

# Влияние нанесения кобальта на оптоэлектронные свойства квантово-размерных гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs

© Н.С. Волкова<sup>+\*</sup>†, А.П. Горшков\*, А.В. Здравейщев<sup>+</sup>, Л.А. Истомин\*, С.Б. Левичев\*

<sup>+</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

\* Научно-исследовательский институт химии

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

• Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Исследованы закономерности влияния дефектообразования при нанесении кобальтового контакта на оптоэлектронные характеристики структур с квантовыми точками InAs/GaAs и квантовыми ямами In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs. Из анализа температурных зависимостей фоточувствительности структур с квантовыми точками InAs/GaAs определены значения результирующего рекомбинационного времени жизни фотовозбужденных носителей в квантовых точках при различных условиях нанесения Co и параметрах структур.

## 1. Введение

Контакты ферромагнитных металлов (Fe, Co, Ni и др.), нанесенные на поверхность квантово-размерных структур, могут использоваться в приборах спинтроники для инжекции спин-ориентированных носителей [1,2]. Очевидно, что при создании приборов необходим контроль влияния точечных дефектов, возникающих при проведении технологических операций, на их оптоэлектронные характеристики. Известно, что при нанесении Co-контакта на GaAs в результате взаимной диффузии и взаимодействия атомов Ga, As и Co в приповерхностной области образуются точечные дефекты [3], которые могут являться центрами безызлучательной рекомбинации. В работе [3] показано, что в диодах Шоттки с Co-контактом наблюдалось гашение электролюминесценции от квантово-размерных слоев In(Ga)As/GaAs по сравнению с аналогичными диодами с Au-контактом, но количественная оценка влияния дефектообразования на рекомбинационные характеристики квантово-размерных слоев проведена не была.

В данной работе изучалось влияние технологических условий нанесения Co и параметров квантово-размерных структур In(Ga)As/GaAs с квантовыми точками (КТ) и квантовыми ямами (КЯ) на их оптоэлектронные свойства.

## 2. Методика эксперимента

Исследованные структуры выращивались в группе эпитаксиальной технологии НИФТИ ННГУ методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) при атмосферном давлении водорода — газа-носителя паров МОС. На поверхности (100) n<sup>+</sup>-GaAs последовательно выращивались бу-

ферный слой n-GaAs толщиной 0.6 мкм с концентрацией электронов  $\approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , слой КТ InAs и покровный слой GaAs. Варьировалась толщина покровного слоя GaAs ( $d_c = 15$  и  $30 \text{ нм}$ ) и температура нанесения Co ( $T_{Co} = 90$  и  $160^\circ\text{C}$ ), который наносился методом электронно-лучевого испарения в вакууме либо непосредственно на GaAs, либо отделялся от него слоем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 3 нм. Также была получена структура, у которой вместо слоя КТ были выращены три КЯ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs ( $x = 0.12, 0.14$  и  $0.16$ ) толщиной 10 нм, разделенные спейсерными слоями GaAs 30 нм. Для этой структуры толщина покровного слоя составляла 30 нм, а  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ . На поверхности всех структур формировались мезадиоды диаметром 500 мкм с применением фотолитографии и химического травления. Омические контакты к буферному слою и подложке создавались электроискровым вжиганием Sn-фольги.

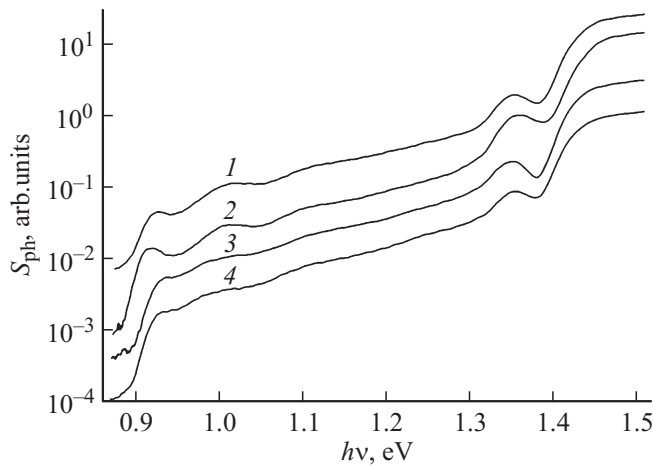
Напряженность электрического поля в слое КТ определялась из C–V-характеристик диодов Шоттки и составила 68 и 57 кВ/см в структурах с  $d_c = 15$  и 30 нм соответственно.

