37^\circ$. For samples, for samples treated with a chlorine-containing gas $N_{\text{BCl}_3} - 5 \text{ cc} / \text{m}$ for the crystallographic direction [110], $\alpha_{[110]} = 0.32^\circ$; for the [111] direction was $\alpha_{[111]} = 0.21^\circ$.

Nanotechnology; nanostructures; nanomaterial; gallium arsenide; plasma etching; planar technology ; atomic force microscopy.

Введение. Актуальной задачей современной микро- и наноэлектроники является прецизионное формирование элементов микрорельефа с высоким разрешением и заданными свойствами поверхности. Полупроводниковые соединения группы АЗВ5 являются одними из наиболее перспективных материалов в твердотельной электронике [1–7]. Область применения таких материалов очень широка от дискретных диодов и приборов на гетеропереходах до квантовых точек для устройств квантовых вычислений. Основными областями применения этого ряда соединений и твердых растворов на их основе является производство широкого спектра светоизлучающих диодов [8–11]. Достоинства структур на основе GaAs могут быть реализованы в структурах с субмикронным профилированием [12–15].

Одной из многочисленных проблем в технологии создания твердотельных электронных устройств на основе соединения АЗВ5 является поиск эффективных способов обработки, профилирования и модификации поверхности. Данные тех-

нологии обработки должны обеспечивать требуемое качество поверхности, такие как минимальную шероховатость, дефектность, вертикальность стенок полученной структуры, неизменность химического состава поверхности перед формированием очередного слоя гетероструктуры и возможность управления этими характеристиками [16–19]. Одним из перспективных направлений в этой области является использование травления в комбинированной плазме газового разряда. Технология травления в комбинированной плазме позволяет получить структуры, которые обеспечивают заглубление затвора полевого транзистора. 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 [20–21]. Так же данный метод в совокупности с технологией фокусированных ионных пучков позволяет получать структуры с нанометровыми латеральными размерами.

Анализ литературных источников в области травления структур на основе GaAs показывает, что скорости и качество вытравленной поверхности существенно различаются. Это связано с применениями различных газовых смесей для травления, различными конфигурациями источников плазмы и др.

Целью данной работы является возможность профилирования, поверхности структур на основе GaAs с применением экспериментальной модели ячейки памяти на основе сжатого вертикально углеродных нанотрубок и исследовать его коммутацию резистивный с помощью атомно-силовой микроскопии.

Целью данной работы являлось исследование режимов профилирования и обработки поверхности структуры на основе арсенида галлия методом плазмохимического травления с учетом скоростей потока хлорсодержащего газа в комбинированной плазме емкостного и индуктивного разряда.

Методическая часть. В данной работе для обработки поверхности образцов использовался метод плазменного химического травления в комбинированной хлоридной плазме емкостного и индуктивно связанного разряда. Этот метод позволяет объединить два режима химического травления плазмы: реактивное ионное травление и химическое травление с образованием летучих соединений при низких температурах.

Экспериментальные исследования проводились на пластинах собственного арсенида галлия, имеющие поверхность после стандартной жидкостной полировки. Подготовка подложки арсенида галлия заключалась в нанесении защитного плазмостойкого фоторезистивного покрытия на поверхность с учетом кристаллографических осей. На очищенную поверхность GaAs методом центрифугирования на скорости 5000 об/мин наносился фоторезиста ФП-383 толщиной 13 ± 2 нм, предварительно смешанного со специализированным для данной марки фоторезиста разбавителем РПФ-383 в соотношении 1:17. Полученные образцы сушились при температуре 90°C в течение 2 минут.

