

Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктур

09, сентябрь 2012

DOI: 10.7463/0912.0453636

Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Назаров В. В.

УДК 621.315.592 + 621.396.6.019.3(06)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

mc.stiv@gmail.com

meschkow@bmstu.ru

Введение

Развитие радиоэлектронных систем (РЭС) телекоммуникаций, связи, радиолокации и других предполагает улучшение их функциональных характеристик: уменьшение искажений сигналов, увеличение рабочих частот, расширение полосы частот и динамического диапазона обрабатываемых сигналов. 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 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

оптимизированы за счет выбора наилучшей для конкретных условий применения формы ВАХ нелинейного элемента [4-5]. Если исследованиям 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 работах [14-16] показано, как эти процессы влияют на форму ВАХ РТД и параметры смесителей радиосигналов на его основе. Настоящая работа является продолжением исследований надежности РТД и нацелена на изучение процессов термической деградации AuGeNi омических контактов РТД.

1. Конструкторско-технологические особенности AuGeNi омических контактов

Оптимизация параметров нелинейных преобразователей радиосигналов ведется путем выбора требуемой формы ВАХ нелинейного элемента. Форма ВАХ РТД определяется

- условиями токопереноса в резонансно-туннельной структуре (РТС),
- сопротивлением приконтактной области полупроводника R_{n-n+} ,
- сопротивлением R_C омического контакта.

Согласно данным [14, 17], ВАХ РТС и сопротивление приконтактных областей R_{n-n+} слабо меняются в процессе эксплуатации приборов на основе GaAs-гетероструктур в широком диапазоне температур, причем расчетное приведенное сопротивление n-n⁺-перехода для случая, когда концентрация электронов в приконтактных областях GaAs лежит в диапазоне от 10^{16} до 10^{18} см⁻³, согласно модели [18] составляет $R_{n-n+} = 10^{-8}$ Ом·см². Следовательно, особое внимание, с точки зрения возможной деградации, следует уделить рассмотрению AuGeNi омических контактов.

Известны следующие механизмы протекания тока сквозь омический контакт [19]:

- термоэлектронная эмиссия (над барьером);
- термополевая эмиссия (сквозь вершину барьера);
- туннелирование, полевая эмиссия (сквозь барьер на уровне энергии Ферми);
- токоперенос по металлическим шунтам (он отсутствует при низких плотностях дислокаций (10^{-4} - 10^{-6} см⁻²), что характерно для GaAs).

GaAs на свободной поверхности имеет высокую концентрацию поверхностных состояний (более 10^{14} см⁻²эВ⁻¹) [20], энергетически расположенных в глубине запрещенной зоны, что приводит к жесткому закреплению уровня Ферми на поверхности. Поэтому изготовление омического контакта к GaAs может сводиться к:

- сильному легированию приповерхностной области, что обеспечивает туннельное прохождение границы раздела электронами (например, в контакте Ni/Au+Ge/Ni/Au-n-GaAs уровень легирования GaAs германием достигает 10^{21} см⁻³),
- созданию в приповерхностной области химических соединений, существенно снижающих высоту потенциального барьера металл-полупроводник, что дает возможность электронам переходить границу за счет термоэлектронной эмиссии (например, In-GaAs),
- пассивации поверхности полупроводника, что приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний (например, обработка поверхности GaAs в $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ приводит к уменьшению плотности поверхностных состояний на порядок) [19].

Часто встречающимся методом создания омических контактов к GaAs является образование в приконтактной области сильно легированного (до 10^{20} - 10^{21} см⁻³) приповерхностного слоя, который значительно сужает потенциальный барьер металл-полупроводник [19, 21]. Этот принцип

реализован в наиболее распространенных омических контактах для GaAs – AuGeNi омических контактах [22, 23].

AuGeNi омические контакты были разработаны Браслау [24]. Они хорошо себя зарекомендовали при изготовлении приборов на основе GaAs, поскольку имеют малое удельное контактное сопротивление (10^{-6} – 10^{-8} Ом·см²), хорошую воспроизводимость при изготовлении и легкое включение в технологический процесс. Но, в то же время, они обладают достаточно низкой термической стабильностью и высокой шероховатостью поверхности [22, 29-31], что может приводить к снижению надежности прибора в целом.