В работе исследовались спектры фотоэдс диодов Шоттки в диапазоне температур 77–350 К. При построении фотоэлектрических спектров строилась спектральная зависимость относительной фоточувствительности  $S_{ph}(h\nu) = V_{ph}(h\nu)/L(h\nu)$ , где  $V_{ph}(h\nu)$  — фотоэдс,  $L(h\nu)$  — интенсивность освещения в произвольных единицах.

## 3. Результаты и обсуждение

Спектры фоточувствительности структур с КТ при 300 К приведены на рис. 1. Пики фоточувствительности при энергии  $\sim 0.93$  эВ связаны с оптическим переходом в КТ между дискретными основными состояниями

† E-mail: volkovans88@mail.ru



**Рис. 1.** Спектры фоточувствительности структур с КТ при 300 К: 1 —  $d_c = 30$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 2 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 160^\circ\text{C}$ ; 3 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 4 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ , с промежуточным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

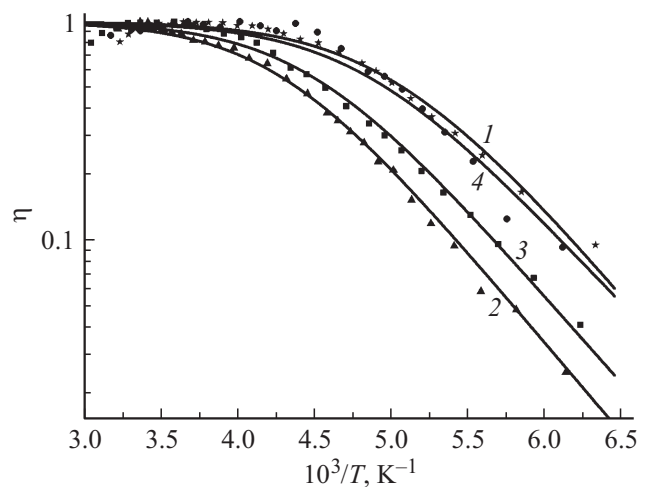
электрона и дырки. Небольшой разброс энергии основного перехода при разных условиях нанесения  $\text{Co}$ , наблюдаемый на структуре с покровным слоем  $d_c = 15$  нм (кривые 2–4), связан с технологическим разбросом параметров КТ по площади структуры. Особенность при энергии  $\sim 1.35$  эВ принадлежит смачивающему слою  $\text{InAs}$ , который в пространстве между кластерами КТ образует квантовую яму. Видно, что для всех структур величина фоточувствительности в области КТ и смачивающего слоя относительно фоточувствительности в области собственного поглощения  $\text{GaAs}$  ( $> 1.43$  эВ) сохраняется. Это означает, что эмиссия электронно-дырочных пар из КТ в матрицу полупроводника при 300 К во всех структурах близка к 100%. Поэтому из сравнения спектров фоточувствительности, измеренных при 300 К, в данном случае невозможно судить о влиянии дефектообразования на оптоэлектронные свойства КТ.

Метод, основанный на анализе температурных зависимостей фоточувствительности, обладает большей информативностью, поскольку фотосигнал наиболее чувствителен к дефектообразованию при примерном равенстве рекомбинационного  $\tau_{\text{rec}}$  и эмиссионного  $\tau_{\text{esc}}$  времен жизни фотовозбужденных носителей в КТ (в этом случае эффективность эмиссии  $\eta = \frac{1/\tau_{\text{esc}}}{1/\tau_{\text{esc}} + 1/\tau_{\text{rec}}}$  составляет 50%). Введение дефектов в структуру существенно влияет на рекомбинационное время жизни носителей, а температура — на эмиссионное. Поэтому равенство этих времен при различных концентрациях дефектов будет достигаться при различных температурах, следовательно, соответствующие температурные зависимости будут смещены относительно друг друга. Действительно, при увеличении температуры напыления  $\text{Co}$  и приближении слоя КТ к поверхности наблюдалось смещение температурной зависимости фоточувствительности в пике основного перехода КТ в область высоких температур

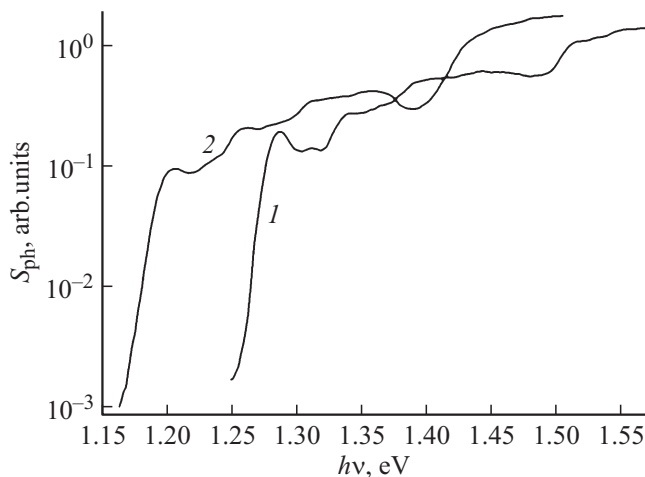
(рис. 2, кривые 2 и 3, точки), свидетельствующее об увеличении концентрации дефектов в окрестности КТ, снижающих рекомбинационное время жизни.

