

## Исследования деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs наногетероструктур

© М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков,  
Ю.Н. Литвак, Н.А. Ветрова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Для радиотехнических устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых гетероструктур актуальна проблема обеспечения надежности вследствие чувствительности параметров гетероструктуры к процессам деградации ввиду малости толщин слоев. В данной работе проведены исследования термической деградации AlAs/GaAs наногетероструктуры и партии резонансно-туннельных диодов с использованием методов ИК-спектральной эллисометрии и ускоренного старения полупроводниковых устройств. В результате определены активационные параметры диффузии (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) Al и Si в резонансно-туннельной структуре и приконтактных областях и зависимость контактного сопротивления AuGeNi омических контактов от времени и температуры. Полученные в настоящей работе числовые характеристики основных деградационных процессов могут быть использованы для прогнозирования надежности резонансно-туннельных диодов и нелинейных преобразователей радиосигналов на их основе.*

**Ключевые слова:** AlAs/GaAs гетероструктура, приконтактные области, AuGeNi омические контакты, резонансно-туннельный диод, нелинейные преобразователи радиосигналов, деградационные явления, термическое воздействие, коэффициент диффузии, контактное сопротивление, ИК-спектральная эллисометрия.

**Введение.** Развитие радиоэлектронных систем (РЭС) телекоммуникаций, связи, радиолокации и др. 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 AlAs/GaAs гетероструктур с поперечным токопереносом [1 — 3].

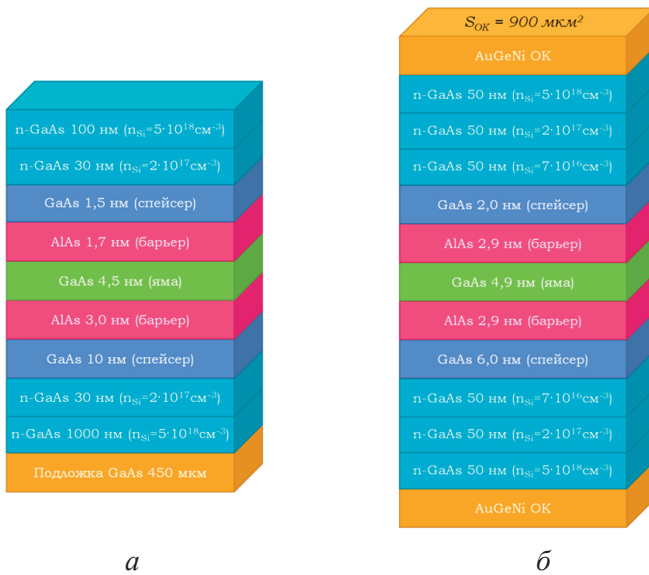
Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, химический состав), можно управлять формой вольт-амперной характеристики (ВАХ). Такое свойство РТД позволяет создавать на его базе различные нелинейные преобразователи радиосигналов: смесители, выпрямители, умножители и генераторы, функциональные характеристики которых

могут быть 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.

Структура РТД включает собственно резонансно-туннельную структуру (РТС) (набор слоев AlAs/GaAs), приконтактные области (слои Si-легированного GaAs) и омические контакты. Исходя из этого, форма ВАХ РТД определяется главным образом условиями токопере-носа в резонансно-туннельной структуре, сопротивлением приконтакт-ной области полупроводника  $R_{n-n+}$ , сопротивлением  $R_C$  омического кон-такта. В соответствии с этим основными направлениями изучения тер-мической деградации РТД являются исследования межслойной диффу-зии в РТС, диффузии Si в приконтактных областях и деградационных явлений в омических контактах в процессе изготовления РТД и экс-плуатации приборов на базе РТД.

**Методики экспериментов.** Объектами экспериментальных иссле-дований служили наноразмерная AlAs/GaAs гетероструктура с при-контактными областями и 32 РТД (восемь чипов) с одинаковой струк-турой (рис. 1).

Для экспериментального исследования деградации как AlAs/GaAs наногетероструктуры с приконтактными областями, так и РТД исполь-



**Рис. 1.** Структура исследуемых образцов: AlAs/GaAs наногетероструктура с приконтактными областями (а); структура резонансно-туннельных диодов (б)

зовался метод ускоренного старения путем термического воздействия на образец. Температура воздействия была выбрана 300 °С. Предполагается [14], что при данной температуре действуют те же механизмы отказов, что и при нормальных условиях эксплуатации.

