

И. И. Абрамов¹, д-р физ.-мат. наук, проф., **Н. В. Коломейцева**¹, науч. сотр.,
В. А. Лабунов¹, д-р техн. наук, акад. НАНБ, проф., гл. науч. сотр., **И. А. Романова**¹, науч. сотр.,
А. С. Басаев², канд. физ.-мат. наук, зам. директора

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

² НПК "Технологический центр", Москва, Россия
 e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Поступила в редакцию 13.12.2013

Предложена численная комбинированная модель, предназначенная для моделирования гибридных функционально-интегрированных структур, представляющих собой совмещение резонансно-туннельного диода и полевого транзистора (РТД-ПТ). С ее помощью проведено моделирование РТД—ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, функционально-интегрированная структура, комбинированная однозонная модель, численное моделирование

Введение

Возможные применения углеродных нанотрубок (УНТ) будут разнообразными вследствие их уникальных электрических, оптических, тепловых и механических свойств. Описанию теоретических и экспериментальных исследований различных свойств УНТ в настоящее время посвящены десятки монографий и обзоров (см., например, [1–4]). Среди обзоров по использованию наноматериалов для радиофизики применительно к системам радиолокации и радиосвязи отметим работу [5]. Следует подчеркнуть, что особое внимание в ней уделено именно УНТ. Судя по всему, качественно новым направлением в радиосвязи будет разработка радиоприемников на основе УНТ [5–9]. В то же время уже продемонстрированы различные электронные и фотонные приборы на основе УНТ [1–4], в частности, полевые транзисторы, диоды, биполярные транзисторы, бистабильные переключающие элементы, логические интегральные схемы, дешифраторы, лазеры, светодиоды, сенсоры и др. Так же как и в микроэлектронике, весьма перспективным представляется использование УНТ для создания функционально-интегрированных структур в нанoeлектронике [10].

Целью данной работы является моделирование такой структуры, объединяющей резонансно-туннельный диод (РТД) и полевой транзистор (ПТ) на основе единичной УНТ (в дальнейшем РТД—ПТ). Установлено, что РТД—ПТ будут обладать существенно различающимися N-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) в зависимости от хиральности используемой УНТ.

Модель

Структура исследуемого РТД—ПТ показана на рис. 1 и имеет три затвора (как в ПТ) и два контакта непосредственно к УНТ (как в РТД). При приложении напряжения к затворам в УНТ образуются области барьеров и квантовых ям. Активной областью являются области барьеров (их протяженность d_1 и d_2) и квантовой ямы (ее протяженность L_1). Пассивными областями являются области, расположенные между омическими контактами к УНТ и барьером активной области как со стороны эмиттера (ее протяженность $d_0 + L_0$), так и со стороны коллектора (ее протяженность $L_2 + d_3$).

При строгом анализе этой функционально-интегрированной структуры необходимо самосогласованно численно решать уравнение Шредингера

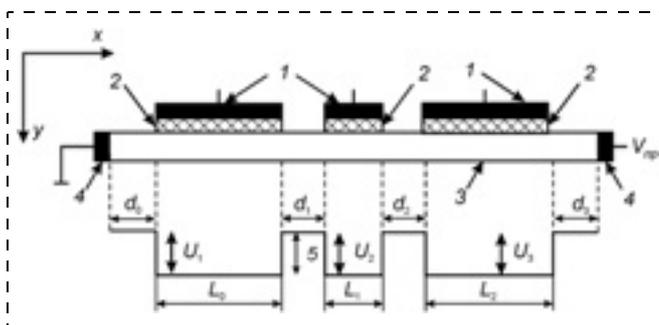


Рис. 1. Вид функционально-интегрированной структуры на основе УНТ и энергетическая диаграмма зоны проводимости:

1 — контакты затворов; 2 — диэлектрик; 3 — УНТ; 4 — контакты к УНТ; 5 — высота барьеров; L_1 — ширина ямы (ширина среднего затвора); d_1 , d_2 — ширина барьеров (расстояние между затворами); $d_0 + L_0$, $L_2 + d_3$ — протяженность пассивных областей, расположенных между омическими контактами со стороны эмиттера и коллектора

для УНТ и уравнение Пуассона для подзатворных диэлектриков и УНТ. Задача является двумерной и очень сложной.