Контроль поверхности после обработки в плазме проводился посредством зондовой нанолаборатории NTegra с использованием «полуконтактного» режима. Для образцов, обработанных в плазме на первом этапе, были получены АСМ-изображения. По полученным АСМ-изображениям строилась профиллограмма, по которой определялась глубина вытравленного слоя. Так же с помощью специализированного пакета «Image Analysis» оценивалась шероховатость вытравленной поверхности. Измеряя угол отклонения от вертикальности стенки вытравленной области определялась анизотропия процесса плазменного химического травления по различным кристаллографическим направлениям. Перед проведением измерений на микроскопе фоторезистивная маска удалялась.

В качестве реакционного газа использовался боратрихлорид (BCl_3), который имеет ряд преимуществ из хлорсодержащих газов в процессах плазмохимического травления структур на основе АЗВ5. Давление рабочей атмосферы газов в реакционной составило 2 Па. Мощность источника емкостной плазмы составила $W_{\text{RIE}} - 35$ Вт, напряжении смещения $U_{\text{bias}} = 102$ В, мощность источника индуктивно связанной плазма составляла $W_{\text{ICP}} - 300$ Вт, Скорость потока буферного газа-транспорта, позволяющего понизить потенциал ионизации и повысить технологичность и управляемость процесса $N_{\text{Ar}} - 100$ см³/мин. Скорость потока рабочего хлорсодержащего газа варьировалась на различных этапах эксперимента $N_{\text{BCl}_3} - 5, 10, 15$ см³/мин. Время травления на всех этапах эксперимента составляло $t = 1, 2, 3$ минуты.

Результаты и их обсуждения. Для определения степени влияния химической составляющей плазменной обработки образцов подвергалась плазмохимическому травлению при различных потоках хлорсодержащего газа, при постоянных мощностях источников индуктивно связанной и емкостной плазмы, температуре и давлении в реакторе.

На рис. 1 показаны РЭМ – изображение и профиллограмма вытравленной поверхности GaAs при потоке $\text{BCl}_3 - 15$ см³/мин и времени травления 1 минута.

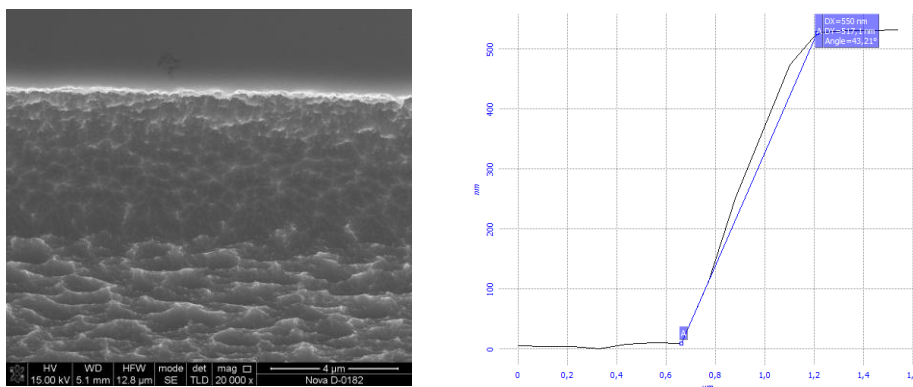


Рис. 1 РЭМ. изображение и профиллограмма вытравленной поверхности GaAs при потоке $\text{BCl}_3 - 15$ см³/мин и времени травления 1 минута

На рис. 2 показана зависимость толщины вытравленного слоя от времени травления для различных потоков хлорсодержащего газа.

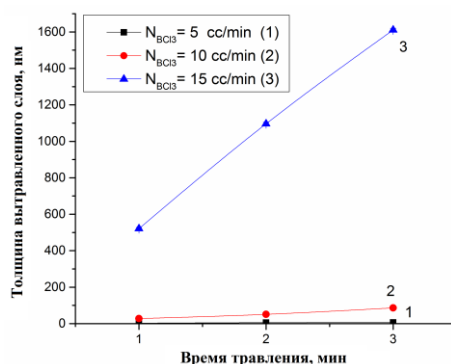


Рис. 2. Зависимость толщины вытравленного слоя от времени травления для различных потоков хлорсодержащего газа

Оценочная скорость плазмохимического травления арсенида галлия составила: 2,6 нм/мин, 28,2 нм/мин, 537,4 нм/мин, при скоростях потока $N_{\text{BCl}_3} = 5 \text{ см}^3/\text{мин}$, $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $15 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно.