Термическое воздействие на AlAs/GaAs гетероструктуру с приконтактными областями проводилось в течение 4, 6, 8 и 10 ч (суммарное время термического воздействия 28 ч) в воздушной среде в электропечи сопротивления СНОЛ 6/11, предназначенной для термообработки изделий при температурах от 50 до 1150 °С с точностью  $\pm 5$  °С.

Воздействие на 32 РТД также 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 40...300 °С с точностью  $\pm 5$  °С.

Исследование AlAs/GaAs гетероструктуры с приконтактными областями проводилось на ИК-спектроскопическом эллипсометре IR-VASE компании J.A. Woollam Co., Inc. Основные технические характеристики прибора: спектральный диапазон — 300...5000  $\text{см}^{-1}$  (длина волны — от 2 до 33  $\mu\text{м}$ ); спектральное разрешение — 1...64  $\text{см}^{-1}$ ; углы падения — от 30 до 90° (погрешность установки угла  $\pm 0,005^\circ$ ).

Эллипсометрические исследования состоят из следующих основных этапов (рис. 2): измерение спектров эллипсометрических параметров  $\Psi$  и  $\Delta$ , создание эллипсометрической модели (оптические константы и толщины слоев), варьирование параметров модели для получения наилучшего совпадения экспериментальных и генерированных на базе этой модели данных, анализ и интерпретация полученных данных.

Исследование гетероструктуры на ИК-спектроскопическом эллипсометре IR-VASE проводилось в диапазоне длин волн 300...3000  $\text{см}^{-1}$  при спектральном разрешении 4  $\text{см}^{-1}$  и углах падения излучения на образец 60 и 70°. Построение эллипсоме-



Рис. 2. Алгоритм исследований с помощью ИК-спектрального эллипсометра IR-VASE

трических моделей выполнялось в программной среде WVASE32 [15], с помощью которой проводят обработку измерений эллипсометра IR-VASE.

Измерения ВАХ РТД до и после термических воздействий проводились на микронзондовом стенде, состоящем из микронзондового устройства, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Микронзондовый стенд позволяет измерять ВАХ РТД в диапазоне напряжений 0...36 В (точность  $\Delta U = \pm 1$  мВ) и токов от 0...1 А (точность  $\Delta I = \pm 10$  мкА).

**Исследование термической диффузии в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах.** Исследование наноразмерной AlAs/GaAs гетероструктуры с приконтактными областями проводилось с целью определения диффузионного размытия элементов, входящих в состав данной гетероструктуры, в результате термического воздействия. По этим данным оценивалась величина коэффициентов диффузии Si и Al.

По литературным данным [16–31], коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs сильно варьируются при изготовлении методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре от 600...650 °С. В работе [32] получена количественная оценка коэффициентов диффузии Al и Si:

$$D_{Al, Si} = 0,17 \exp\left(-\frac{3,5 \text{ эВ}}{k_B T}\right) \left(\frac{n_{Si}}{n_i}\right)^3, \quad (1)$$

где  $k_B = 8,617 \cdot 10^{-5}$  — постоянная Больцмана, эВ·К<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, К;  $n_{Si}$  — концентрация легирующей примеси (Si), см<sup>-3</sup>;  $n_i$  — концентрация собственных носителей заряда, см<sup>-3</sup>.

