

Оценка стойкости к диффузионной деструкции наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур методом ИК-спектральной эллипсометрии

© М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия

E-mail: mc.stiv@gmail.com

(Получена 17 марта 2015 г. Принята к печати 3 апреля 2015 г.)

Разработана методика оценки качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур с точки зрения их стойкости к диффузионной деструкции. Методом ИК-спектральной эллипсометрии выявлено диффузионное размытие слоев AlAs/GaAs гетероструктуры и определены коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs.

1. Введение

Одним из путей повышения качества радиоэлектронных систем является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантово-размерных эффектов токопереноса. К таким приборам относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на базе многослойных наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур (РТГС) с поперечным токопереносом. Достоинствами РТД являются высокое быстродействие диода (частота до 1 ТГц) вследствие малого времени туннелирования электронов, а также подавление дробовых шумов [1].

Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, элементный состав), можно варьировать форму вольт-амперной характеристики (ВАХ). Такие свойства РТД позволяют создавать на его базе различные нелинейные преобразователи радиосигналов: смесители, выпрямители, умножители и генераторы для диапазонов СВЧ и КВЧ, функциональные характеристики которых могут быть улучшены за счет оптимизации формы ВАХ нелинейного элемента [2–5]. Если исследованиям свойств самих РТД и проблемам их радиотехнических применений посвящена обширная библиография, то надежность РТД изучена слабо. Задача исследования надежности РТД решается путем анализа кинетики физических процессов деградации в структуре РТД.

РТД содержит резонансно-туннельную структуру (РТС) (набор слоев AlAs/GaAs), приконтактные области (слои Si-легированного GaAs) и омические контакты. РТС состоит из слоев толщиной до нескольких атомарных слоев, чем обусловлена высокая чувствительность ВАХ РТД к изменению ее параметров. Деградационные процессы — межслойная диффузия Al в РТС и Si в приконтактных областях — приводят к изменению формы потенциальных барьеров и ямы и, как следствие, к изменению условий токопереноса в структуре (рис. 1), а диффузионное размытие омических контактов приводит к увеличению их контактного сопротивления. Эти

процессы в свою очередь приводят к „дрейфу“ ВАХ РТД и ухудшению выходных электрических характеристик нелинейных преобразователей радиосигналов на основе РТД.

Целью настоящей работы является разработка методики, позволяющей определять коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs и проводить диагностику качества резонансно-туннельных гетероструктур с точки зрения их стойкости к диффузионной деструкции. Знание кинетики диффузионных процессов в структуре РТД позволит спрогнозировать надежность по постепенным отказам РТД и нелинейных преобразователей радиосигналов на их основе.

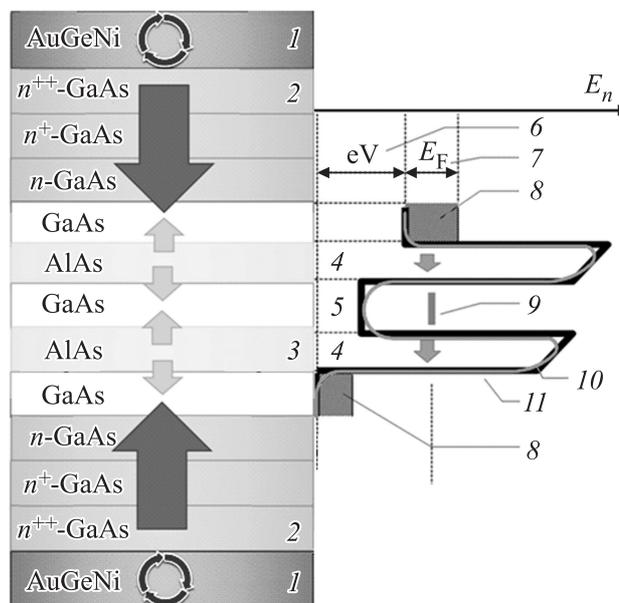


Рис. 1. Структура и возможные деградационные явления в РТД. 1 — омические контакты, 2 — приконтактные области, 3 — РТС, 4 — барьер, 5 — яма, 6 — напряжение, 7 — энергия Ферми, 8 — электроны, 9 — резонансный уровень, 10 — размытие профиля, 11 — профиль дна зоны проводимости.