В связи с этим нами была разработана более простая квазидвумерная комбинированная численная модель РТД—ПТ. Опишем ее.

Модель РТД—ПТ на УНТ основывается на ранее предложенной комбинированной однозонной модели РТД на полупроводниковых материальных системах [11].

С учетом того, что толщины диэлектрика и УНТ в измерении y очень малы, считается, что потенциалы барьеров с помощью затворов в УНТ формируются независимыми от второго измерения, т. е. x , как показано на рис. 1 (для простоты приведен случай, когда приложенное напряжение $V_{пр} = 0$ В). В результате уравнение Пуассона и уравнение Шредингера можно решать только в измерении x , что существенно упрощает задачу.

Формирование начального распределения потенциала происходит следующим образом. Сначала задается квазиуровень Ферми, постоянный в областях эмиттера и коллектора и равный соответственно нулевому значению и значению приложенного напряжения. В активной области прибора квазиуровень Ферми изменяется линейно. Это предположение о квазиуровнях Ферми используется в процессе дальнейших расчетов. Таким образом, начальное приближение для потенциала задается исходя из предположений электронейтральности и справедливости для подвижных носителей заряда бoльцмановской аппроксимации статистики Ферми — Дирака для всего прибора [11]. Для описания приконтактных областей использовалась статистика Больцмана, что приводит к упрощению модели и корректно описывает классические области. Влияние контактов учитывается с помощью контактной разности потенциалов [12].

Предложенная модель реализуется в два этапа. На первом этапе транспортная задача в измерении x моделируется с помощью самосогласованного решения одномерных уравнений Шредингера и Пуассона. Причем уравнение Пуассона решается в протяженной области прибора между контактами, а уравнение Шредингера — в заданной области, включающей активную область. В результате вычислений находится самосогласованный потенциал и заряд в приборе.

На втором этапе решается одномерное уравнение Шредингера в заданной области. Необходимость его решения для всей области прибора между контактами, а не только в области барьеров и расположенной между ними квантовой ямы, показана далее. Решение находится с использованием конечно-разностного метода. При изменении границ области решения уравнения Шредингера (положения границ раздела "сшивки") меняется профиль потенциала, что может ощутимо влиять на

Эффективная масса электронов, диаметр, ширина запрещенной зоны, собственная концентрация носителей заряда УНТ [14]

Но- мер УНТ	(n, m)	m^*	d , нм	E_g , эВ	$n_{cnt,i}$, $см^{-3}$
1	(9,2)	$0,099m_0$	0,800	0,897	$4,911 \cdot 10^{13}$
2	(11,3)	$0,108m_0$	1,007	0,713	$6,034 \cdot 10^{14}$
3	(5,1)	$0,159m_0$	0,439	1,635	$2,677 \cdot 10^8$
4	(3,2)	$0,222m_0$	0,344	2,089	$7,042 \cdot 10^4$
5	(6,1)	$0,255m_0$	0,517	1,389	$1,656 \cdot 10^9$
6	(4,2)	$0,271m_0$	0,417	1,721	$6,303 \cdot 10^6$

рассчитываемую ВАХ прибора [13]. В результате решения определяются волновые функции, на основе которых рассчитывается коэффициент прохождения. А далее по формуле Тсу — Есаки с учетом заданного уровня Ферми находится плотность тока. Модель может учитывать влияние приконтактных областей и использоваться для РТД—ПТ на основе УНТ при определенном задании исходных данных. Модель является квазидвумерной, так как учитывает влияние потенциала во втором измерении.

Результаты моделирования

Была исследована структура РТД—ПТ, основанная на единичной УНТ. Для расчетов использованы следующие параметры: высота барьеров соответствует потенциальной энергии $U_1 = U_2 = U_3 = 0,8$ эВ, полученной приложением напряжения в областях контактов затворов; ширина барьеров — 1 нм; ширина квантовой ямы — 2 нм; протяженность приконтактных областей — 10 нм. Другие параметры: индексы хиральности (n, m), эффективная масса m^* (m_0 — масса покоя электрона), диаметр d , ширина запрещенной зоны E_g , собственная концентрация носителей заряда $n_{cnt,i}$ УНТ приведены в таблице [14]. Все расчеты проведены при $E_f = 0,4$ эВ.