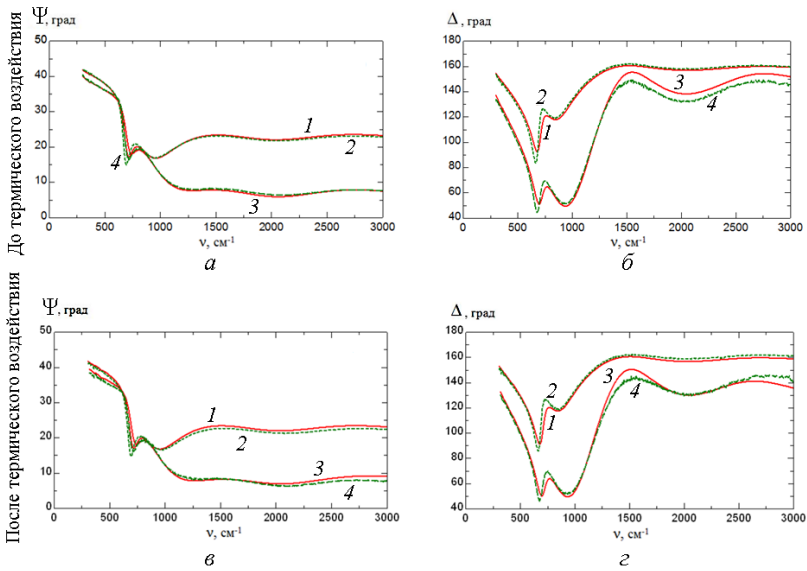
Коэффициенты диффузии Si и Al сильно зависят от температуры и концентрации легирующей примеси (в данном случае кремния). Диффузионным размытием при температуре 300 °С в нелегированных и слаболегированных областях можно пренебречь (оно будет в пределах погрешности измерения). Исходя из этого, оценка скорости диффузионных процессов Si имеет смысл только для областей сильнолегированного  $n$ -GaAs со степенью легирования кремнием более  $1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

В соответствии с этим были разработаны эллипсометрические модели исследуемой AlAs/GaAs гетероструктуры с приконтактными областями до и после 4, 10, 18 и 28 ч термического воздействия (табл. 1). Эти модели имеют одинаковую структуру. Для оценки глубины диффузии Si в эллипсометрическую модель гетероструктуры были введены градиентные слои (см. табл. 1). Экспериментальные и вычисленные на базе эллипсометрических моделей спектры параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  AlAs/GaAs гетероструктуры до и после 28 ч термических воздействий представлены на рис. 3.

**Эллипсометрические модели AlAs/GaAs гетероструктуры  
с приконтактными областями при различных временах  
термического воздействия**

Описание слоя	Толщины слоев после заданного времени термических испытаний, нм				
	0 ч	4 ч	10 ч	18 ч	28 ч
Верхний шероховатый слой	24,9±2,0	23,3±2,1	24,9±2,2	25,0±2,0	15,9±2,1
<i>n</i> -GaAs, сильнолегированный Si ( $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )	100,3±1,7	98,6±1,6	97,2±1,8	96,3±1,7	103,4±1,6
Градиентный слой	0	2,7±1,5	4,4±1,5	5,4±1,6	6,7±1,5
<i>n</i> -GaAs, легированный Si ( $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ )	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Арсенид галлия GaAs (яма)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
<i>n</i> -GaAs, легированный Si ( $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ )	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Градиентный слой	0	2,9±1,6	4,5±1,8	5,6±1,9	6,9±1,8
<i>n</i> -GaAs, сильнолегированный Si ( $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )	1005,0±3,0	1003,6±3,0	992,9±3,6	990,4±3,5	991,2±3,6
Градиентный слой	0	3,2±1,8	4,7±1,8	5,8±2,0	7,1±1,9
Подложка GaAs (мм)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Нижний шероховатый слой	90,5±10,0	89,2±10,0	88,8±10,0	88,6±10,0	74,9±10,0

Оптическая модель (показатели преломления  $n$  и поглощения  $k$ ) эпитаксиального GaAs были построены с помощью модуля General Oscillator Layer программной среды WVASE32 на основе трех осцилляторов Лоренца (рис. 4, *a*). Центральные волновые числа осцилляторов



