

К вопросу о повышении надежности смесительных AlAs/GaAs резонансно-туннельных диодов конструкторско-технологическими методами

11, ноябрь 2013

DOI: 10.7463/1113.0637834

Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Шашурин В. Д.

УДК 621.315.592 + 621.382.2 + 539.219.3

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

mstislavik@mail.ru

mc.stiv@gmail.com

meschkow@bmstu.ru

shashurin@bmstu.ru

Введение

Одним из путей улучшения качества РЭС является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов. К таким приборам относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на базе многослойных полупроводниковых AlAs/GaAs гетероструктур с поперечным токопереносом [1-3].

Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, химический состав), можно управлять формой вольт-амперной характеристики (ВАХ). Такое свойство РТД позволяет создавать на его базе различные нелинейные преобразователи радиосигналов: смесители, выпрямители, умножители и генераторы, функциональные характеристики которых могут быть улучшены за счет подбора формы ВАХ нелинейного элемента [4-5]. Если исследования свойств самих РТД [6-9] и проблемам их радиотехнических применений [10-13] посвящена обширная библиография, то надежность РТД изучена слабо.

Проблеме надежности РТД и нелинейных преобразователей радиосигналов на их основе посвящены работы [14-16], в которых надежность РТД изучается на основе исследования процессов термической деградации гетероструктуры РТД вследствие взаимной диффузии составляющих ее элементов. В этих работах показано, как диффузионные процессы изменяют форму ВАХ РТД и параметры смесителей радиосигналов на его основе.

В настоящей работе рассматривается методика исследования изменения ВАХ РТД под действием деградиационных процессов в его структуре. Данная методика позволяет проводить выбор конструкторско-технологических параметров омических контактов, обеспечивающих минимальные скорости их термической деградации, а также контроль качества изготовления омических контактов. Кроме того, на основе данной методики определяется аналитическая зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов РТД от времени и температуры.

Методика исследований

Объектами экспериментальных исследований служили тридцать два РТД (8 чипов) с одинаковой структурой (рисунок 1). Для экспериментального исследования деградации РТД использовался метод ускоренного старения путем термического воздействия на образец. Температура воздействия была выбрана 300 °С. Предполагается [17], что при данной температуре действуют те же механизмы отказов, что и при нормальных условиях эксплуатации.

Методика исследования изменения ВАХ РТД под действием деградиационных процессов в его структуре включает в себя измерение ВАХ РТД до и после всех этапов термического воздействия на РТД и моделирование ВАХ в программно-расчетном комплексе dif2RTD [18]. В итоге определяется зависимость контактного сопротивления омических

контактов РТД от времени и температуры. Структура данной методики показана на рисунке 2.