Омические контакты исследуемых нами РТД имели структуру n-GaAs / Au + Ge / Ni / Au. Технологический процесс изготовления AuGeNi омических контактов состоит из следующих этапов: последовательное нанесение слоев Au-Ge, Ni и Au, последующий отжиг структуры.

В процессе термической обработки омических контактов Ga диффундирует из подложки GaAs, при этом Au взаимодействует с Ga, образуя слой фазы β -AuGa. Температура эвтектики данного сплава (Au-Ge) равна 360 °С. Германий при температуре 350 °С и больше диффундирует из сплава Au-Ge в верхний слой никеля, образуя Ni₃Ge-слой, и только малая часть Ge остается в первом слое золота, осажденного на подложку GaAs. При этом Ni реагирует с GaAs, образуя Ni_xGaAs. Следующим этапом является образование при температуре 450 °С NiAs(Ge)-слоя в результате того, что Ge проникает в Ni_xGaAs и замещает при этом Ga. Контакт приобретает структуру β -AuGa/NiAs(Ge)/GaAs (рисунок 1), а при охлаждении образуется новый сильно легированный германием слой GaAs [19, 29], что приводит к сужению потенциального барьера на границе металл-полупроводник. Параметры термической обработки: температура 470 °С, время отжига – 1,5 мин.

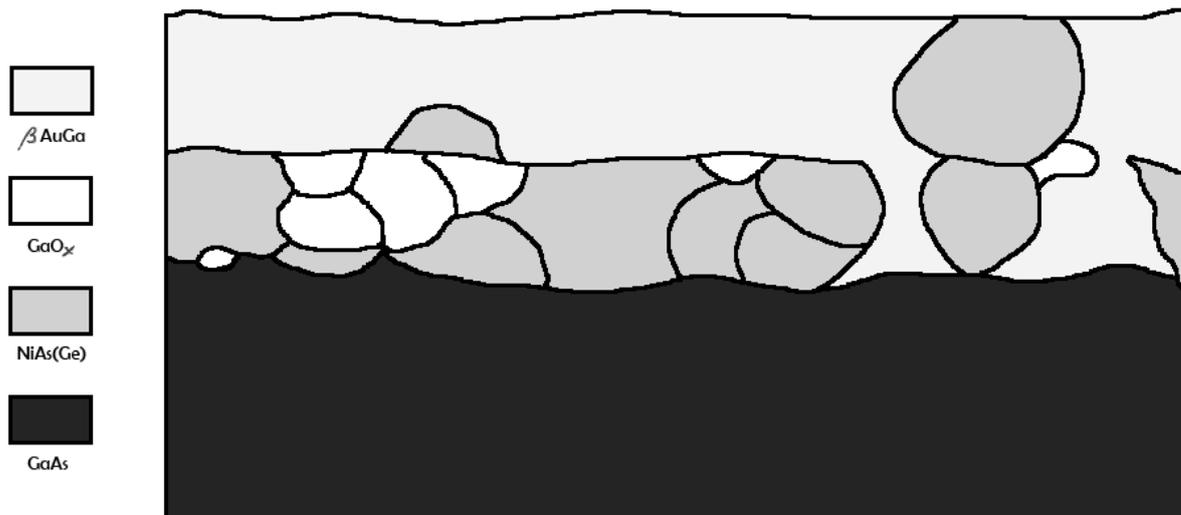


Рисунок 1. Внешний вид поперечного разреза AuGeNi омических контактов после термической обработки

Таким образом, Ge является легирующим элементом, который обуславливает возможность туннелирования сквозь потенциальный барьер. Ni является своего рода катализатором: он взаимодействует с As, ускоряя исходящую диффузию Ga, образование β -AuGa и легирование германием GaAs. Кроме того Ni улучшает однородность контакта. Au служит в качестве металлизации, а также способствует образованию вакансий Ga.

Слой NiAs(Ge) отвечает в основном за электрические свойства AuGeNi ОК, он имеет зернистую структуру с размером зерна ~ 1 мкм в ширину и ~ 250 нм в глубину. Выяснено, что чем больше площадь контакта слоя NiAs(Ge) с подложкой GaAs, тем меньшим оказывается удельное контактное сопротивление ρ_c , что наводит на мысль о важности прямого контакта NiAs(Ge)-слоя с GaAs [22, 29]. Исходя из этого, в идеале структура AuGeNi омических контактов состоит из подложки GaAs, полностью покрытой NiAs(Ge) слоем, и однородного β -AuGa-слоя, находящегося сверху NiAs(Ge) и не контактирующего с подложкой GaAs.