2. Основная часть

Рассматривается деградация AlAs/GaAs РТГС в результате диффузии Al в РТС и Si в приконтактных областях. Интенсивность диффузионных процессов в AlAs/GaAs РТГС характеризуется коэффициентами диффузии Al и Si в GaAs. В соответствии с этим оценка качества РТГС (с точки зрения стойкости к диффузионной деструкции) проводится исходя из величины коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs.

По литературным данным [6–21] коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs сильно варьируются в зависимости от условий изготовления гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Это связано с тем, что дефектность выращиваемых гетероструктур зависит от большого числа технологических факторов, таких как температура подложки (600–650°C) при проведении МЛЭ, давление в камере, температура и время проведения отжига, дефектность исходной подложки и многое другое.

Основным механизмом диффузии как Al, так и Si в GaAs является диффузия по вакансиям галлия V_{Ga} . Это связано с тем, что атомы Al и Si имеют сходные массы и размеры и располагаются в подрешетке галлия (при степенях легирования менее $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Это позволяет оценивать коэффициент диффузии Al в GaAs по коэффициенту диффузии Si и наоборот. При этом диффузия происходит преимущественно по отрицательно ионизованным по вакансиям галлия с зарядовым состоянием $-3 (V_{Ga}^{3-})$. Коэффициент диффузии зависит также от концентрации n -легирующей примеси в соответствии с эффектом уровня Ферми [7–12, 22–25].

Для оценки коэффициентов диффузии была разработана методика диагностики наноразмерных AlAs/GaAs РТГС. Она структурно состоит из следующих основных этапов (рис. 2): измерение эллипсометрических параметров наноразмерных AlAs/GaAs РТГС методом ИК-спектральной эллипсометрии (ИК-СЭ) до и после термического воздействия, построение эллипсометрической модели, определение профиля распределения Si в резонансно-туннельных гетероструктурах, расчет коэффициентов диффузии исходя из найденного профиля.

Метод ИК-спектральной эллипсометрии широко используется для определения толщин и оптических свойств тонких пленок [26–29], полупроводниковых гетероструктур [30–33], изменений химического состава в результате модификации [34–36] и т. п.

Эллипсометрические исследования состоят из следующих основных этапов: получение экспериментальных данных (спектры Ψ и Δ), создание эллипсометрической модели (оптические константы и толщины слоев), корректировка параметров модели для получения наилучшего совпадения экспериментальных и сгенерированных на базе этой модели данных, получение требуемых результатов исследования.

Эллипсометрическая модель исследуемых образцов AlAs/GaAs РТГС включает в себя структуру образца, оптические константы и толщины всех слоев. Измеренные