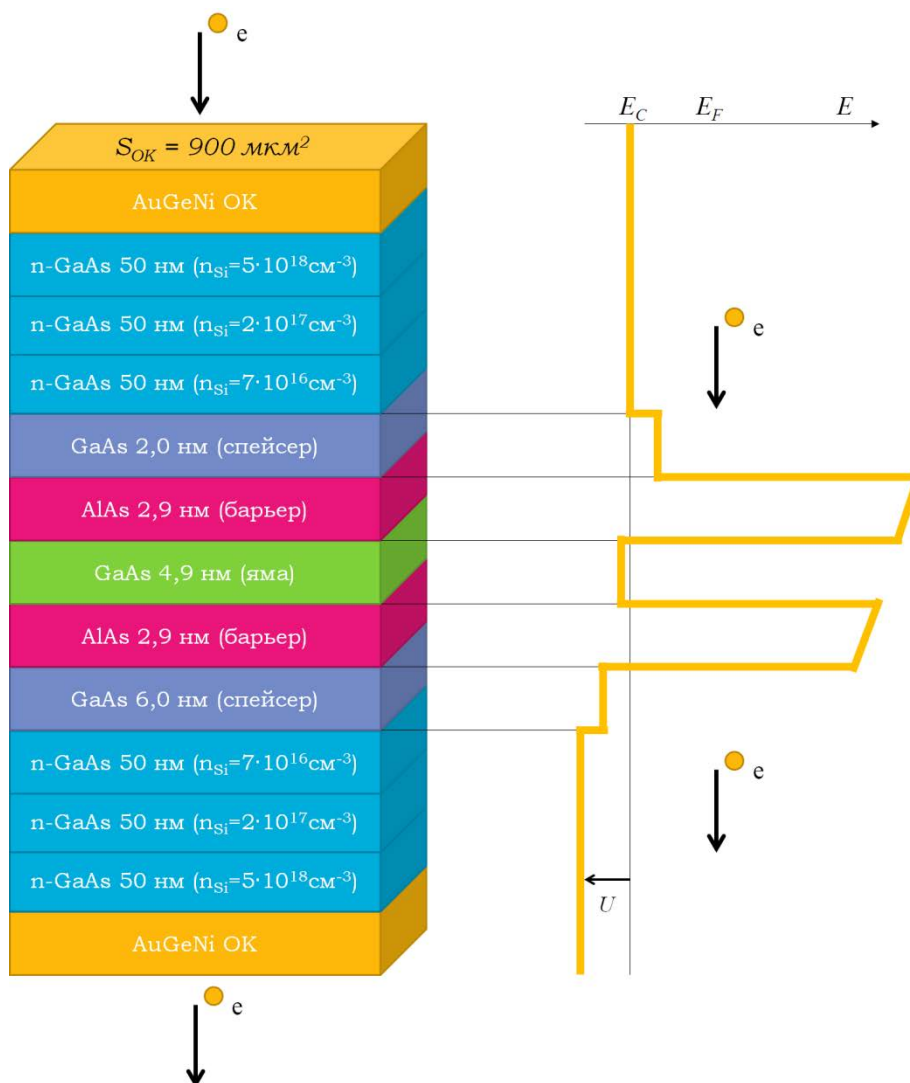


Рисунок 1 – Структура РТД на базе AlAs/GaAs гетероструктур

Воздействие на тридцать два РТД проводилось в течение 1, 2, 5, 9 и 10 ч (суммарное время термического воздействия 27 ч) в лабораторном воздушном термостате, который позволяет варьировать температуру в диапазоне от 40 до 300 °С с точностью ± 5 °С.

Измерения ВАХ РТД до и после термических воздействий проводились на микрондовом стенде, состоящем из микрондового устройства, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Данный

стенд позволяет измерять ВАХ РТД в диапазоне напряжений от 0 до 36 В (точность $\Delta U = \pm 1$ мВ) и токов от 0 до 1 А (точность $\Delta I = \pm 10$ мкА).



Рисунок 2 – Алгоритм исследования изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре

Результаты исследований

Структура РТД включает собственно резонансно-туннельную структуру (РТС) (набор слоев AlAs/GaAs), приконтактные области (слои Si-легированного GaAs) и омические контакты (рисунок 1).

В работах [15, 16] показано, что диффузионное размытие в резонансно-туннельной структуре влияет на форму ВАХ. Моделирование диффузионных процессов в программно-расчетном комплексе dif2RTD свидетельствует о

том, что при температуре 300 °С диффузионное размытие в исследуемой нами резонансно-туннельной структуре мало и не приводит к видимому изменению формы ВАХ РТД. Диффузионное размытие Si в приконтактных областях также не оказывает существенного влияния на R_C и ВАХ РТД.

Исходя из этого, можно предположить, что в результате термического воздействия деградации подвергаются AuGeNi омические контакты, и изменение ВАХ РТД во времени (после 1, 3, 8, 17 и 27 ч) вызвано увеличением R_C .