β -AuGa-слой также имеет важное значение при получении омических контактов с низким R_C , но, с другой стороны, именно он ответственен за

термическую нестабильность AuGeNi омических контактов. Дegradaция данных омических контактов имеет следующий механизм: помимо расплывания слоя β -AuGa происходит взаимная диффузия Au и Ga и, соответственно, образование новых областей β -AuGa. Это приводит к уменьшению площади подложки GaAs, покрытой NiAs(Ge) и, следовательно, к увеличению контактного сопротивления R_C .

2. Экспериментальные исследования деградационной стойкости AuGeNi омических контактов РТД

Экспериментальные исследования деградационных явлений, вызванных температурной нагрузкой AuGeNi омических контактов РТД, были проведены с целью определения скорости термической деградации AuGeNi омических контактов и дальнейшего моделирования электрических свойств РТД на этапе эксплуатации, а также НПП на их основе.

Одной из основных методик климатических испытаний для радиоэлектронных элементов (РЭЭ) является методика испытаний на воздействие повышенной температуры. Причем температура испытаний должна быть физически допустимой для конструкции РЭЭ (обычно 200–300 °С), а продолжительность испытаний – не менее 100 часов [32]. В нашем случае ускоренные испытания проводились в течение 150 часов при повышенной температуре 300 °С при скоростях нагрева и остывания не более 2 °С в минуту (для исключения термоудара). Термическим испытаниям подвергались 20 резонансно-туннельных диодов с одинаковой структурой.

Испытания проводились на лабораторном воздушном термостате, который позволяет варьировать температуру в диапазоне от 40 до 300 °С с точностью ± 3 °С. Измерения ВАХ РТД до и после термоиспытаний проводились на микронзондовом стенде, состоящем из микронзондового устройства на базе микроскопа METAM P-1, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Микронзондовый 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). Были получены ВАХ РТД (рисунок 2), и проведена их статистическая обработка. Как до, так и после термических испытаний, ВАХ всех РТД не различаются в пределах погрешности измерений.

На ВАХ РТД после проведения термоиспытаний наблюдается незначительное уменьшение значения максимального тока (от 21,8 до 21,0 мА для прямой ветви, аналогично – для обратной ветви) и сдвиг его в область больших напряжений (от 1 до 1,4 В для прямой ветви, аналогично – для обратной ветви).

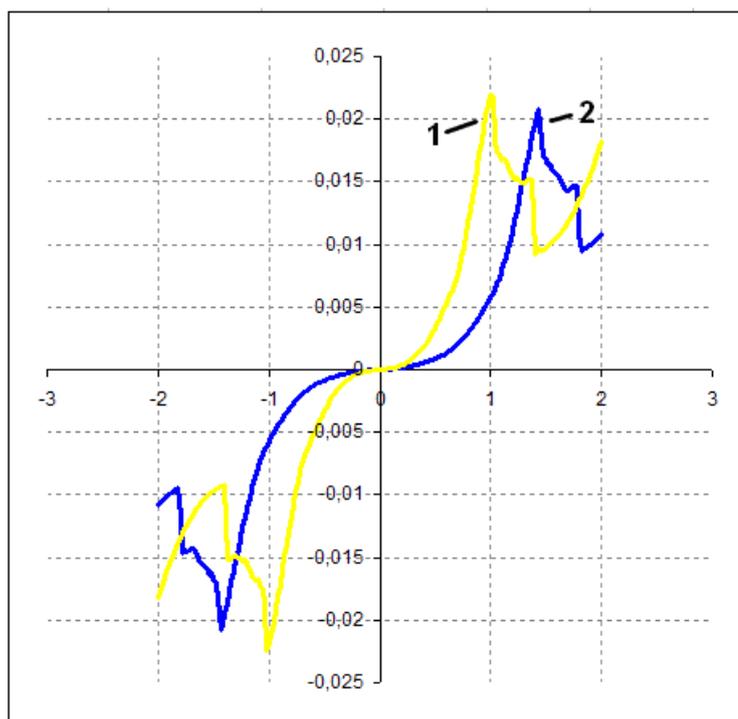


Рисунок 2. Сравнение среднестатистических ВАХ РТД до (1) и после (2) термоиспытаний

Наблюдаемый сдвиг ВАХ эквивалентен увеличению последовательного сопротивления РТД на 24 Ом. Это соответствует увеличению сопротивления омических контактов R_C на 12 Ом, поскольку,

как отмечалось выше, увеличение контактного сопротивления связано, в первую очередь, с взаимной диффузией Au и Ga в омических контактах. Для прогнозирования значения R_C и моделирования выходных электрических характеристик прибора в процессе эксплуатации устройства разложим величину R_C на два слагаемых:

$$R_C = R_{C0} + \Delta R_C. \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения.