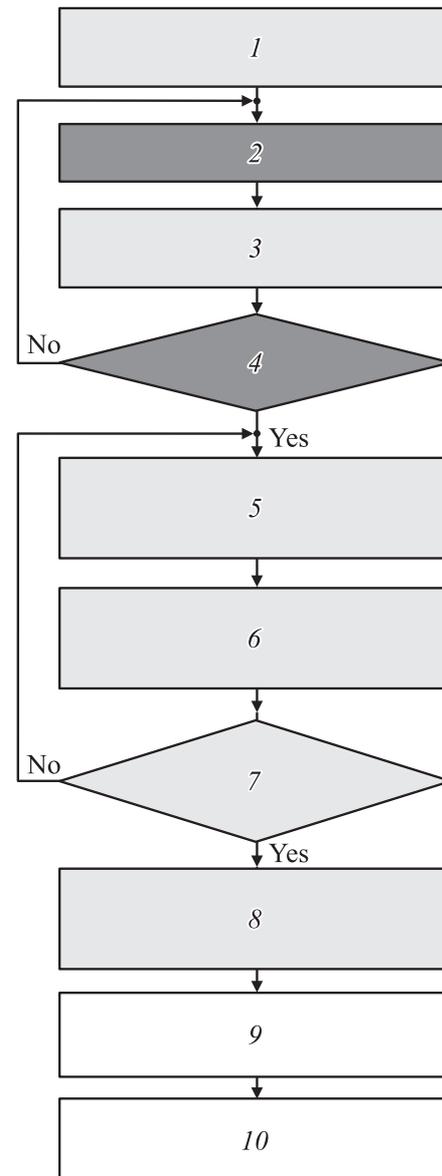


Рис. 2. Структурная схема методики диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-спектральной эллипсометрии. 1 — измерение на ИК-спектральном эллипсометре до термического воздействия, 2 — термическое воздействие, 3 — измерение на ИК-спектральном эллипсометре после термического воздействия, 4 — требуемое число циклов термических воздействий, 5 — разработка эллипсометрических моделей исследуемых AlAs/GaAs наноГС (структура образца и оптические модели слоев), 6 — корректировка эллипсометрической модели для наилучшего совпадения данных на базе модели с экспериментальными данными, 7 — СКО экспериментальных данных и данных на базе модели минимально, 8 — результаты исследования методом ИК-СЭ (химический состав, структура, толщины слоев до и после термического воздействия), 9 — моделирование диффузионных процессов в программно-расчетном комплексе dif2RTD, 10 — определение коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs.