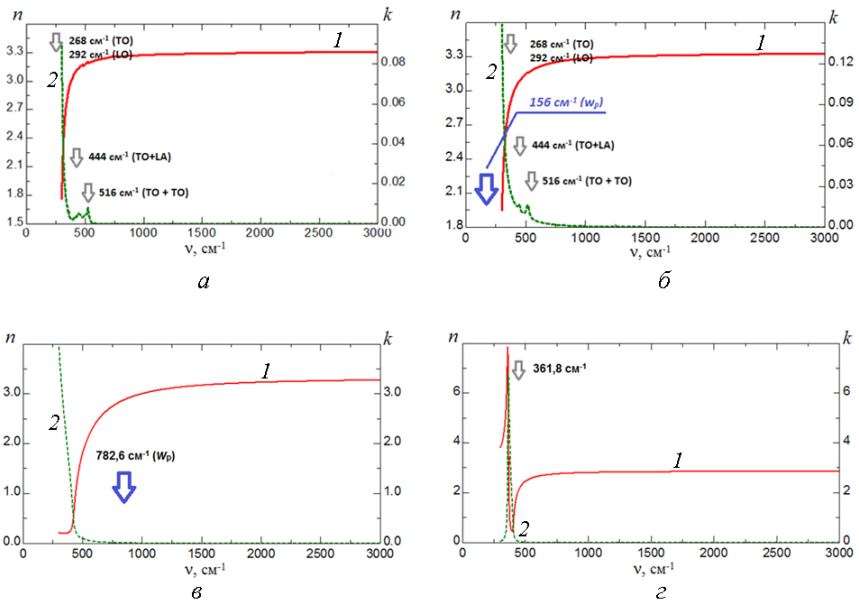
**Рис. 3.** Спектры эллипсометрических параметров  $\Psi$  ( $a, в$ ) и  $\Delta$  ( $б, г$ ) наноразмерной AlAs/GaAs гетероструктуры с приконтактными областями до ( $a, б$ ) и после 28 ч ( $в, г$ ) термического воздействия: 1 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения  $60^\circ$ ; 2 — экспериментальные данные при угле падения  $60^\circ$ ; 3 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения  $70^\circ$ ; 4 — экспериментальные данные при угле падения  $70^\circ$

оказались равными  $268, 444$  и  $516 \text{ см}^{-1}$ . Осциллятор с волновым числом  $268 \text{ см}^{-1}$  соответствует поперечным оптическим колебаниям фононов (TO) ( $268 \text{ см}^{-1}$ ) и продольным оптическим колебаниям фононов (LO) (малая добавка на  $292 \text{ см}^{-1}$ ). Центральные волновые числа осцилляторов на  $444 \text{ см}^{-1}$  и  $516 \text{ см}^{-1}$  соответствуют гармоникам колебаний фононов — сумме поперечных оптических колебаний и продольных акустических (TO + LA) и сумме двух продольных оптических колебаний (TO + TO) соответственно [33].

Оптические константы Si-легированного GaAs представляют собой константы исходного GaAs с дополнительной полосой поглощения, обусловленной наличием свободных электронов вследствие легирования. Частота этой полосы определяется значением плазменной частоты  $\omega_p$  [34]:

$$\omega_p = \frac{Ne^2}{\epsilon\epsilon_0 m^*}, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $N$  — концентрация свободных носителей заряда;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды (для



**Рис. 4.** Оптические константы GaAs (а), легированного ( $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )  $n$ -GaAs (б), сильнолегированного ( $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )  $n$ -GaAs (в) и арсенида алюминия AlAs (г):  $I$  — показатель преломления;  $2$  — показатель поглощения; ТО — поперечные оптические колебания фононов; LO — продольные оптические колебания фононов; ТО + LA — сумма частот продольных колебаний и частот, соответствующих поглощению решетки; ТО + ТО — сумма двух продольных колебаний

GaAs  $\epsilon = 10,9$ );  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума;  $m^*$  — эффективная масса носителей заряда (для GaAs эффективная масса электрона  $m^* = 0,067m_0$ , где  $m_0$  — масса электрона).

Произведя расчет по формуле (2), мы выяснили, что для уровней легирования  $N$ , равных  $2 \cdot 10^{17}$  и  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , плазменная частота равна 156,5 и  $782,6 \text{ cm}^{-1}$  соответственно. Исходя из этого, были определены оптические константы легированного (степень легирования Si  $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) и сильнолегированного  $n$ -GaAs (степень легирования Si  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) (рис. 4, б, в).

Оптические константы арсенида алюминия AlAs (рис. 4, г) были построены на основе осциллятора Лоренца с центральным волновым числом, равным  $361,8 \text{ cm}^{-1}$  [35, 36].

Для учета шероховатости был использован метод эквивалентной пленки [37–39] с процентным содержанием GaAs и воздуха 50/50%, а показатели преломления и поглощения моделируемых шероховатых слоев рассчитывались по формуле Бруггемана [15]. На поверхности GaAs также есть тонкий слой естественного оксида, состоящий из оксидов галлия  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  и мышьяка  $\text{As}_2\text{O}_3$  толщиной порядка 2 нм. Оксидный слой практически не влияет на результаты оптических измерений в инфра-

красной области, так как оказывает влияние только при энергии фотонов, соизмеримых с шириной запрещенной зоны для оксидов (порядка 5 эВ) [33]. По этой причине в эллипсометрическую модель он не включался.