R_C – контактное сопротивление в текущий момент времени, Ом.

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 $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ R_{C0} оказывается равным 4 Ом.

ΔR_C – увеличение контактного сопротивления в процессе эксплуатации, Ом.

Исходя из того, что деградация AuGeNi омических контактов происходит за счет диффузионного размытия, изменение омического сопротивления R_C во времени можно описать зависимостью

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

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

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

Энергию активации E_a деградиционных явлений AuGeNi омических контактов примем равной 1 эВ [33-35]. На основе этих данных можно определить коэффициент пропорциональности γ , он оказывается равным $\gamma = 408,2 \text{ Ом}\cdot\text{с}^{-0,5}$.

Таким образом, была выявлена функциональная зависимость

$$R_c(T, t) = 4 + 408,2 \cdot \exp\left(\frac{-1\text{эВ}}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Кроме того был проведен анализ внешних изменений в контактных площадках РТД после проведения термоиспытаний (рисунок 3).

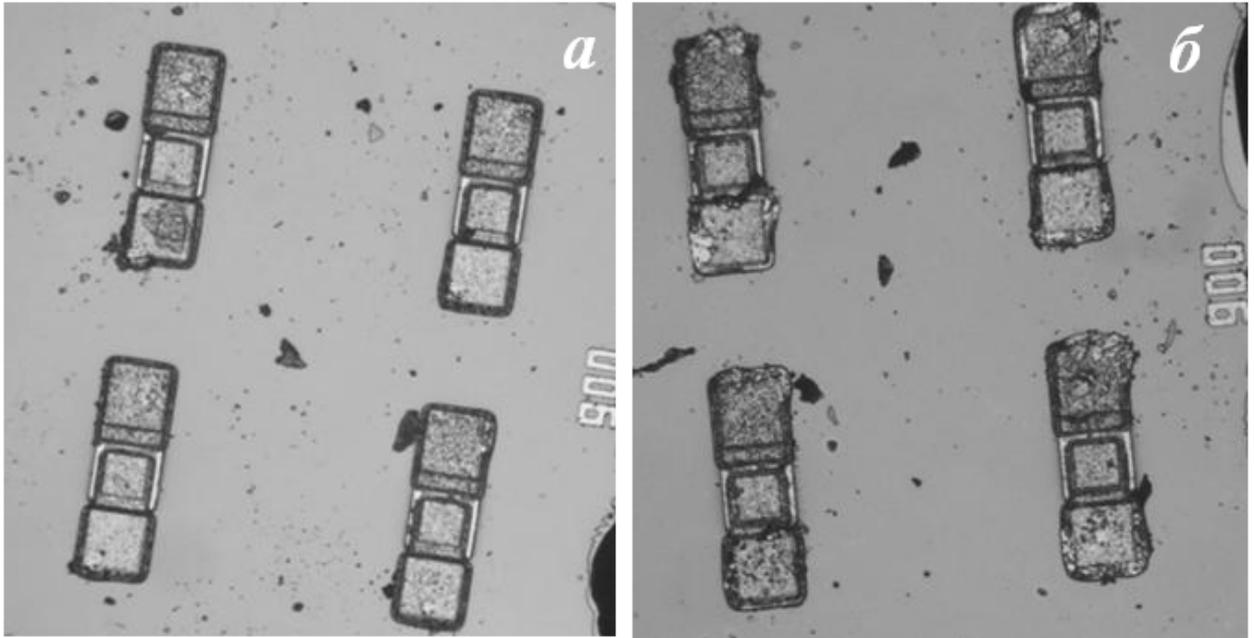


Рисунок 3 – Внешний вид РТД до (а) и после (б) термоиспытаний

Видно, что произошла деградация поверхностного слоя контактов, которая может быть вызвана как термической обработкой AuGeNi омических контактов, так и их механической деформацией под действием микрозондов.