Для количественной оценки результирующего рекомбинационного времени жизни  $\tau_{\text{rec}}$  фотовозбужденных носителей в КТ применялась теоретическая модель процесса эмиссии, разработанная ранее [4]. В этой модели рассмотрены два электронных и один дырочный уровень размерного квантования. С каждого из них учитывались следующие механизмы эмиссии: термическая в 3D состоянии матрицы  $\text{GaAs}$  [5–7] и в 2D состоянии смачивающего слоя  $\text{InAs}$  [8], прямое туннелирование в приближении треугольного барьера [6,7,9] и термоактивированное туннелирование через виртуальные состояния с участием продольных оптических фононов [10,11]. Также учитывался электронный обмен между основным и первым возбужденным уровнями электронов в КТ.

На всех температурных зависимостях (рис. 2), за исключением кривой 2, при  $T > 270$  К наблюдался участок насыщения, свидетельствующий о достижении эффективности эмиссии  $\eta \approx 100\%$ . По этому участку фоточувствительность исследованных структур нормировалась на единицу, что было необходимо для сравнения с результатами теоретического расчета. В структуре с  $d_c = 15$  нм и  $T_{Co} = 160^\circ\text{C}$  (кривая 2) фоточувствительность нормировалась на единицу по максимальному значению, что позволяет дать для  $\tau_{\text{rec}}$  лишь оценку сверху (поскольку в максимуме кривой можно утверждать только то, что  $\eta \leq 100\%$ ). Следующие параметры, необходимые для теоретического расчета, принимались для всех зависимостей одинаковыми: время межуровневой релаксации электрона — 10 пс, расстояние между электронными уровнями в КТ — 82 мэВ, эффективная



**Рис. 2.** Температурные зависимости фоточувствительности в области основного перехода в КТ: 1 —  $d_c = 30$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 2 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 160^\circ\text{C}$ ; 3 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 4 —  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ , с промежуточным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Сплошные кривые — теоретический расчет квантовой эффективности эмиссии.



**Рис. 3.** Спектры фоточувствительности структуры с тремя КЯ InGaAs/GaAs ( $d_c = 30$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ): 1 —  $T = 77$  К, 2 —  $T = 300$  К.

высота КТ — 9 нм, сечение захвата электрона и дырки —  $1.3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ , энергия дна нижней электронной подзоны размерного квантования в смачивающем слое относительно зоны проводимости GaAs — 30 мэВ, параметр Хуанга-Рис [12,13] — 0.05. Расстояние от уровня размерного квантования основного состояния электрона в КТ до дна зоны проводимости матрицы для структуры с  $d_c = 30$  нм составило 190 мэВ. Для диодов структуры с  $d_c = 15$  нм, созданных при различных вариациях условий нанесения Со, в эту величину вносилась небольшая поправка в соответствии со сдвигом энергии основного перехода ( $< 9$  мэВ, рис. 1). Рекомбинационное время жизни фотовозбужденных носителей в КТ определялось из наилучшего согласия теории и эксперимента и составило: 170 пс для структуры с  $d_c = 30$  нм и  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 60 пс при  $d_c = 15$  нм и  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$ ; 90 пс при  $d_c = 15$  нм,  $T_{Co} = 90^\circ\text{C}$  и слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; и меньше 45 пс для структуры с  $d_c = 15$  нм и  $T_{Co} = 160^\circ\text{C}$ . Таким образом, увеличение температуры нанесения Со и приближение слоя КТ к поверхности увеличивает концентрацию дефектов в слое КТ, а встраивание промежуточного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  уменьшает (что согласуется с результатами, продемонстрированными на аналогичных структурах в [14]).