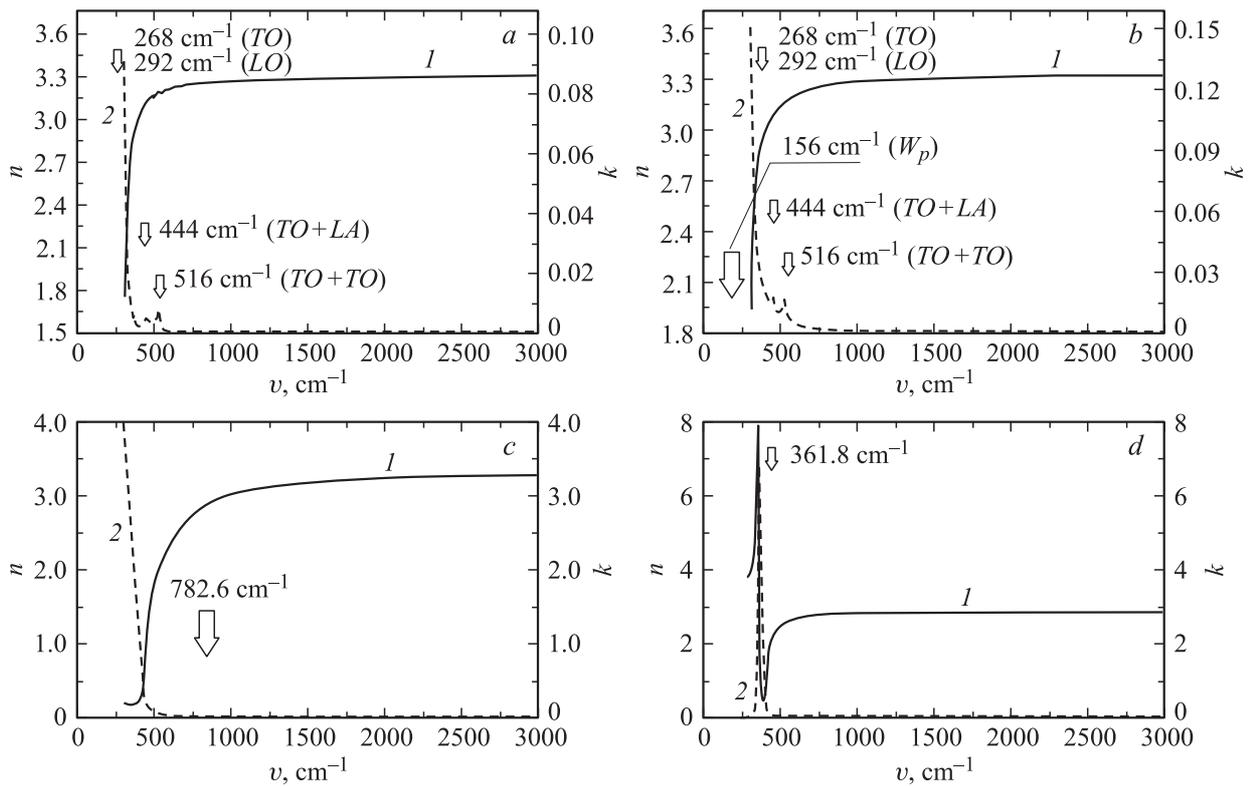


Рис. 3. Оптические константы GaAs (a), легированного ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) n-GaAs (b), сильно легированного ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) n-GaAs (c) и арсенида алюминия AlAs(d): 1 — показатель преломления, 2 — показатель поглощения, TO — поперечные оптические колебания фононов; LO — продольные оптические колебания фононов; TO + LA — сумма частот поперечных колебаний и частот, соответствующих поглощению решетки; TO + TO — сумма двух поперечных колебаний.