3. Методы повышения термической стабильности и надежности омических контактов РТД

Рассмотрим возможные методы повышения термической стабильности и соответственно надежности омических контактов РТД, поскольку исследованные омические контакты показали достаточно высокую скорость деградации под воздействием температурного фактора. Одним из возможных методов является нанесение барьерных антидиффузионных слоев, например,

Ti, Pd, Pt, W [36], Mo и TiB_x [37], препятствующих взаимной диффузии Au и Ga.

Другим методом является электронная и химическая пассивация поверхности GaAs, например, халькогенидная обработка, т.е. модификация поверхности GaAs атомами серы или селена. Электронная пассивация приводит к улучшению характеристик приборов за счет уменьшения плотности поверхностных состояний и снижения скорости поверхностной рекомбинации, а химическая пассивация позволяет замедлить процессы окисления поверхности полупроводника на воздухе [38]. Дополнительно может проводиться вакуумная УФ обработка халькогенизированной поверхности GaAs перед осаждением металлических слоев омических контактов, что приводит к уменьшению величины контактного сопротивления и улучшению морфологических характеристик поверхности контактной площадки [39]. Важна также очистка поверхности GaAs перед нанесением контактных слоев [23].

Перспективным считается применение омических контактов на базе новых структур и материалов [22], сочетающих низкое сопротивление и высокую температурную стабильность:

- NiGe омические контакты [40],
- PdGe омические контакты [41, 42],
- Ge/Ag/Ni омические контакты (применение Ag вместо Au) [43],
- $In_xGa_{1-x}As/Ni/W$ омические контакты [44].

Выводы

На основе эксперимента и данных литературных источников предложена аналитическая зависимость контактного сопротивления РТД на основе AlGaAs многослойных гетероструктур от времени и температуры. Она может быть использована для прогнозирования надежности РТД и устройств на его основе в заданных условиях эксплуатации.

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., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Фёдоров И.Б., Шашурин В.Д. 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. междунар. 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 междунар. 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-ой междунар. 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. Dallesasse J.M., El-Zein N., Holonyak N. Jr., Hsieh K.C., Burnham R.D., Dupuis R.D. Environmental degradation of Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum-well heterostructures // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68, no. 5. P. 2235-2238.
18. Купка R.К., Anderson W.A. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69, no. 6. P. 3623-3632.
19. 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.
20. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 842 с. [Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. New York: Wiley, 1981.].
21. Holloway P.H., Kim T.J., Trexler J.T., Miller S., Fijot J.J., Lampert W.U., Haas T.W. Interfacial reactions in the formation of ohmic contacts to wide bandgap semiconductors // Appl. Surf. Sci. 1997. Vol. 117-118. P. 362-372.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)80109-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(97)80109-2)
22. 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](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00150-4)
23. Callegari A., Pan E.T.-S., Murakami M. Uniform and thermally stable AuGeNi ohmic contacts to GaAs // Appl Phys. Lett. 1985. Vol. 46, no. 12. P. 1141-1143.
24. Braslau N., Gunn J.B., Staples J.L. Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices // Solid-State Electron. 1967. Vol. 10, no. 5. P. 381-383.
25. Lim J.W., et al. PdGe-based ohmic contacts to high-low doped n-GaAs with and without undoped cap layer // J. Phys. D. 2000. Vol. 33, no. 13. P. 1611-1614. [doi:10.1088/0022-3727/33/13/309](https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/13/309)
26. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с. [Shur M. GaAs Devices and Circuits. Plenum Press. New York and London. 1987.].