Зависимость контактного сопротивления R_C AuGeNi омических контактов от времени и температуры может быть описана следующим образом [19]:

$$R_C = R_{C0} + \gamma \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t}, \quad (1)$$

где R_{C0} – контактное сопротивление в начальный момент времени (сразу после изготовления), Ом. Для площади контакта $S_C = 25 \text{ мкм}^2$ и при значении удельного контактного сопротивления $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ [20, 21] R_{C0} оказывается равным 4 Ом;

γ – коэффициент пропорциональности между контактным сопротивлением R_C (Ом), температурой T (К), энергией активации E_a (эВ) и временем t (с),

k – постоянная Больцмана ($k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$).

Энергия активации E_a деградационных явлений AuGeNi омических контактов равна 1 эВ [22, 23].

В результате экспериментальных исследований были получены ВАХ тридцати двух РТД до и после 1, 3, 8, 17 и 27 часов термического воздействия и проведена их статистическая обработка. Технологический разброс ВАХ находится в пределах погрешности измерений, поэтому на рисунке 3 (кривая 1) приведены усредненные ВАХ по всей партии РТД.

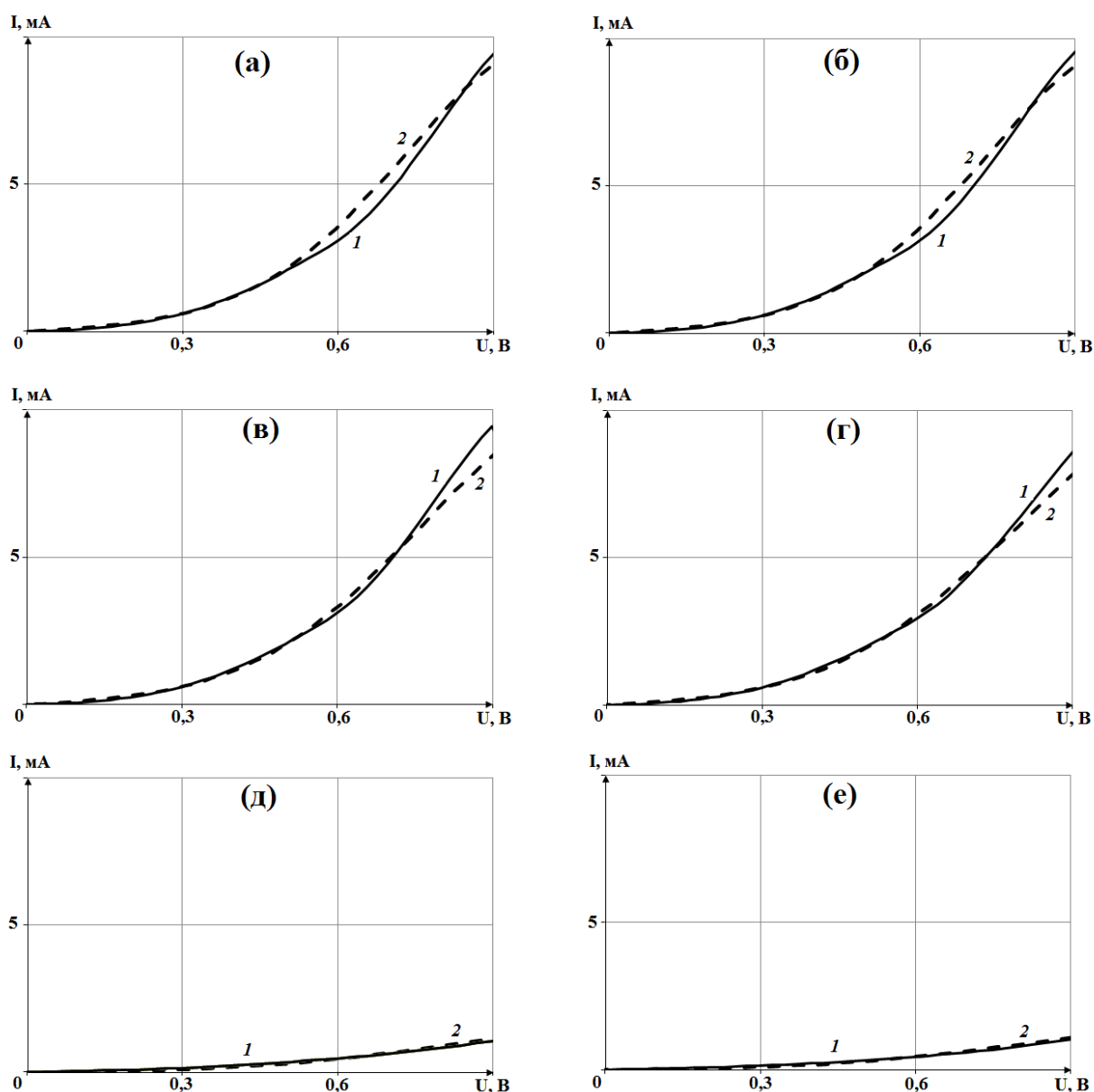


Рисунок 3 – Экспериментальные (1) и смоделированные (2) ВАХ РТД до (а), после 1 (б), 3 (в), 8 (г), 17 (д) и 27 (е) часов термического воздействия

На том же рисунке (кривая 2) представлены смоделированные в программно-расчетном комплексе dif2RTD вольт-амперные характеристики РТД. Видно, что экспериментальные и смоделированные ВАХ РТД хорошо согласуются между собой. В итоге был определен коэффициент пропорциональности γ , который оказался равен $25 \text{ Ом} \cdot \text{с}^{-0.5}$. Таким образом, функциональную зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры можно представить как:

$$R_c = 4 + 25 \cdot \exp\left(\frac{-1}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Заключение

Проведено исследование термической деградации AlAs/GaAs РТД. Изменение ВАХ РТД вызвано преимущественно деградацией омических контактов. С учетом этого была определена аналитическая зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов РТД от времени и температуры. Она может быть использована для прогнозирования надежности РТД и устройств на его основе в заданных условиях эксплуатации.