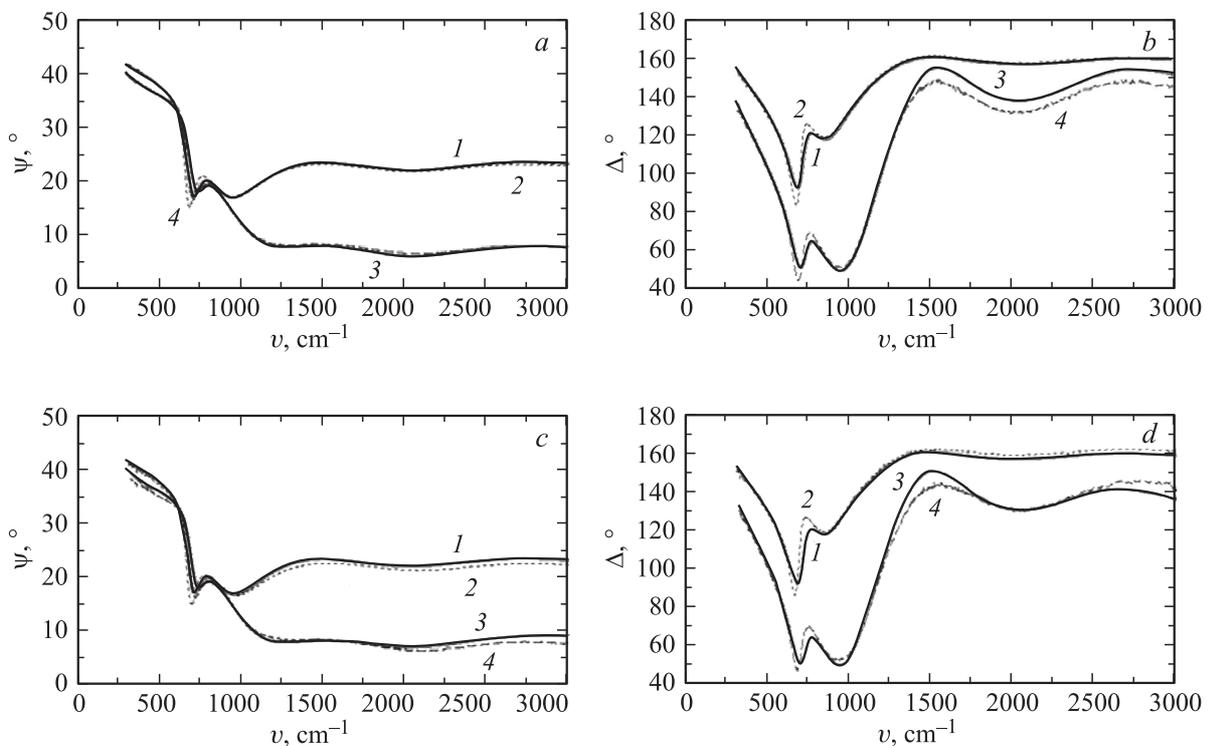


Рис. 4. Спектры эллипсометрических параметров Ψ (a, c) и Δ (b, d) AlAs/GaAs РТГС до (a, b) и после 28 ч (c, d) термического воздействия: 1 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения 60° ; 2 — экспериментальные данные при угле падения 60° ; 3 — данные, вычисленные на базе модели, при угле падения 70° ; 4 — экспериментальные данные при угле падения 70° .

оптические константы слоев наноразмерных полупроводниковых гетероструктур $A^{III}B^V$ приведены на рис. 3.

Модель уточняется в процессе исследования. На основе уточнённой эллипсометрической модели делаются выводы о химическом составе, структуре и толщинах слоев AlAs/GaAs РТГС до и после термического воздействия.

В эллипсометрические модели исследуемых гетероструктур были заложены градиентные слои, с помощью которых определялась глубина диффузии Si при термической обработке. Градиентный слой является совокупностью эквивалентных слоев с процентным содержанием Si-легированного и нелегированного GaAs, определяемым профилем распределения диффузанта.

Расчет коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs проводится с использованием разработанного авторами программно-расчетного комплекса dif2RTD [37] для моделирования диффузионных процессов в наноразмерных AlAs/GaAs РТГС и ВАХ РТД.

Температура, длительность и количество термических воздействий (искусственное старение) и соответственно количество измерений на ИК-спектральном эллипсометре определяются исходя из априорных данных о химическом составе исследуемой наноразмерной $A^{III}B^V$ -гетероструктуры и о коэффициентах диффузии элементов гетероструктуры РТД.

Апробация методики диагностики качества наноразмерных AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур на основе ИК-СЭ проводилась на двух наноразмерных гетероструктурах, отличающихся структурой слоев и температурой подложки при эпитаксиальном росте:

– GaAs (20 нм)/*n*-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 100 нм)/GaAs (300 нм)/GaAs (подложка 450 мкм) — гетероструктура № 1 (температура МЛЭ 650°C);

– *n*-GaAs ($n_{Si} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 100 нм)/*n*-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 30 нм)/GaAs (1.5 нм)/AlAs (1.7 нм)/GaAs (4.5 нм)/ AlAs (3.0 нм)/GaAs (10.0 нм)/*n*-GaAs ($n_{Si} = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 30 нм)/ *n*-GaAs ($n_{Si} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 100 нм)/GaAs (подложка 450 мкм) — гетероструктура № 2 (температура МЛЭ 600°C).

Термическое воздействие на гетероструктуру № 1 проводилось при температуре 530°C, давлении $p = 10^{-4}$ Па в течение 2 ч. Для гетероструктуры № 2 оно проводилось при температуре 300°C в течение 4, 6, 8 и 10 ч (суммарное время отжига 28 ч) в воздушной среде.

Построение эллипсометрических моделей исследуемых гетероструктур в совокупности с анализом выявленных изменений эллипсометрических параметров Ψ и Δ до и после термических воздействий (рис. 4) позволило выявить диффузионное размытие слоев, входящих в состав рассматриваемых гетероструктур (рис. 5).