27. Oktyabrsky S., Aboelfotoh M.O., Narayan J. Microstructure and chemistry of Cu-Ge ohmic contact layers to GaAs // Journal of electronic materials. 1996. Vol. 25, no. 11. P. 1673-1683. DOI: 10.1007/s11664-996-0022-3
28. Lee H.S., et al. The microstructure and electrical properties of nonalloyed epitaxial Au-Ge ohmic contacts to n-GaAs // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72, no. 10. P. 4773-4880.
29. Shih Y.C., Murakami M., Wilkie E.L., Callegari A.C. Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of Au-NiGe ohmic contact to n-type GaAs // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62, no. 2. P. 582-590.
30. Higman T.K., Emanuel M.A., Coleman J.J., Jeng S.J., Wayman C.M. Structural analysis of Au-Ni-Ge and Au-Ag-Ge alloyed ohmic contacts on modulation doped AlGaAs-GaAs heterostructures // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60, no. 2. P. 677-680.
31. Lee K.C. Degradation of GaAs/AlGaAs quantized hall resistors with alloyed AuGe/Ni contacts // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1998. Vol. 103, no. 2. P. 177-200. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.103.012>
32. Горлов М.И., Строгонов А.В. Геронтология интегральных схем: прогнозирование долговечности ИС // Петербургский журнал электроники. 1996. № 4. С. 35-41.
33. Vashchenko V.A., Sinkevitch V.F. Physical limitations of semiconductor devices. Springer, 2008. 330 p.
34. Mizuishi H. Kurono H. Sato, Kodera H. Degradation mechanism of GaAs MESFET's // IEEE Transactions on Electron Devices. 1979. Vol. 26, no. 7. P. 1008-1014. DOI: [10.1109/T-ED.1979.19537](https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19537)
35. 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. Chapter 6. P. 353-400.
36. Eun J., Cooper Jr. J.A. High temperature ohmic contact technology to n-type GaAs. Purdue University, School of Electrical and Computer Engineering, 1993, 102 p.

37. Болтовец Н.С., Иванов В.Н., Конакова Р.В., Литвин П.М., Литвин О.С., Миленин В.В., Прокопенко И.В. Фазовые и структурные изменения в многослойных контактах к n-GaAs, стимулированные быстрыми термическими обработками // Физика и техника полупроводников. 2003. Том 37, вып. 9. С. 1138-1142.
38. Ерофеев Е.В. Влияние термообработки на параметры контактов металл-полупроводник, сформированных на халькогенизированной поверхности n-GaAs // Физика и техника полупроводников. 2011. Том 45, вып. 9. С. 1191-1196.
39. Авдеев С.М., Ерофеев Е.В., Кагадей В.А. Исследование влияния сульфидной и ультрафиолетовой обработок поверхности n-i-GaAs на параметры омических контактов // Физика и техника полупроводников. 2011. Том 45, вып. 8. С. 1056-1061.
40. Anderson Jr. W.T., Christou A., Giuliani J.F. Laser annealed Ta/Ge and Ni/Ge ohmic contacts to GaAs // IEEE Electron Device Lett. 1981. Vol. EDL-2, no. 5. P. 115-117. DOI: [10.1109/EDL.1981.25363](https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25363)
41. Marshall E.D., Zhang B., Wang L.C., Jiao P.F., Chen W.X., Sawada T., Lau S.S., Kavanagh K.L., Kuech T.F. Nonalloyed ohmic contacts to n-GaAs by solid-phase epitaxy of Ge // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62, no. 3. P. 942-947.
42. Wang Y.G., Wang D., Ivey D.G. Thermal stability of Pd/Ge-based ohmic contacts to n-type GaAs // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84, no. 3. P. 1310-1315.
43. Кравченко В.М., Кравченко А.В. Надежный омический контакт к гетероэпитаксиальным структурам на основе арсенида галлия // Сборник статей 8-го Беларусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». Минск, 2011. С. 213-216.
44. Okunishi M., Uchibori C.J., Oku T., Otsuki A., Ono N., Murakami M. In_xGa_{1-x}As ohmic contacts to n-type GaAs prepared by sputter deposition // J. Electron. Mater. 1995. Vol. 24, no. 4. P. 333-339. DOI: [10.1007/BF02659696](https://doi.org/10.1007/BF02659696)

Study of thermal degradation of AuGeNi ohmic contacts of resonant tunneling diodes based on nanoscale AlAs / GaAs heterostructures

09, September 2012

DOI: **10.7463/0912.0453636**

Makeev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Nazarov V.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

mc.stiv@gmail.commeschkow@bmstu.ru

The authors conducted a study of thermal degradation of AuGeNi RTD ohmic contacts. They propose an analytical dependence of contact resistance of AuGeNi RTD ohmic contacts on temperature and time (valid at temperatures ≤ 300 ° C). It can be used to predict reliability of RTD and electronic devices based on it in the given operating conditions.