Заметим, что в работе [15] была рассмотрена двухбарьерная резонансно-туннельная структура с эффективной массой, характерной для УНТ. При моделировании решалось только уравнение Шредингера с существенными упрощениями.

Исследование влияния на рассчитываемые ВАХ* положения границ раздела "сшивки" [16] структур на основе шести различных УНТ с использованием предложенной модели показало, что область отрицательной дифференциальной проводимости отсутствует при расчетах только активной области прибора (кривая 1, рис. 2). На рис. 2 на примере исследования прибора на основе УНТ с индексами хиральности (5,1) проиллюстрировано влияние на ВАХ положения границы "сшивки" в областях эмиттера и коллектора структуры при температуре $T = 300$ К: 1 — $Z = 0,2$ нм, 2 — $Z = 5,0$ нм,

* Для удобства сравнения приведена плотность тока.

$3 - Z = 9,8$ нм (Z — расстояние от барьеров до границ "сшивки" в эмиттере и коллекторе). Таким образом, учет влияния приконтактных областей имеет принципиальное значение. Поэтому в дальнейшем Z выбиралось равным 9,8 нм.

Было проведено моделирование ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности (рис. 3). Известно [3], что в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости нанотрубки могут быть проводниками, полуметаллами, полупроводниками. При этом индексы хиральности (n , m) однозначным образом

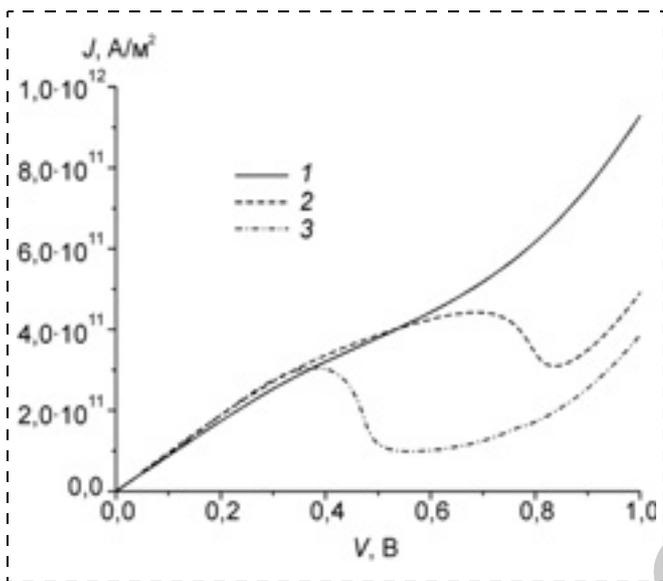


Рис. 2. ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ ($U_1 = U_2 = U_3 = 0,8$ эВ) при различных значениях положения границы "сшивки" в областях эмиттера и коллектора:
1 — $Z = 0,2$ нм; 2 — $Z = 5,0$ нм; 3 — $Z = 9,8$ нм