В результате были определены толщины градиентных слоев (см. табл. 1), возникших в результате диффузионного ухода Si из высоколегированных слоев GaAs ( $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Эти данные были использованы при определении коэффициента диффузии кремния в арсениде галлия, при этом за основу взято соотношение из работы [32]:

$$D_{\text{Al,Si}} = 0,22 \exp\left(-\frac{3,5 \text{ эВ}}{k_B T}\right) \left(\frac{n_{\text{Si}}}{n_i}\right)^3. \quad (3)$$

Таким образом, диффузионного размытия в исследованной резонансно-туннельной структуре (диффузия Al) и в приконтактных областях со степенью легирования менее  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (диффузия Si) при температуре 300 °C замечено не было. Обнаружено только диффузионное размытие областей сильнолегированного *n*-GaAs.

**Исследование термической деградации РТД.** В работах [40, 41] показано, что диффузионное размытие в резонансно-туннельной структуре влияет на форму ВАХ. Моделирование диффузионных процессов в программно-расчетном комплексе dif2RTD [42] свидетельствует о том, что при температуре 300 °C диффузионное размытие в исследуемой нами резонансно-туннельной структуре пренебрежимо мало и не приводит к 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 [43]:

$$R_C = R_{C0} + \gamma \exp\left(\frac{-E_a}{2kT}\right) \sqrt{t}, \quad (4)$$

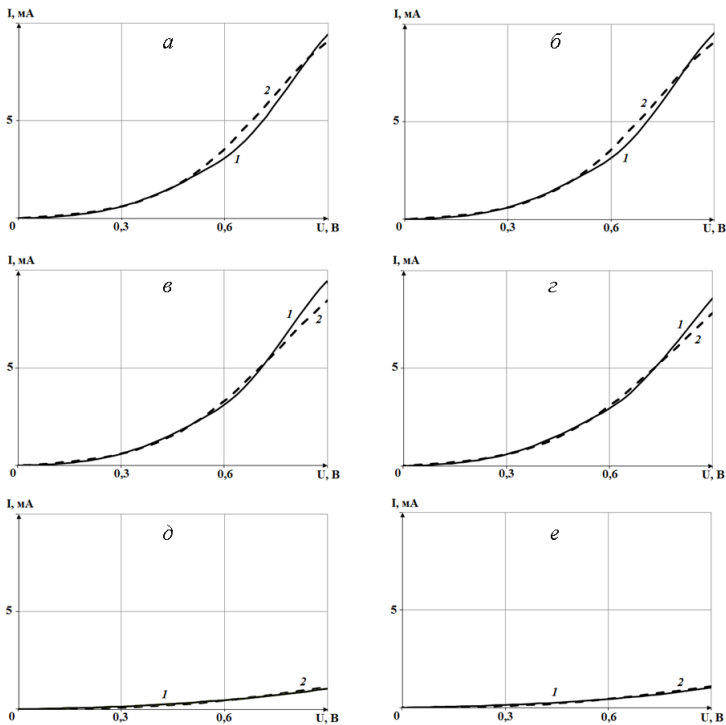
где  $R_{C0}$  — контактное сопротивление в начальный момент времени (сразу после изготовления), Ом. Для площади контакта  $S_C = 900 \text{ мкм}^2$  и при значении удельного контактного сопротивления  $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  [44, 45]  $R_{C0}$  оказывается равным  $\sim 0,11 \text{ Ом}$ ;  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности между контактным сопротивлением  $R_C$  (Ом), температурой  $T$  (К),



энергией активации  $E_a$  (эВ) и временем  $t$  (с), был выбран равным 25;  $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$  — постоянная Больцмана, эВ·К<sup>-1</sup>.

Энергия активации  $E_a$  деградационных явлений AuGeNi омических контактов равна 1 эВ [46, 47].

В результате экспериментальных исследований были получены ВАХ 32 РТД до и после 1, 3, 8, 17 и 28 ч термического воздействия и проведена их статистическая обработка. Технологический разброс ВАХ находится в пределах погрешности измерений, поэтому на рис. 5 (кривая 1) приведены усредненные по всей партии ВАХ. 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.