Publications with keywords: [resonant tunneling diode](#), [AuGeNi ohmic contact](#), [degradation](#), [thermal influence](#), [contact resistance](#), [AlGaAs heterostructure](#)

Publications with words: [resonant tunneling diode](#), [AuGeNi ohmic contact](#), [degradation](#), [thermal influence](#), [contact resistance](#), [AlGaAs heterostructure](#)

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 nano-diodes]. *Nanoinzheneriia* [Nanoengineering], 2011, no. 1, pp. 34-43.
2. Ivanov Iu.A., Malyshev K.V., Fedorkova N.V. Nanoelektronika na baze mnogosloinnykh 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. Rezonancno-tunnel'nyi diod na osnove geterosistemy GaAs/ AlAs dlia subgarmonicheskogo smesitelia [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. mezhdunar. konf.* [Questions of engineering nanotechnology : collected reports of Intern. Conf.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008, pp. 38-40.
5. Ivanov Iu.A., Malyshev K.V., Perunov Iu.M. i dr. Nanodiod dlia smesitel'ia [Nano-diode for mixer]. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii: tez. dokl. 12 mezhdunar. Krymskoi konf.* [Microwave and Telecommunication Technology: Proc. Reports of the 12th Intern. Crimean Conference]. 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, V.N. 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 mezhdunar. nauch. konf.* [Solid State Chemistry and Modern Micro-and Nanotechnology: Proc. Reports of the 7th Intern. 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. i dr. 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, Tekhnologiia, 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 naznacheniiia 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]. *Sistemotekhnika* [Systems engineering], 2010, no. 8. Available at: <http://systech.miem.edu.ru/2010/meshkov.htm> , accessed 26.09.2012.

13. Alkeev N.V. Analiz shumovykh i dinamicheskikh svoystv 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 25.01.2012.
17. Dallesasse J.M., El-Zein N., Holonyak N. Jr., Hsieh K.C., Burnham R.D., Dupuis R.D. Environmental degradation of Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum-well heterostructures. *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 68, no. 5, pp. 2235-2238.
18. Kupka R.K., Anderson W.A. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, no. 6, pp. 3623-3632.
19. 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.
20. Sze S.M. *Physics of Semiconductor Devices*. New York, Wiley, 1981. (Russ. ed.: Zi S. *Fizika poluprovodnikovykh priborov*. Moscow, Mir, 1984. 842 p.).
21. Holloway P.H., Kim T.J., Trexler J.T., Miller S., Fijot J.J., Lampert W.U., Haas T.W. Interfacial reactions in the formation of ohmic contacts to wide bandgap semiconductors. *Appl. Surf. Sci.*, 1997, vol. 117-118, pp. 362-372. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332\(97\)80109-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-4332(97)80109-2)
22. 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](http://dx.doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00150-4)
23. Callegari A., Pan E.T.-S., Murakami M. Uniform and thermally stable AuGeNi ohmic contacts to GaAs. *Appl Phys. Lett.*, 1985, vol. 46, no. 12, pp. 1141-1143.