В структуре с тремя квантовыми ямами  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  влияние дефектообразования при нанесении Со установить не удалось. Фоточувствительность при 77 К полностью сохранялась даже от ближайшей к поверхности КЯ (рис. 3, кривая 1, пик при энергии  $\sim 1.29$  эВ), т. е. температурная зависимость интенсивности фоточувствительности от КЯ в диапазоне 77–350 К отсутствовала. Это связано с малой высотой эмиссионного барьера в КЯ, при котором эффективность эмиссии фотовозбужденных носителей сохраняется близкой к 100% даже при минимальной температуре измерений.

## 4. Заключение

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что метод анализа температурных зависимостей фотосигнала является чувствительным к дефектам в слое КТ даже при небольшой их концентрации. Применение теоретической модели эмиссии для интерпретации экспериментально полученных температурных зависимостей позволило установить закономерности влияния дефектообразования при различных условиях нанесения Со на время рекомбинации носителей в КТ.

Авторы выражают благодарность в. науч. сотр. НИФТИ ННГУ Б.Н. Звонкову за выращивание полупроводниковых структур.

Работа выполнена при поддержке государственных заданий Министерства образования и науки России (3.640.2014/К, 8.1054.2014/К) и грантов РФФИ (15-02-07824а, 14-07-31280 мол\_а).

## Список литературы

- [1] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, R179 (2007).
- [2] L. Lombez, P. Renucci, P.F. Braun, H. Carrere, X. Marie, T. Amand, B. Urbaszek, J.L. Gauffier, P. Gallo, T. Camps, A. Arnoult, C. Fontaine, C. Deranlot, R. Mattana, H. Jaffres, J.-M. George, P. H. Binh. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 081 111 (2007).
- [3] Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина, Е.И. Малышева, Е.А. Питиримова, Ф.З. Гильмутдинов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **2**, 89 (2006).
- [4] Н.С. Волкова, А.П. Горшков, Д.О. Филатов, Д.С. Абрамкин. *Письма ЖЭТФ*, **100**, 175 (2014).
- [5] С.М.А. Kapteyn, F. Heinrichsdorff, O. Stier, R. Heitz, M. Grundmann, N.D. Zakharov, D. Bimberg, P. Werner. *Phys. Rev. B*, **60**, 14 265 (1999).
- [6] P.W. Fry, I.E. Itskevich, S.R. Parnell, J.J. Finley, L.R. Wilson, K.L. Schumacher, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, M. Al-Khafaji, A.G. Cullis, M. Hopkinson, J.C. Clark, G. Hill. *Phys. Rev. B*, **62**, 16 784 (2000).
- [7] W.H. Chang, T.M. Hsu, C.C. Huang, S.L. Hsu, C.Y. Lai, N.T. Yeh, T.E. Nee, J.I. Chyi. *Phys. Rev. B*, **62**, 6959 (2000).
- [8] S. Ghosh, B. Kochman, J. Singh, P. Bhattacharya. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2571 (2000).
- [9] Э.Н. Король. *ФТТ*, **19**, 1266 (1977).
- [10] S. Makram-Ebeid, M. Lannoo. *Phys. Rev. Lett.*, **48**, 1281 (1982).
- [11] M. Geller, Ph.D. Thesis. (Technical University of Berlin, 2007).
- [12] A. Garcia-Cristobal, A.W. Minnaert, V.M. Fomin, J.T. Devreese, A.Yu. Silov, J.E.M. Haverkort, J.H. Wolter. *Phys. Status Solidi. B*, **215**, 331 (1999).
- [13] R. Heitz, I. Mukhametzhanov, O. Stier, A. Madhukar, D. Bimberg. *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 4654 (1999).
- [14] А.И. Бобров, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейшев, Н.В. Малехонова, Е.И. Малышева, Д.А. Павлов, С. Сайед. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **7**, (2015).

Редактор А.Н. Смирнов

## **Influence of Co deposition on the optoelectronic properties of In(Ga)As/GaAs quantum heteronanostructures**

*N.S. Volkova*<sup>+,\*</sup>, *A.P. Gorshkov*<sup>•</sup>, *A.V. Zdoroveishev*<sup>+</sup>,  
*L.A. Istomin*<sup>\*</sup>, *S.B. Levichev*<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Physico-Technical Research Institute,  
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhni Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Research Institute for Chemistry,  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,  
603950 Nizhni Novgorod, Russia

<sup>•</sup> Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,  
603950 Nizhni Novgorod, Russia

**Abstract** The regularities of the influence of the defect formation process under Co contacts deposition on the optoelectronic properties of structures with InAs/GaAs quantum dots and  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum wells have been studied. The values of the photoexcited carriers resulting recombination lifetime in quantum dots were estimated at different Co deposition conditions as well as structure parameters by means of the analysis of the photosensitivity temperature dependence in InAs/GaAs quantum dot structures.