На основе этого были определены коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs в гетероструктуре № 1 [30]:

$$D_{Al, Si} = 0.17 \exp\left(-\frac{3.5}{kT}\right) \left(\frac{n_{Si}}{n_i}\right)^3, \quad (1)$$

где $D_{Al, Si}$ — коэффициенты диффузии Al и Si в GaAs, k — постоянная Больцмана, T — темпе-

a		b	
24.9 ± 2.0 nm	1	15.9 ± 2.1 nm	1
100.3 ± 1.7 nm	2	103.4 ± 1.6 nm	2
0 nm	3	6.7 ± 1.5 nm	3
30.0 nm	4	30.0 nm	4
1.5 nm	5	1.5 nm	5
1.7 nm	6	1.7 nm	6
4.5 nm	7	4.5 nm	7
3.0 nm	8	3.0 nm	8
10.0 nm	9	10.0 nm	9
30.0 nm	10	30.0 nm	10
0 nm	11	6.9 ± 1.8 nm	11
100.5 ± 3.0 nm	12	991.2 ± 3.6 nm	12
0 nm	13	7.1 ± 1.9 nm	13
0.35 nm	14	0.35 nm	14
90.5 ± 10.0 nm	15	74.9 ± 10.0 nm	15

Рис. 5. Эллипсометрические модели РТГС до (a) и после 28 ч термического воздействия (b). a: 1 — верхний шероховатый слой 24.9 ± 2.0 нм, 2 — *n*-GaAs, сильно легированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) 100.3 ± 1.7 нм, 3 — градиентный слой 0 нм, 4 — *n*-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 30 нм, 5 — арсенид галлия GaAs (спейсер) 1.5 нм, 6 — арсенид алюминия AlAs (барьер) 1.7 нм, 7 — арсенид галлия GaAs (яма) 4.5 нм, 8 — арсенид алюминия AlAs (барьер) 3.0 нм, 9 — арсенид галлия GaAs (спейсер) 10.0 нм, 10 — *n*-GaAs, легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 30.0 нм, 11 — градиентный слой 0 нм, 12 — *n*-GaAs, сильно легированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) 100.5 ± 3.0 нм, 13 — градиентный слой 0 нм, 14 — подложка GaAs 0.35 нм, 15 — нижний шероховатый слой 90.5 ± 10.1 нм. b: 1 — верхний шероховатый слой 15.9 ± 2.1 нм, 2 — *n*-GaAs, сильно легированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) 103.4 ± 1.6 нм, 3 — градиентный слой 6.7 ± 1.5 нм, 4 — *n*-GaAs, легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 30.0 нм, 5 — арсенид галлия GaAs (спейсер) 1.5 нм, 6 — арсенид алюминия AlAs (барьер) 1.7 нм, 7 — арсенид галлия GaAs (яма) 4.5 нм, 8 — арсенид алюминия AlAs (барьер) 3.0 нм, 9 — арсенид галлия GaAs (спейсер) 10.0 нм, 10 — *n*-GaAs, легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 30.0 нм, 11 — градиентный слой 6.9 ± 1.8 нм, 12 — *n*-GaAs, сильно легированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) 991.2 ± 3.6 нм, 13 — градиентный слой 7.1 ± 1.9 нм, 14 — подложка GaAs 0.35 нм, 15 — нижний шероховатый слой 74.9 ± 10.0 нм.

ратура, K , n_{Si} — концентрация легирующей примеси (Si), см^{-3} , n_i — концентрация собственных носителей заряда, см^{-3} ; и в гетероструктуре № 2 [32]:

$$D_{Al, Si} = 0.22 \exp\left(-\frac{3.5}{kT}\right) \left(\frac{n_{Si}}{n_i}\right)^3. \quad (2)$$

Предэкспоненциальные множители в (1) и (2) отличаются на 30%. Поскольку коэффициенты диффузии Al

и Si в GaAs пропорциональны количеству вакансий галлия [22–24], можно сделать вывод о том, что количество дефектов в исследованных гетероструктурах также отличается на 30%. Это свидетельствует о том, что технологические параметры (в данном случае температура МЛЭ) влияют на качество изготовления (в смысле скорости процессов диффузионной деструкции) РТГС. Таким образом, метод ИК-СЭ „чувствует“ отличия в качестве изготовления РТГС при различных температурах выращивания и может применяться для контроля их качества.