В условиях проведенного эксперимента деградация резонансно-туннельной структуры мала. Но при более высокой степени дефектности полупроводниковой гетероструктуры, следствием чего будет увеличение скорости диффузии Al и Si, деградация может быть существенной, что приведет к изменению формы ВАХ РТД и эксплуатационных характеристик приборов на их основе.

Кроме того, разработанная методика исследования изменения ВАХ РТД под действием деградационных процессов в его структуре позволяет проводить выбор конструкторско-технологических параметров омических контактов, обеспечивающих минимальные скорости их термической деградации. Также данная методика позволяет проводить контроль качества изготовления омических контактов.

Результаты получены в ходе поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Список литературы

1. Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоркова Н.В., Фёдоров И.Б., Шашурин В.Д., Федоренко И.А. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов // Наноинженерия. 2011. № 1. С. 34-43.
2. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Нанoeлектроника на базе многослойных гетероструктур // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2003. № 5. С. 73-78.
3. Алкеев Н.В., Аверин С.И., Дорофеев А.А., Гладышева Н.Б., Торгашин М.Ю. Резонансно-туннельный диод на основе гетеросистемы GaAs/ AlAs для субгармонического смесителя // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 5. С. 356-365.
4. Иванов Ю.А., Федоренко И.А., Федоркова Н.В. Анализ влияния формы ВАХ резонансно-туннельного нанодиода на параметры смесителя СВЧ-диапазона // Вопросы инженерной нанотехнологии: сб. докл. межд. конф. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 38-40.
5. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Перунов Ю.М. и др. Нанодиод для смесителя // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: тез. докл. 12 межд. Крымской конф. Севастополь, 2002. С. 462-463.
6. Прохоров Э.Д. Квантово-размерные эффекты в твердотельных сверхвысокочастотных приборах. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2005. 220 с.
7. 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.
8. Бежко М.П., Безотосный И.Ю., Шмелев С.С. Особенности поведения дифференциальной проводимости резонансно-туннельных структур // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии: тез. докл. 7-й межд. науч. конф. Кисловодск, 2007. С. 13-14.