Зависимость шероховатости вытравленной области от времени травления для различных потоков хлорсодержащего газа показана на рис. 3.

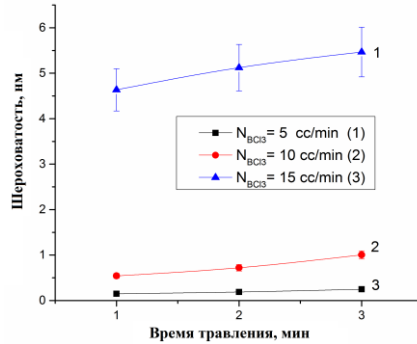


Рис. 3. Зависимость шероховатости вытравленной области от времени травления для различных потоков хлорсодержащего газа

Из полученных зависимостей можно оценить шероховатость вытравленной области, также видно, что химическое воздействие позволяет получать вытравленные структуры большого диапазона глубин с низкой шероховатостью.

Как уже говорилось во введении, анизотропия процесса является одним из важных показателей качества обрабатываемой поверхности при проводимых операциях травления.

Оценивание анизотропии процесса плазмохимического травления проводилось путем определения угла отклонения вытравленной стенки от вертикали. Такие измерения проводились для групп образцов обрабатываемых при различных потоках хлорсодержащего газа.

На рис. 4 показаны профилограммы вытравленных областей на разных кристаллографических областях для одного образца подвергнутого плазмохимическому травлению.

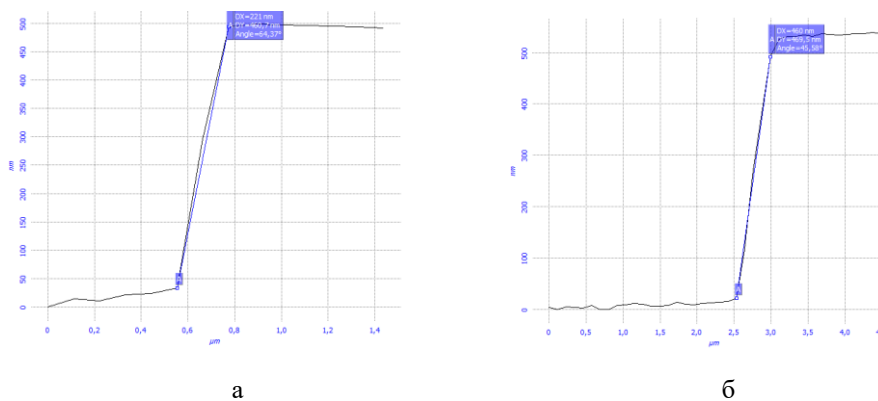


Рисунок 4 – Профилограммы стенок вытравленной области с разными кристаллографическими осями: а – кристаллографическая ось [110]; б – кристаллографическая ось [111]

Выявлено, что угол отклонения от вертикали для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 15 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления $[110]$ был $\alpha_{[110]} = 65,5^\circ$; для направления $[111]$ был $\alpha_{[111]} = 45,58^\circ$. Для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления $[110]$ было $\alpha_{[110]} = 20,94^\circ$; для направления $[111]$ был $\alpha_{[111]} = 11,37^\circ$. Для образцов, для образцов, обработанных с потоком хлорсодержащего газа $N_{\text{BCl}_3} = 5 \text{ см}^3/\text{мин}$ для кристаллографического направления $[110]$ был $\alpha_{[110]} = 0,32^\circ$; для направления $[111]$ был $\alpha_{[111]} = 0,21^\circ$.