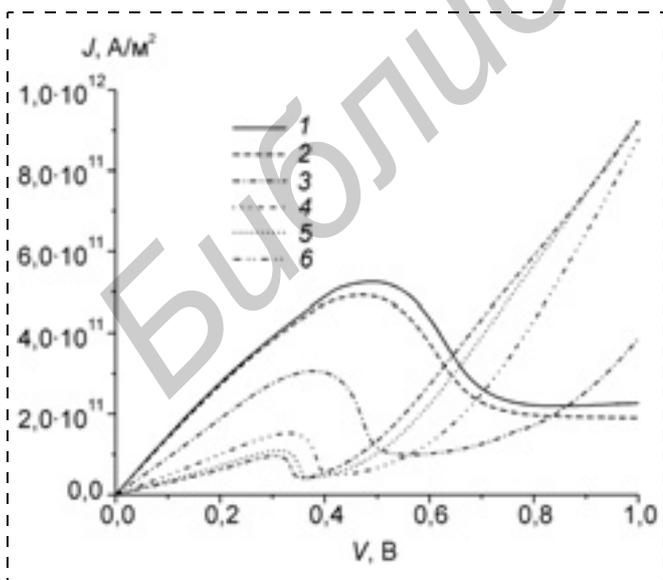


Рис. 3. ВАХ РТД—ПТ на основе УНТ с различными индексами хиральности

определяют ее структуру [3]. В данных расчетах рассматриваются УНТ, которые ведут себя как полупроводники с шириной запрещенной зоны E_g в пределах от 0,713 до 2,089 эВ (см. таблицу). Эффективные массы m^* и эффективные концентрации $n_{cnt, i}$ УНТ, рассчитанные автором работы [14], также приведены в таблице. Заметим, что эффективная концентрация часто используется для описания квантовых приборов (см., например, [17]).

На рис. 3 кривые 1–6 соответствуют порядковому номеру УНТ в таблице. Рисунок показывает, что с увеличением эффективной массы носителей заряда, т. е. с изменением хиральности УНТ, пиковые токи уменьшаются, а пиковые напряжения смещаются в область более низких значений. Видно, что ВАХ отличаются не только существенно количественно, но и могут сильно трансформироваться.

Заключение

В работе предложена квазидвумерная комбинированная модель функционально-интегрированной структуры, представляющей собой совмещение РТД и ПТ на основе единичной УНТ. С использованием модели показано, что, варьируя хиральность УНТ, а следовательно, технологию их изготовления, можно создавать функционально-интегрированные РТД—ПТ с существенно различающимися электрическими характеристиками. Применение таких и им подобных структур будет перспективно при создании отдельных компонентов нанорадио второго типа [6]. Предложенная модель была включена в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [18, 19], разработанную для персональных ЭВМ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственной программы научных исследований "Конвергенция" Республики Беларусь и гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф12-021.

Список литературы

1. **Наноматериалы.** Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2006. 152 с.
2. **Пул-мл. Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
3. **Дьячков П. Н.** Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 293 с.
4. **Нанотехнологии.** Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения — 2008 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2008. 432 с.
5. **Быстров Р. П., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Соколов А. В.** Микро- и нанoeлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11–50.
6. **Абрамов И. И., Лабунов В. А.** Проблемы и перспективы разработки нанорадио на углеродных нанотрубках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2011), Севастополь, Украина, 12–16 сентября, 2011. Т. 1. С. 28–30.

7. Barkaline V., Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Labunov V., Pletezhov A., Shukevich Y. Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2012. Vol. 15. N 1. P. 23–42.

8. **Абрамов И. И., Баркалин В. В., Белогуров Е. А., Лабунов В. А., Чашинский А. С.** Моделирование резонансного возбуждения электромеханических колебаний в радиоприемнике на углеродных нанотрубках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2011), Севастополь, Украина, 2011. Т. 2. С. 803–805.

9. **Баркалин В. В., Абрамов И. И., Лабунов В. А., Басаев А. С.** Моделирование электромагнитного возбуждения резонансных колебаний массивов углеродных нанотрубок в континуальном приближении // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо 2012), Севастополь, Украина, 2012. Т. 2. С. 705–708.

10. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. V. Резонансно-туннельные структуры // *Нано- и микросистемная техника*. 2007. № 3. С. 57–70.

11. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная модель резонансно-туннельного диода // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39. Вып. 9. С. 1138–1145.

12. **Абрамов И. И.** Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.

13. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Исследование влияния границ раздела "сшивки" в комбинированной модели РТД // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 16-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Украина, 11–15 сентября, 2006. С. 667–668.

14. **Marulanda J. M.** Current transport modeling of carbon nanotube field effect transistors for analysis and design of integrated circuits // Ph. D. Theses, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, U. S. A., 2008. 129 p.

15. **Dragoman D., Dragoman M.** Terahertz oscillations in semiconducting carbon nanotube resonant-tunneling diodes // *Physica E*. 2004. N. 24. P. 282–289.

16. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В.** Комбинированная двухзонная модель резонансно-туннельного диода // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1395–1400.

17. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VII. Структуры на квантовых проволоках // *Нано- и микросистемная техника*. 2009. № 7. С. 14–29; № 8. С. 7–23.

18. **Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И.** Система моделирования нанoeлектронных приборов — NANODEV // *Микроэлектроника*. 2003. Т. 32, № 2. С. 124–133.

19. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7521. P. 75211E-1–75211E-11.

I. I. Abramov¹, Prof., **N. V. Kolomeitseva**¹, Research Associate, **V. A. Labunov**¹, Chief Researcher, **I. A. Romanova**¹, Research Associate, **A. S. Basaev**², Deputy Director, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

¹ Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

² SMC "Technological Centre", Moscow, Russia

SIMULATION OF HYBRID INTEGRATED STRUCTURES BASED ON CARBON NANOTUBES

The combined numerical model of hybrid integrated structures including resonant tunneling diode and field-effect transistor (RTD-FET) is proposed. Simulation of RTD-FET based on carbon nanotubes of different types (chirality) was realized with the use of the model.

Keywords: carbon nanotubes, hybrid integrated structure, combined one-band model, numerical simulation

References

1. **Nanomaterialy.** Nanotekhnologii. Nanosistemnaya tekhnika. Mirovyye dostizheniya za 2005 god / Sb. pod red. P. P. Mal'tseva. M.: Tekhnosfera, 2006. 152 p.

2. **Pul-mi. Ch., Ouens F.** Nanotekhnologii. M.: Tekhnosfera, 2006. 336 p.

3. **D'yachkov P. N.** Uglernodnyye nanotrubki: stroeniye, svoystva, primeneniye. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006. 293 p.

4. **Nanotekhnologii.** Nanomaterialy. Nanosistemnaya tekhnika. Mirovyye dostizheniya — 2008 god / Sb. pod red. P. P. Mal'tseva. M.: Tekhnosfera. 2008. 432 p.

5. **Bystrov R. P., Gulyayev Yu. V., Nikitov S. A., Sokolov A. V.** Mikro- i nanoelektronika primenitel'no k sistemam radiolokatsii i radiosvyazi // *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2010. N. 9. P. 11–50.

6. **Abramov I. I., Labunov V. A.** Problemy i perspektivy razrabotki nanoradio na uglernodnykh nanotrubkakh // SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 21-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2011), Sevastopol', Ukraina, 12–16 sentyabrya, 2011. T. 1. P. 28–30.

7. **Barkaline V., Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Labunov V., Pletezhov A., Shukevich Y.** Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2012. V. 15, N. 1. P. 23–42.

8. **Abramov I. I., Barkalin V. V., Belogurov Ye. A., Labunov V. A., Chashynskiy A. S.** Modelirovaniye rezonansnogo voz-

buzhdeniya elektromekhanicheskikh kolebaniy v radiopriyemnike na uglernodnykh nanotrubkakh // SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 21-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2011), Sevastopol', Ukraina, 2011. V. 2. P. 803–805.

9. **Barkalin V. V., Abramov I. I., Labunov V. A., Basaev A. S.** Modelirovaniye elektromagnitnogo vozbulzheniya rezonansnykh kolebaniy massivov uglernodnykh nanotrubok v kontinual'nom priblizhenii // SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 22-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii (KryMiKo 2012), Sevastopol', Ukraina, 2012. V. 2. P. 705–708.

10. **Abramov I. I.** Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. V. Rezonansno-tunnel'nyye struktury // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2007. N. 3. P. 57–70.

11. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Kombinirovannaya model' rezonansno-tunnel'nogo dioda // *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2005. V. 39. Iss. 9. P. 1138–1145.

12. **Abramov I. I.** Modelirovaniye fizicheskikh protsessov v elementakh kremniyevykh integral'nykh mikroskhem. Minsk: BGU, 1999. 189 с.

13. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Issledovaniye vliyaniya granits razdela "sshivki" v kombinirovannoy modeli RTD // SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 16-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii "SVCH-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii", Sevastopol', Ukraina, 11–15 sentyabrya, 2006. P. 667–668.