9. Абрамов И.И., Королев А.В. Теоретическое исследование приборных структур, содержащих резонансно-туннельные диоды // Журнал технической физики. 2001. Т. 71, вып. 9. С. 128-133.
10. Георгиевский А.М., Громов Д.В., Дудинов К.В. и др. Исследование направлений применения резонансно-туннельного диода в интегральных схемах СВЧ диапазона // Микроэлектроника. 1996. Т. 25, № 4. С. 249-258.
11. Белов Л.А. Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 2. С. 44-51.
12. Иванов Ю.А., Мешков С.А., Попов В.В., Федоренко И.А., Федоркова Н.В. Повышение показателей качества назначения субгармонического смесителя радиосигналов за счет применения резонансно-туннельного диода // Сетевой электронный научный журнал «Системотехника». 2010. № 8. Режим доступа: <http://systech.miem.edu.ru/2010/meshkov.htm> (дата обращения 26.09.2012).
13. Алкеев Н.В. Анализ шумовых и динамических свойств субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 10. С. 1258-1263.
14. Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии // Наноинженерия. 2011. № 4. С. 44-48.
15. Агасиева С.В., Шашурин В.Д. Влияние процесса деградации нанодиода на качество нелинейного преобразователя сигналов // Наноинженерия. 2011. № 3. С. 36-40.
16. Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Назаров Н.В. Определение управляемых параметров для конструкторско-технологической оптимизации СВЧ смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах по критерию их надежности // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/228008.html> (дата обращения 25.01.2012).

17. Горлов М.И., Строгонов А.В. Геронтология интегральных схем: прогнозирование долговечности ИС // Петербургский журнал электроники. 1996. № 4. С. 35-41.
18. Макеев М.О., Литвак Ю.Н., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Мигаль Д.Э. dif2RTD: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661001. 2012.
19. Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Назаров В.В. Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктур // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 9. DOI: [DOI: 10.7463/0912.0453636](https://doi.org/10.7463/0912.0453636)
20. Murakami M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors // Science and Technology of Advanced Materials. 2002. Vol. 3, no. 1. P. 1-27. DOI: 10.1016/S1468-6996(01)00150-4
21. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, вып. 11, С. 1281-1308.
22. Vashchenko V.A., Sinkevitch V.F. Physical Limitations of Semiconductor Devices. Springer US, 2008. 330 p. DOI: 10.1007/978-0-387-74514-5
23. Irvin J.C. The Reliability of GaAs FETs // GaAs FET Principle and Technology / J.W. Dilorenzo, D.D. Khandelwal (eds). MA: Artech House Publishers, 1982. Ch. 6. P. 353-400.

About reliability improvement of mixing AlAs/GaAs resonant tunneling diodes by design and engineering means

11, November 2013

DOI: 10.7463/1113.0637834

Makeev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Shashurin V.D.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

mstislavik@mail.ru

mc.stiv@gmail.com

meschkow@bmstu.ru

shashurin@bmstu.ru

In this article the authors propose an investigation method of changing current–voltage characteristic of a resonant tunneling diode influenced by degradation processes in its structure. An investigation of degradation of an AlAs/GaAs resonant tunneling diode structure at the temperature of 300°C was conducted. The findings show that in these conditions change in current–voltage characteristic of the resonant tunneling diode is mainly due to degradation of ohmic contacts. An analytic dependence of the resonant tunneling diode AuGeNi ohmic contact resistance on time and temperature was determined.