По результатам экспериментальных данных были построены зависимости угла отклонения от вертикали от скорости потока хлорсодержащего газа для различных кристаллографических осей, показанные на рис. 5.

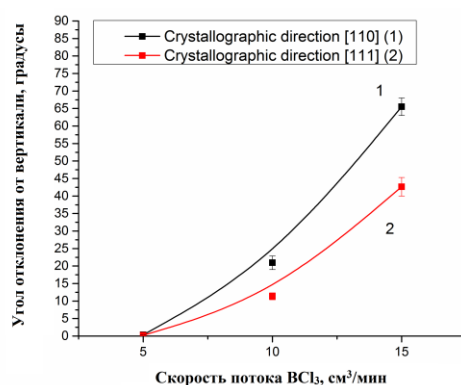


Рис. 5. Зависимости угла отклонения вытравленной стенки структуры от вертикали при различных потоках хлорсодержащего газа для различных кристаллографических осей

Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что при более низком потоке хлорсодержащего газа наблюдается наибольшая вертикальность стенок для всех кристаллографических осей. Такие режимы травления могут быть использованы для получения структур с наноразмерными латеральными параметрами. При увеличении потока хлорсодержащего газа получается пологая стенка, что позволяет при наличии различных слоев в структуре подвести электрический контакт к различным слоям данной структуры.

Заключение. В данной работе были проведены исследования по влиянию хлорсодержащего газа на толщину вытравленного слоя. Оценочные скорости травления арсенид галлиевых структур при скоростях потока $N_{\text{BCl}_3} = 5 \text{ см}^3/\text{мин}$, $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $15 \text{ см}^3/\text{мин}$, составили $2,6 \text{ нм}/\text{мин}$, $28,2 \text{ нм}/\text{мин}$, $537,4 \text{ нм}/\text{мин}$ соответственно. Показано, что при увеличении потока хлорсодержащего газа растет и скорость травления структуры, однако при этом возрастает и шероховатость вытравленной области.

Так же были получены результаты экспериментальных исследований угла отклонения вытравленной стенки структуры от вертикали для различных кристаллографических осей, при различных потоках газов. Данные зависимости показали, что при наименьших потоках газов наблюдается вертикальная стенка вытравленной структуре во всех направлениях, при увеличении потока газа, растет и химическая составляющая, что приводит к пологой стенке вытравленной области.

С учетом проведенных исследований, возможно, подобрать оптимальные режимы травления структур, которые позволят, наиболее точно контролировать толщину вытравленного слоя, шероховатость вытравленной поверхности и вертикальность полученной структуры.