14. **Marulanda J. M.** Current transport modeling of carbon nanotube field effect transistors for analysis and design of integrated circuits // Ph. D. Theses, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, U. S. A., 2008. 129 p.

15. **Dragoman D., Dragoman M.** Terahertz oscillations in semi-conducting carbon nanotube resonant-tunneling diodes // Physica E. 2004. N. 24. P. 282–289.

16. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeytseva N. V.** Kombinirovannaya dvukhzonnaya model' rezonansno-tunnel'nogo dioda // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2007. V. 41. Iss. 11. P. 1395–1400.

17. **Abramov I. I.** Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. VII. Struktury na kvantovykh provolokakh // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2009. N. 7. P. 14–29; N. 8. P. 7–23.

18. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korablev A. V., Novik Ye. G., Rogachev A. I.** Sistema modelirovaniya nanoelektronnykh priborov – NANODEV // Mikroelektronika. 2003. V. 32, N. 2. P. 124–133.

19. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeytseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E-1–75211E-11.

УДК 621.315.592

А. П. Сеничкин, канд. техн. наук, зам. директора, **А. С. Бугаев**, зам. зав. лаб., **А. Э. Ячменев**, науч. сотр., email: alex.uhf@yandex.ru

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ рНЕМТ-СТРУКТУР НА ПОДЛОЖКАХ GaAs С ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ В ВИДЕ НАНОНИТЕЙ ИЗ АТОМОВ ОЛОВА

Поступила в редакцию 05.12.2013

Разработана конструкция и опробована технология изготовления рНЕМТ-наногетероструктур на вицинальных подложках GaAs с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова. Предложены способы улучшения этой технологии применительно к легированию оловом для получения заданного профиля. Изготовлен тестовый образец наногетероструктуры AlGaAs/InGaAs с квазиодномерными каналами проводимости в квантовой яме с плотностью тока до 350 мА/мм, достаточной для изготовления тестовых полевых транзисторов.

Ключевые слова: рНЕМТ, нанонити, квазиодномерные структуры, дельта-легирование, технология

Введение

Структуры с пониженной размерностью электронного газа в канале представляют определенный интерес как с точки зрения изучения фундаментальных свойств низкоразмерных объектов, так и с точки зрения повышения быстродействия приборов, изготовленных на базе таких структур благодаря эффективному уменьшению температуры электронного газа и увеличению дрейфовой скорости носителей [1]. Несмотря на отработанную технологию получения классических псевдоморфных структур с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ) на GaAs, получение таких структур с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова сопровождается трудностями, связанными с выраженными свойствами атомов олова, а именно сегрегацией, реиспарением и расщеплением, препятствующими расположению легирующей примеси в требуемой форме. Таким образом, решение задач, связанных с изготовлением подобных структур, является необходимым условием на пути получения качественной элементной базы и объектов научного исследования в физике и нанoeлектронике.

Нами уже были получены структуры, содержащие нанонити олова, встроенные в кристалл арсенида галлия [2], и разработка технологии, позволяющей изготовить модулированно-легированную

рНЕМТ-структуру с квантовой ямой, имеющей квазиодномерные каналы проводимости, является дальнейшим шагом по усовершенствованию приборных структур с нанонитями из атомов олова на подложках GaAs.

Конструкция структуры

В работе использовали подложки GaAs с ориентацией $0,3^\circ \dots 0,4^\circ$ от исходной плоскости типа (100) в направлении плоскости типа (111), как обеспечивающие наилучшие условия для изготовления нанонитей из атомов олова [2]. Для получения рНЕМТ-структур с дельта-легированием оловом требуется выполнение нескольких важных технологических условий:

- создать максимально гладкую поверхность перед высаживанием атомов олова, чтобы уменьшить (или в предельном случае — убрать полностью) число островков на террасах, чтобы атомы олова преимущественно занимали места на краях террас;
- подобрать условия во время дельта-легирования атомами олова, необходимые для поверхностной сегрегации олова;
- зарастить полученные при дельта-легировании атомы олова без диффузии и сегрегации.

Эти задачи возникали и при получении дельта-легированных оловом гомоэпитаксиальных структур