Publications with keywords: [resonant tunneling diode](#), [AuGeNi ohmic contact](#), [radio signal mixer](#)

Publications with words: [resonant tunneling diode](#), [AuGeNi ohmic contact](#), [radio signal mixer](#)

References

1. Ivanov Iu.A., Meshkov S.A., Siniakin V.Iu., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V., Fedorov I.B., Shashurin V.D. Povyshenie pokazatelei kachestva radioelektronnykh sistem novogo pokoleniia za schet primeneniia rezonansno-tunnel'nykh nanodiodov [Improving quality indicators of new generation of electronic systems through the use of resonant-tunneling nanodiodes]. *Nanoinzheneriia* [Nanoengineering], 2011, no. 1, pp. 34-43.
2. Ivanov Iu.A., Malyshev K.V., Fedorkova N.V. Nanoelektronika na baze mnogoslownykh geterostruktur [Nanoelectronics on the basis of multilayer heterostructures]. *Izvestiia VUZov. Mashinostroenie* [News of Higher Educational Institutions. Engineering], 2003, no. 5, pp.73-78.

3. Alkeev N.V., Averin S.I., Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., Torgashin M.Iu. Rezonansno-tunnel'nyi diod na osnove geterosistemy GaAs/ AlAs dlia subgarmonicheskogo smesitel'ia [Resonance-tunneling diode on the basis of the heterosystem GaAs/ AlAs for of subharmonic mixer]. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2010, vol. 39, no. 5, pp. 356-365.
4. Ivanov Iu.A., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V. Analiz vliianiia formy VAKh rezonansno-tunnel'nogo nanodioda na parametry smesitel'ia SVCh-diapazona [Analysis of effect of the form of volt-ampere characteristics of resonance-tunnel nano-diode on the parameters of the mixer of the microwave range]. *Voprosy inzhenernoi nanotekhnologii: sb. dokl. mezhd. konf.* [Questions of engineering nanotechnology: collected reports of int. conf.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008, pp. 38-40.
5. Ivanov Iu.A., Malyshev K.V., Perunov Iu.M., et al. Nanodiod dlia smesitel'ia [Nano-diode for mixer]. *SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii: tez. dokl. 12 mezhd. Krymskoi konf.* [Microwave and Telecommunication Technology: abstracts of reports of the 12th Int. Crimean conf.]. Sevastopol', 2002, pp. 462-463.
6. Prokhorov E.D. *Kvantovo-razmernye efekty v tverdotel'nykh sverkhvysokochastotnykh priborakh* [Quantum-size effects in solid-state microwave devices]. Khar'kov, Karazin KhNU Publ., 2005. 220 p.
7. Abramov I.I., Goncharenko I.A., Kolomeitseva N.V. Kombinirovannaia model' rezonansno-tunnel'nogo dioda [A combined model of resonance-tunnel diode]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2005, vol. 39, no. 9, pp. 1138-1145.
8. Bezhko M.P., Bezotosnyi I.Iu., Shmelev S.S. Osobennosti povedeniia differentsial'noi provodimosti rezonansno-tunnel'nykh struktur [Features of the behavior of the differential conductance of resonance-tunnel structures]. *Khimiia tverdogo tela i sovremennye mikro- i nanotekhnologii: tez. dokl. 7 mezhd. nauch. konf.* [Solid State Chemistry and Modern Micro-and Nanotechnology: abstracts of reports of the 7th Int. scientific. conf.]. Kislovodsk, 2007, pp. 13-14.
9. Abramov I.I., Korolev A.V. Teoreticheskoe issledovanie pribornykh struktur, sodержashchikh rezonansno-tunnel'nye diody [Theoretical study of device structures containing resonance-tunnel diodes]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 2001, vol. 71, no. 9, pp. 128-133.
10. Georgievskii A.M., Gromov D.V., Dudinov K.V., et al. Issledovanie napravlenii primeneniia rezonansno-tunnel'nogo dioda v integral'nykh skhemakh SVCh diapazona [Study of directions of application of resonance -tunnel diode in integrated circuits of microwave range]. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1996, vol. 25, no. 4, pp. 249-258.
11. Belov L.A. Preobrazovateli chastoty. Sovremennye VCh-komponenty [Frequency converters. Modern high-frequency components]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2004, no. 2, pp. 44-51.
12. Ivanov Iu.A., Meshkov S.A., Popov V.V., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V. Povyshenie pokazatelei kachestva naznacheniia subgarmonicheskogo smesitel'ia radiosignalov za schet primeneniia rezonansno-tunnel'nogo dioda [Increase of quality indicators of the appointment of subharmonic mixer of radio signals due to application of resonance-tunnel diode].