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

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. Агеев О.А., Золотарев Д.В., Климин В.С., Чередниченко Д.И. Изучение закономерностей роста углеродных нанотрубок при плазменно-химическом осаждении из газовой фазы // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 61-68.
3. Агеев О.А., Ильин О.И., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А., Цуканова О.Г. Определение удельного сопротивления вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методами сканирующей зондовой микроскопии // *Журнал технической физики.* – 2015. – Т. 85, № 7. – С. 100-106.
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. Климин В.С., Агеев О.А., Ильин О.И., Федотов А.А. Исследование режимов получения каталитических структур из пленки Ni для выращивания углеродных нанотрубок // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 222-225.
6. Алексеев А.Н., Агеев О.А. и др. Тандем ЗАО «НТО» и НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ – пример успешного взаимодействия производства и науки // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* – 2016. – № 7 (157). – С. 78-83.
7. Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., 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.
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. Ильин О.И., Климин В.С., Надда М.З., Петров В.В., Рудык Н.Н., Федотов А.А., Чинь В.М., Яненко В.Ю. Исследование газочувствительных свойств пленок нанокомпозитов с углеродными нанотрубками // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 9 (170). – С. 116-136.
10. Агеев О.А., Ильин О.И., Климин В.С., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Сюрик Ю.В., Цуканова О.Г. Исследование возможности создания биомимических адгезионных покрытий на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С. 58-67.
11. Климин В.С., 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.
12. Pina Marina V., Blinov Yuriy F., Ilin Oleg I., Klimin Viktor S., Ageev Oleg A. Resistive switching of vertically aligned carbon nanotube by a compressive strain // *Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102240U (December 30, 2016).*
13. Ильин О.И., Климин В.С., Рубашкина М.В., Сергиенко К.С., Семенов А.С., Федотов А.А., Чинь Ван Мьюй, Яненко В.Ю. Термодинамический анализ взаимодействия в системе Ni-CR-Si при выращивании углеродных нанотрубок методом химического осаждения из газовой фазы // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С. 79-92.
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.* – Vol. 741, No. 1.
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. Viktor S. Klimin, Maxim S. Solodovnik, Vladimir A. Smirnov, Andrey V. Eskov, Roman V. Tominov, Oleg A. Ageev A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching // Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241Z (December 30, 2016).
17. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. и др. Исследование режимов формирования оксидных наноразмерных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 2 (94). – С. 43-50.
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. Авиллов В.И., Ageev O.A. и др. Исследование режимов наноразмерного профилирования поверхности эпитаксиальных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // Российские нанотехнологии. – 2015. – Т. 10, № 3-4. – С. 39-43.
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.
21. Ageev O.A., Колосийцев А.С., Михайличенко А.В., Smirnov V.A., Пташник В.В., Solodovnik M.S., 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., Solodovnik M.S. Формирование и исследование арсенид-галлиевых наноструктур на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 237-238.

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. Ageev O.A., Zolotarev D.V., Klimin V.S., Cherednichenko D.I. Izuchenie zakonornostey rosta uglerodnykh nanotrubok pri plazmenno-khimicheskom osazhdenii iz gazovoy fazy [Studying of laws of carbon nanotubes growth during plazmenno-chemical sedimentation from the gas phase], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 61-68.
3. Ageev O.A., Il'in O.I., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A., Tsukanova O.G. Opredelenie udel'nogo soprotivleniya vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Determination of specific resistance of vertically aligned carbon nanotubes using scanning probe microscopy], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical physics], 2015, Vol. 85, No. 7, pp. 100-106.
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. 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 [Formation and research of catalytic structures obtained from Ni films for growing carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 222-225.
6. Alekseev A.N., Ageev O.A. i dr. Tandem ZAO «NTO» i NOTs «Nanotekhnologii» YuFU – primer uspeshnogo vzaimodeystviya proizvodstva i nauki [Tandem CJSC "NTO" and REC "Nanotechnology" of southern Federal University – an example of successful cooperation of production and science], *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business], 2016, No. 7 (157), pp. 78-83.
7. 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 [The study of the modes of formation of catalytic centers for growing oriented arrays of carbon nanotubes by PECVD], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2011, Vol. 13, No. 2, pp. 226-231.