24. Braslau N., Gunn J.B., Staples J.L. Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices. *Solid-State Electron.*, 1967, vol. 10, no. 5, pp. 381-383.
25. Lim J.W., et al. PdGe-based ohmic contacts to high-low doped n-GaAs with and without undoped cap layer. *J. Phys. D*, 2000, vol. 33, no. 13, pp. 1611-1614. [doi:10.1088/0022-3727/33/13/309](https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/13/309)
26. Shur M. *GaAs Devices and Circuits*. Plenum Press. New York and London. 1987. (Russ. ed.: Shur M. *Sovremennye pribory na osnove arsenida galliia*. Moscow, Mir, 1991. 632 p.).
27. Oktyabrsky S., Aboelfotoh M.O., Narayan J. Microstructure and chemistry of Cu-Ge ohmic contact layers to GaAs. *Journal of electronic materials*, 1996, vol. 25, no. 11, pp. 1673-1683. DOI: 10.1007/s11664-996-0022-3
28. Lee H.S., et al. The microstructure and electrical properties of nonalloyed epitaxial Au-Ge ohmic contacts to n-GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 72, no. 10, pp. 4773-4880.
29. Shih Y.S., Murakami M., Wilkie E.L., Callegari A.C. Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of Au-NiGe ohmic contact to n-type GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 62, no. 2, pp. 582-590.
30. Higman T.K., Emanuel M.A., Coleman J.J., Jeng S.J., Wayman C.M. Structural analysis of Au-Ni-Ge and Au-Ag-Ge alloyed ohmic contacts on modulation doped AlGaAs-GaAs heterostructures. *J. Appl. Phys.*, 1986, vol. 60, no. 2, pp. 677-680.
31. Lee K.C. Degradation of GaAs/AlGaAs quantized hall resistors with alloyed AuGe/Ni contacts. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1998, vol. 103, no. 2, pp. 177-200. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.103.012>
32. Gorlov M.I., Strogonov A.V. Gerontologiya integral'nykh skhem: prognozirovaniye dolgovechnosti IS [Gerontology of integrated circuits: predicting of durability of IP]. *Peterburgskii zhurnal elektroniki* [Petersburg Journal of Electronics], 1996, no 4, pp. 35-41.
33. Vashchenko V.A., Sinkevitch V.F. *Physical limitations of semiconductor devices*. Springer, 2008, 330 p.
34. Mizuishi H. Kurono H. Sato, Kodera H. Degradation mechanism of GaAs MESFET's. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, vol. 26, no. 7, pp. 1008-1014. DOI: [10.1109/T-ED.1979.19537](https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19537)
35. Irvin J.C. The Reliability of GaAs FETs. In book: *GaAs FET Principle and Technology*. J.W. Dilorenzo, D.D. Khandelwal (eds). MA, Artech House Publishers, 1982, ch. 6, pp. 353-400.
36. Eun J., Cooper Jr. J.A. *High temperature ohmic contact technology to n-type GaAs*. Purdue University, School of Electrical and Computer Engineering Publ., 1993, 102 p.
37. Boltovets N.S., Ivanov V.N., Konakova R.V., Litvin P.M., Litvin O.S., Milenin V.V., Prokopenko I.V. Fazovye i strukturnye izmeneniia v mnogoslownykh kontaktakh k n-GaAs, stimulirovannyye bystryimi termicheskimi obrabotkami [Phase and structural

changes in multilayer contacts to n-GaAs, stimulated by rapid thermal processing]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2003, vol 37, no. 9, pp. 1138-1142.

38. Erofeev E.V. Vliianie termoobrabotki na parametry kontaktov metall-poluprovodnik, sformirovannykh na khal'kogenizirovannoi poverkhnosti n-GaAs [The influence of thermal treatment on the parameters of the metal-semiconductor contacts, formed on the surface of n-GaAs]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2011, vol 45, no. 9, pp. 1191-1196.

39. Avdeev S.M., Erofeev E.V., Kagadei V.A. Issledovanie vliianiia sul'fidnoi i ul'trafioletovoi obrabotok poverkhnosti n-i-GaAs na parametry omicheskikh kontaktov [Investigation of the influence of sulphide and ultraviolet processing of surface ni-GaAs on the parameters of ohmic contacts]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2011, vol. 45, no. 8, pp. 1056-1061.

40. Anderson Jr. W.T., Christou A., Giuliani J.F. Laser annealed Ta/Ge and Ni/Ge ohmic contacts to GaAs. *IEEE Electron Device Lett.*, 1981, vol. EDL-2, no. 5, pp. 115-117. DOI: [10.1109/EDL.1981.25363](https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25363)

41. Marshall E.D., Zhang B., Wang L.C., Jiao P.F., Chen W.X., Sawada T., Lau S.S., Kavanagh K.L., Kuech T.F. Nonalloyed ohmic contacts to n-GaAs by solid-phase epitaxy of Ge. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 62, no. 3, pp. 942-947.

42. Wang Y.G., Wang D., Ivey D.G. Thermal stability of Pd/Ge-based ohmic contacts to n-type GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 84, no. 3, pp. 1310-1315.

43. Kravchenko V.M., Kravchenko A.V. Nadezhnyi omicheskii kontakt k geteroepitaksial'nym strukturam na osnove arsenida galliia [Reliable ohmic contact to the hetero-epitaxial structures based on gallium arsenide]. *Sbornik statei 8-go Belarussko-Rossiiskogo seminara «Poluprovodnikovye lazery i sistemy na ikh osnove»* [Collection of articles of the 8th Belarus-Russian Seminar "Semiconductor lasers and systems on their basis"]. Minsk, 2011, pp. 213-216.

44. Okunishi M., Uchibori C.J., Oku T., Otsuki A., Ono N., Murakami M. InxGa1-xAs ohmic contacts to n-type GaAs prepared by sputter deposition. *J. Electron. Mater.*, 1995, vol. 24, no. 4, pp. 333-339. DOI: [10.1007/BF02659696](https://doi.org/10.1007/BF02659696)