Sistematika [Systems engineering], 2010, no. 8. Available at: <http://systech.miem.edu.ru/2010/meshkov.htm>, accessed 01.10.2013.

13. Alkeev N.V. Analiz shumovykh i dinamicheskikh svoistv subgarmonicheskogo smesitelia na rezonansno-tunnel'nom diode [The analysis of the noise and the dynamic properties of subharmonic mixer on resonance-tunnel diode]. *Radiotekhnika i elektronika* [Communications Technology and Electronics], 2004, vol. 49, no. 10, pp. 1258-1263.

14. Makeev M.O., Ivanov Iu.A., Meshkov S.A. Issledovanie degradatsionnykh iavlenii v nanorazmernykh AlAs/GaAs geterostrukturakh metodom IK-spektroellipsometrii [Study of degradation phenomena in nanoscale AlAs / GaAs heterostructures by IR spectroscopy ellipsometry]. *Nanoinzheneriia* [Nanoengineering], 2011, no. 4, pp. 44-48.

15. Agasieva S.V., Shashurin V.D. Vliianie protsessa degradatsii nanodioda na kachestvo nelineinogo preobrazovatel'ia signalov [Influence of the processes of degradation of nano-diode on the quality of non-linear signal converter]. *Nanoinzheneriia* [Nanoengineering], 2011, no. 3, pp. 36-40.

16. Shashurin V.D., Vetrova N.A., Nazarov N.V. Opredelenie upravliaemykh parametrov dlia konstruktorsko-tekhnologicheskoi optimizatsii SVCh smesitelei radiosignalov na rezonansno-tunnel'nykh diodakh po kriteriiu ikh nadezhnosti [Processing variables detection for structural and engineering optimization on reliability criterion of microwave radio signals mixers based on resonance-tunnel diodes]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 10. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/228008.html>, accessed 01.10.2013.

17. Gorlov M.I., Stroganov A.V. Gerontologiya integral'nykh skhem: prognozirovanie dolgovechnosti IS [Gerontology of integrated circuits: predicting of durability of IP]. *Peterburgskii zhurnal elektroniki* [Petersburg Journal of Electronics], 1996, no. 4, pp. 35-41.

18. Makeev M.O., Litvak Yu.N., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Migal' D.E. dif2RTD: Certificate RF on state registration of computer program, no. 2012661001. 2012.

19. Makeev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Nazarov V.V. Issledovanie termicheskoy degradatsii AuGeNi omicheskikh kontaktov rezonansno-tunnel'nykh diodov na baze nanorazmernykh AlAs/GaAs geterostruktur [Study of thermal degradation of AuGeNi ohmic contacts of resonant tunneling diodes based on nanoscale AlAs / GaAs heterostructures]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 9. DOI: [DOI: 10.7463/0912.0453636](https://doi.org/10.7463/0912.0453636)

20. Murakami M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2002, vol. 3, no. 1, pp. 1-27. DOI: 10.1016/S1468-6996(01)00150-4

21. Blank T.V., Gol'dberg Iu.A. Mekhanizmy protekaniia toka v omicheskikh kontaktakh metall—poluprovodnik [Mechanisms of current flow in the ohmic metal-semiconductor contact]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1281-1308.

22. Vashchenko V.A., Sinkevitch V.F. *Physical Limitations of Semiconductor Devices*. Springer US, 2008. 330 p. DOI: 10.1007/978-0-387-74514-5
23. Irvin J.C. The Reliability of GaAs FETs. In book: Dilozenzo J.W., Khandelwal D.D., eds. *GaAs FET Principle and Technology*. MA, Artech House Publishers, 1982, ch. 6, pp. 353-400.