**Рис. 5.** Экспериментальные (1) и смоделированные (2) ВАХ РТД до (а); после 1 (б); 3 (в); 8 (г); 17 (д) и 28 (е) ч термического воздействия

**Выводы.** Определены численные характеристики основных деградационных процессов, происходящих в структуре РТД:

- активационные параметры диффузии Al и Si в резонансно-туннельной структуре и приконтактных областях;
- зависимость контактного сопротивления  $R_C$  AuGeNi омических контактов от времени и температуры.

В исследуемых РТД на основе AlAs/GaAs наногетероструктур изменение ВАХ вызвано преимущественно деградацией омических контактов. Деградации резонансно-туннельной структуры замечено не было. 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.

Полученные в настоящей работе числовые характеристики основных деградационных процессов могут быть использованы для прогнозирования надежности РТД и нелинейных преобразователей радиосигналов на их основе.

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

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Синякин В.Ю., Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. *Наноинженения*, 2011, № 1, с. 34–43.
- [2] Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Нанoeлектроника на базе многослойных гетероструктур. *Изв. 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.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [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., Коломийцева 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 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*, т. 71, вып. 9, с. 128–133.

- [10] Георгиевский А.М., Громов Д.В., Дудинов К.В. Исследование направлений применения резонансно-туннельного диода в интегральных схемах СВЧ диапазона. *Микроэлектроника*, 1996, т. 25, № 4, 249 с.
- [11] Белов Л.А. *Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты*. Москва, Электроника: наука, технологии, бизнес, 2004, № 2, 44 с.
- [12] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Попов И.И. Повышение показателей качества назначения субгармонического смесителя радиосигналов за счет применения резонансно-туннельного диода. *Сетевой электронный научный журнал «Системотехника»*, 2010, № 8.
- [13] Алкеев Н.В. *Анализ шумовых и динамических свойств субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде*. Москва, Радиотехника и электроника, 2004, т. 49, № 104, 1258 с.
- [14] Горлов М.И., Строгонов А.В. Геронтология интегральных схем: прогнозирование долговечности ИС. *Петербургский журнал электроники*, 1996, № 4, с. 35–41.
- [15] IR-VASE User's Manual / J.A.Woollam Co., Inc., 2006.
- [16] Mei P., Yoon H.W., Venkatesan T., Schwarz S.A., Harbison J.P. Kinetics of silicon-induced mixing of AlAs-GaAs superlattices. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, vol. 50, № 25, pp. 1823–1825.
- [17] Yu S., Gösele U.M., Tan T.Y. A model of Si Diffusion in GaAs based on the effect of the Fermi level. *J. Appl. Phys.*, 1989, vol. 66, № 7, pp. 2952–2961.
- [18] Tan T.Y., Gösele U. Mechanisms of doping-enhanced superlattice disordering and of gallium self-diffusion in GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, vol. 52, № 15, pp. 1240–1242.
- [19] Tan T.Y., Yu S., Gösele U. Determination of vacancy and self-interstitial contributions to gallium self-diffusion in GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 70, № 9, pp. 4823–4826.
- [20] Gösele U. et al. Diffusion in GaAs and related compounds: recent developments. *Defect and Diffusion Forum*, 1997, vols. 143–149, pp. 1079–1094.
- [21] Chen C.-H., Gösele U.M., Tan T.Y. Dopant diffusion and segregation in semiconductor heterostructures: Part III, diffusion of Si into GaAs. *Appl. Phys. A*, 1999, vol. 69, pp. 313–321.
- [22] You H.-M., Gösele U.M., Tan T.Y. A study of Si outdiffusion from predoped GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1993, vol. 73, no. 11, pp. 7207–7216.
- [23] Harrison I., Ho H.P., Baba Ali N. Diffusion induced disorder of GaAs/AlGaAs superlattices. *J. of Electronic Materials*, 1991, vol. 20, no. 6, pp. 449–456.
- [24] Pavesi L. et al. Role of point defects in the silicon diffusion in GaAs and Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As and in the related superlattice disordering. *J. Appl. Phys.* 1992, vol. 71, no. 5, pp. 2225–2237.
- [25] Lee K.H., Stevenson D.A., Deal M.D. Diffusion kinetics of Si in GaAs and related defect chemistry. *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 68, no. 8, pp. 4008–4013.
- [26] Bracht H., Haller E.E., Eberl K., Cardona M. Self- and interdiffusion in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs isotope heterostructures. *Appl Phys. Lett.*, 1999, vol. 74, no. 1, pp. 49–51.
- [27] Wee S.F., Chai M.K., Homewood K.P., Gillin W.P. The activation energy for GaAs/AlGaAs interdiffusion. *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 82, no. 10, pp. 4842–4846.
- [28] Olmsted B.L., Houde-Walter S.N. Al-Ga interdiffusion through group III-vacancy second nearest-neighbor hopping. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, vol. 63, no. 4, p. 530–532.
- [29] Wang L., Hsu L., Haller E.E. et al. Ga self-diffusion in GaAs isotope heterostructures. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 76, pp. 2342–2345.
- [30] Ono H., Ikarashi N., Baba T. Al diffusion into GaAs monatomic AlAs layers investigated by localized vibrational modes. *Appl Phys. Lett.*, 1995, vol. 66, no. 5, pp. 601–603.