3. Заключение

Качество изготовления гетероструктуры AlAs/GaAs РТД предложено оценивать по величинам коэффициентов диффузии Al и Si в GaAs, отражающих интенсивность диффузионных процессов в резонансно-туннельной гетероструктуре.

Показана применимость метода ИК-спектральной эллипсометрии для определения коэффициентов диффузии Al и Si в AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктурах. Полученные в настоящей работе численные характеристики деградационных процессов могут быть использованы для прогнозирования надежности РТД и радиотехнических устройств их основе.

Разработанная на основе метода ИК-спектральной эллипсометрии методика позволяет увидеть диффузию элементов AlAs/GaAs резонансно-туннельных гетероструктур в слоях нанометровой толщины. Это открывает возможность определения коэффициентов диффузии элементов в слоях гетероструктуры. Поскольку коэффициент диффузии напрямую связан с количеством дефектов в гетероструктуре, можно оценить качество сложных полупроводниковых гетероструктур, степень их диффузионной деструкции как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания № 16.1116.2014/К Министерства образования и науки России.

Список литературы

- [1] Н.В. Алкеев, С.И. Аверин, А.А. Дорофеев, Н.Б. Гладышева, М.Ю. Торгашин. *Микроэлектроника*, **39** (5), 356 (2010).
- [2] В.Н. Вьюгинов, А.Г. Гудков, В.А. Добров, С.А. Мешков, В.В. Попов. *Электромагнитные волны и электрон. системы*, **1**, 4 (2012).
- [3] Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, И.А. Федоренко, Н.В. Федорова, В.Д. Шашурин. *РЭ*, **55** (8), 982 (2010).
- [4] Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федорова, И.А. Федоренко. *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение, спец. выпуск „Наноинженерия“*, 128 (2010).
- [5] Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.Ю. Синякин, И.А. Федоренко, Н.В. Федорова, И.Б. Федоров, В.Д. Шашурин. *Наноинженерия*, **1**, 34 (2011).
- [6] P. Mei, H.W. Yoon, T. Venkatesan, S.A. Schwarz, J.P. Harbison. *Appl. Phys. Lett.*, **50** (25), 1823 (1987).
- [7] S. Yu, U.M. Gösele, T.Y. Tan. *J. Appl. Phys.*, **66** (7), 2952 (1989).
- [8] T.Y. Tan, U. Gösele. *Appl. Phys. Lett.*, **52** (15), 1240 (1988).
- [9] T.Y. Tan, S. Yu, U. Gösele. *J. Appl. Phys.*, **70** (9), 4823 (1991).
- [10] U. Gösele, T.Y. Tan, M. Schultz, U. Egger, P. Werner, R. Scholz, O. Breitenstein. *Def. Dif. Forum*, **143–149**, 1079 (1997).
- [11] C.-H. Chen, U.M. Gösele, T.Y. Tan. *Appl. Phys. A*, **69**, 313 (1999).
- [12] H.-M. You, U.M. Gösele, T.Y. Tan. *J. Appl. Phys.*, **73** (11), 7207 (1993).
- [13] I. Harrison, H.P. Ho, N. Baba Ali. *J. Electron. Mater.*, **20** (6), 449 (1991).
- [14] L. Pavesi, Nguyen Hong Ky, J.D. Ganiere, F.K. Reinhart, N. Baba-Ali, I. Harrison, B. Tuck, M. Henini. *J. Appl. Phys.*, **71** (5), 2225 (1992).
- [15] K.H. Lee, D.A. Stevenson, M.D. Deal. *J. Appl. Phys.*, **68** (8), 4008 (1990).
- [16] H. Bracht, E.E. Haller, K. Eberl, M. Cardona. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1), 49 (1999).
- [17] S.F. Wee, M.K. Chai, K.P. Homewood, W.P. Gillin. *J. Appl. Phys.*, **82** (10), 4842 (1997).
- [18] B.L. Olmsted, S.N. Houde-Walter. *Appl. Phys. Lett.*, **63** (4), 530 (1993).
- [19] L. Wang, L. Hsu, E.E. Haller, J.W. Erickson, A. Fischer, K. Eberl, M. Cardona. *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 2342 (1996).
- [20] H. Ono, N. Ikarashi, T. Baba. *Appl. Phys. Lett.*, **66** (5), 601 (1995).
- [21] J.J. Murray, M.D. Deal, E.L. Allen, D.A. Stevenson, S. Nozaki. *J. Electrochem. Soc.*, **137** (7), 2037 (1992).
- [22] H. Mehrer. *Diffusion in Solids. Fundamentals, Methods, Diffusion-controlled Processes* (Springer, 2009).
- [23] D.J. Fisher. *Diffusion in GaAs and other III-V semiconductors. 10 years of Research* (Scitech Publications, 1998).
- [24] F. El-Mellouhi, N. Mousseau. *J. Appl. Phys.*, **100** (8), 083 521 (2006).
- [25] R.M. Cohen. *J. Appl. Phys.*, **67** (12), 7268 (1990).
- [26] J. Hilfiker, C. Bungay, R. Synowicki, T. Tiwald, C. Herzinger, B. Johs, G. Pribil, J.A. Woollam. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **21** (4), 1103 (2003).
- [27] J. Hilfiker, N. Singh, T. Tiwald, D. Convey, S.M. Smith, J.H. Baker, H.G. Tompkins. *Thin Sol. Films*, **516**, 7979 (2008).
- [28] H.G. Tompkins, T. Tiwald, C. Bungay, A.E. Hooper. *J. Phys. Chem. B*, **108** (12), 3777 (2004).
- [29] М.О. Макеев, Е.А. Жукова. *Наука и образование: электронное научн.-техн. изд.*, **7**, 229 (2013).
- [30] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков. *Наноинженерия*, **4**, 44 (2011).
- [31] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.Д. Шашурин. *Наука и образование: электронное научн.-техн. изд.*, **11**, 229 (2013).
- [32] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.Ю. Синякин. *Нано- и микросистемная техника*, **12**, 23 (2014).
- [33] М.О. Makeev, Yu.A. Ivanov, V.Yu. Sinyakin, S.A. Meshkov, S.V. Agasieva, V.D. Shashurin. *CriMiCo 2014–2014 24th Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology, Conf. Proceedings* (Sevastopol, Crimea, Russia, 2014) p. 754.