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. Il'in O.I., Klimin V.S., Nadda M.Z., Petrov V.V., Rudyk N.N., Fedotov A.A., Chin' V.M., Yanenko V.Yu. Issledovanie gazochuvstvitel'nykh svoystv plenok nanokompozitov s uglerodnymi nanotrubkami [Study of gas-sensitive properties of nanocomposite films containing carbon nanotubes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 116-136.
10. Ageev O.A., Il'in O.I., Klimin V.S., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Syurik Yu.V., Tsukanova O.G. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya biomimicheskikh adgezionnykh pokrytiy na osnove massiva vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok [The research of possibility of biomimic adhesive coverings creation based on the vertically focused carbon nanotubes massif], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 58-67.
11. Klimin V.S., Es'kov A.V., Petrov N.N. Issledovanie vliyaniya rezhimov plazmokhimicheskogo travleniya poverkhnosti arsenida galliya v plazme $\text{BCl}_3/\text{Ar}/\text{SF}_6$ [Study effect of plasma etching gallium arsenide surface in plasma of $\text{BCL}_3/\text{AR}/\text{SF}_6$], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 6-14.
12. Ilina Marina V., Blinov Yuriy F., Ilin Oleg I., Klimin Viktor S., Ageev Oleg A. Resistive switching of vertically aligned carbon nanotube by a compressive strain, *Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102240U (December 30, 2016)*.
13. Il'in O.I., Klimin V.S., Rubashkina M.V., Sergienko K.S., Semenov A.S., Fedotov A.A., Chin' Van Myoy, Yanenko V.Yu. Termodinamicheskiy analiz vzaimodeystviya v sisteme Ni-CR-Si pri vyrashchivanii uglerodnykh nanotrubok metodom khimicheskogo osazhdeniya iz gazovoy fazy [Thermodynamic analysis of interaction in the Ni-Cr-Si AT Ni-Cr-Si growth of carbon nanotubes by chemical vapor deposition], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 79-92.
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*, Vol. 741, No. 1.
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. Klimin Viktor S., Solodovnik Maxim S., Smirnov Vladimir A., Eskov Andrey V., Tominov Roman V., Ageev Oleg A. A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching, *Proc. SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, 102241Z (December 30, 2016)*.
17. Ageev O.A. Solodovnik M.S., Smirnov V.A. i dr. Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of the modes of formation of nanoscale oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of the universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
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. Avilov V.I., Ageev O.A. i dr. Issledovanie rezhimov nanorazmernogo profilirovaniya poverkhnosti epitaksial'nykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of modes of nanoscale profiling of the surface of epitaxial structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 39-43.

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.
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 NTF-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
22. Rukomoykin A.V., Solodovnik M.S. Formirovaniye i issledovaniye arsenid-gallievyykh nanostruktur na nanotekhnologicheskoy platforme NANOFAB NTK-9 [Forming and investigation of arsenide gallium nanostructure at nanotechnology system NANOFAB NTF-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 237-238.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

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.

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; associate professor; cand. of eng. sc.

УДК 621.3.049

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-178-188

Е.А. Рындин, А.А. Аль-Саман

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИНТЕГРАЛЬНОГО КОММУТАТОРА С УПРАВЛЯЕМОЙ ПЕРЕДИСЛОКАЦИЕЙ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТУННЕЛЬНО-СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ОБЛАСТЯХ

Объектом исследования является быстродействующий интегральный коммутатор с управляемой передислокацией максимума плотности электронов в туннельно-связанных квантовых областях наногетероструктуры АЗВ5. Активная область коммутатора содержит две квантовые ямы, разделенные туннельным гетеробарьером, и два управляющих перехода: управляющий переход Шоттки над верхней квантовой ямой и управляющий р-п-переход, соответственно, под нижней. Каждая из туннельно-связанных квантовых ям коммутатора имеет отдельные омические контакты, что позволяет выполнять коммутацию сигналов единым функционально интегрированным устройством, сократить площадь, занимаемую интегральным элементом на кристалле, исключить внутриэлементные металлические соединения и повысить быстродействие. Предложена схмотехническая модель интегрального коммутатора на основе туннельно-связанных квантовых ям в виде эквивалентной схемы, учитывающей возможность изменения электрофизических и геометрических параметров элемента и обеспечивающей ее применимость для анализа нелинейных электронных схем. Представлено развернутое математическое описание нелинейных источников тока предложенной схмотехнической модели. Получена аналитическая модель, описывающая среднее время передислокации электронов между туннельно-связанными квантовыми ямами интегрального коммутатора. Полученная модель легко интегрируется в современные программные средства схмотехнического моделирования электронных интегральных схем. Проведена проверка математической модели в программах Matlab и AWR (Microwave Office Environment). Полученные результаты показывают, что коммутаторы на основе туннельно-связанных квантовых ям характеризуются малым временем переключения – менее 1 пс, определяемым инерционностью