- [31] Murray J.J., Deal M.D., Allen E.L., Stevenson D.A., Nozaki S. Modeling Silicon Diffusion in GaAs Using Well Defined Silicon Doped Molecular Beam Epitaxy Structures. *J. of the Electrochemical Society*, 1992, vol. 137, no. 7, pp. 2037–2041.
- [32] Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А. Исследование деградиционных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии. *Наноинженерия*, 2011, № 4, с. 44–48.
- [33] Palik E.D. *Handbook of optical constants of solids, vol. 1*. N.Y.: Academic Press, 1985, 785 p.
- [34] Fox M. *Optical properties of solids*. Oxford University Press, 2001, 318 p.
- [35] Palik E.D. *Handbook of optical constants of solids, vol. 2*. N.Y.: Academic Press, 1991, 1096 p.
- [36] Perkowitz S., Sudharsanan R., Yom S.S., T.J. Drummond. AlAs Phonon Parameters and Heterostructure Characterization. *Solid State Commun.*, 1987, vol. 62, p. 645.
- [37] Аззам Р., Башара Н. *Эллипсометрия и поляризованный свет*. Москва, Мир, 1985. [Azzam R.M.A., Bashara N.M. *Ellipsometry and Polarized Light*. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1977.]
- [38] Свиташева С.Н. *Эллипсометрия шероховатых поверхностей*. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2009, 240 с.
- [39] Aspnes D.E. Optical properties of thin films. *Thin Solid Films*, 1981, vol. 89, № 3, pp. 249–262.
- [40] Агасиева С.В., Шашурин В.Д. Влияние процесса деградации нанодиода на качество нелинейного преобразователя сигналов. *Наноинженерия*, 2011, № 3, с. 36–40.
- [41] 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, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/228008.html>.
- [42] 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.
- [43] 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: <http://dx.doi.org/10.7463/0912.0453636>.
- [44] Murakami M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2002, vol. 3, pp. 1–27.
- [45] 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.
- [46] Vashchenko V.A., Sinkevitch V.F. Physical limitations of semiconductor devices. *Springer*, 2008, p. 330.
- [47] Irvin J.C. The Reliability of GaAs FETs in GaAs FET Principle and Technology, J.W. Dilorenzo and D.D. Khandelwal (eds). *MA: Artech House*, chapter 6, 1982.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А., Литвак Ю.Н., Ветрова Н.А. Исследования деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs наногетероструктур. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/811.html>

**Макеев Мстислав Олегович** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Инженер 1-й категории УИЦ НТ НМСТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: наноэлектроника, нанодиагностика, спектральная эллипсометрия, надежность наноэлектронных устройств. e-mail: mc.stiv@gmail.com

**Иванов Юрий Александрович** окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1960 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: нанотехнологии, наноэлектроника, нанодиагностика, наноинженерия. e-mail: nz1148@mail.ru

**Мешков Сергей Анатольевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: нанотехнологии, надежность технических систем, наноэлектроника. e-mail: meschkow@bmstu.ru

**Литвак Юрий Николаевич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Инженер 1-й категории УИЦ НТ НМСТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: нанотехнологии, нанодиагностика. e-mail: yourie@yandex.ru

**Ветрова Наталия Алексеевна** окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: надежность технических систем, нанотехнологии. e-mail: vetrova@bmstu.ru