- [34] M.O. Makeev, Yu.A. Ivanov, S.A. Meshkov, A.B. Gil'man, M.Yu. Yablokov. High Energy Chemistry, **45** (6), 536 (2011).
- [35] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, А.Б. Гильман, М.Ю. Яблоков. Нанотехника, **3**, 27 (2011).
- [36] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, Н.А. Ветрова, С.А. Козубняк. Вестн. МГТУ. Сер. Приборостроение, **5**, 80 (2010).
- [37] М.О. Макеев, Ю.А. Иванов, Ю.Н. Литвак, С.А. Мешков, Д.Э. Мигаль, В.В. Назаров. Наноинженерия, **1**, 24 (2014).

Редактор Т.А. Полянская

**Assessment of resistance of AlAs/GaAs
nanoscale heterostructures
of resonant-tunneling diodes to diffusion
destruction by means of IR-spectroscopic
ellipsometry**

M.O. Makeev, Y.A. Ivanov, S.A. Meshkov

Bauman Moscow State Technical University,
105005 Moscow, Russia

Abstract In the course of the work the procedure of the quality assessment of AlAs/GaAs resonant-tunneling heterostructures with relation to their resistance to diffusion destruction was developed. The diffusional blurring of the AlAs/GaAs heterostructure layers was detected by the means of IR-spectroscopic ellipsometry. The coefficient of Al and Si diffusion in GaAs was also calculated.