

# Исследование оптических свойств GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах роста, с $\delta$ -легированными слоями Si

© Д.В. Лаврухин<sup>†\*</sup>, А.Э. Ячменев<sup>†\*</sup>, А.С. Бугаев<sup>†\*</sup>, Г.Б. Галиев<sup>†</sup>, Е.А. Климов<sup>†</sup>,  
Р.А. Хабибуллин<sup>†\*</sup>, Д.С. Пономарев<sup>†\*</sup>, П.П. Мальцев<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук,  
117105 Москва, Россия

<sup>\*</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия

(Получена 26 ноября 2014 г. Принята к печати 15 декабря 2014 г.)

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии изготовлены структуры на основе „низкотемпературного“ GaAs с введенными  $\delta$ -слоями кремния. После проведения отжига структур при температурах 520 и 580°С с помощью спектроскопии фотолюминесценции обнаружены особенности в области энергий фотонов 1.28–1.48 эВ, которые связаны с образованием точечных дефектов и их комплексов. Методом „накачка–зондирование“ в геометрии пропускания света определены характерные времена жизни неравновесных носителей тока в изготовленных структурах:  $\tau_c \approx 1.2–1.5$  пс.

## 1. Введение

Арсенид галлия, выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при относительно низких температурах,  $< 400^\circ\text{C}$ , является перспективным материалом для создания оптоэлектронных приборов и устройств [1,2] и активно изучается много лет [3,4]. Такой „низкотемпературный“ арсенид галлия (low-temperature grown GaAs, LT-GaAs) имеет малое время жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_c$ , порядка пикосекунд, и высокий коэффициент оптической нелинейности [5].

Первоначально LT-GaAs использовался как буферный слой в транзисторных структурах для уменьшения эффекта „backgating“, состоящего в уменьшении величины тока сток–исток при приложении отрицательного напряжения к подложке из-за образования области пространственного заряда [6]. В настоящее время LT-GaAs широко используется в качестве базового материала для изготовления фотопроводящих антенн, которые способны генерировать и/или детектировать сигналы в диапазоне 1.0–5.0 ТГц [7,8]. Также активно исследуются возможности применения LT-GaAs для создания быстроредействующих оптических коммутаторов [9].

LT-GaAs представляет собой полупроводник с избыточным содержанием мышьяка. Нестехиометричность приводит к образованию большого числа точечных дефектов, среди которых преобладают: атомы мышьяка в междоузлиях ( $\text{As}_i$ ), атомы мышьяка в узлах галлия ( $\text{As}_{\text{Ga}}$ ), а также вакансии галлия ( $V_{\text{Ga}}$ ) [10]. Глубокие донорные центры  $\text{As}_{\text{Ga}}$ , уровни которых расположены вблизи середины запрещенной зоны, вместе с акцепторными центрами  $V_{\text{Ga}}$  обеспечивают быструю безызлучательную рекомбинацию неравновесных носителей заряда [11,12]. Дефекты  $\text{As}_{\text{Ga}}$  в LT-GaAs могут иметь два заряженных состояния:  $\text{As}_{\text{Ga}}^{+2}$ ,  $\text{As}_{\text{Ga}}^{+}$ , в то время как вакансии галлия имеют три —  $V_{\text{Ga}}^{-3}$ ,  $V_{\text{Ga}}^{-2}$

и  $V_{\text{Ga}}^{-}$ . Кулоновское взаимодействие между указанными заряженными центрами, а также центрами  $\text{As}_i$  приводит к образованию сложных комплексов дефектов, как, например,  $\text{As}_{\text{Ga}}-V_{\text{Ga}}$  и др. [12].

После проведения постростового отжига при температурах  $T_a$  от 400 до 600°С концентрация дефектов в LT-GaAs снижается на 1–2 порядка, что обычно приводит к некоторому увеличению  $\tau_c$ . При этом в LT-GaAs с исходным удельным сопротивлением  $\rho \sim 10$  Ом·см, отожженном в течение 10 мин при  $T_a \approx 600^\circ\text{C}$ , увеличивается  $\rho$  до значения  $\sim 10^6$  Ом·см [13]. Это связано с тем, что избыточный мышьяк образует металлические кластеры — преципитаты мышьяка с характерными размерами от единиц до десятков нанометров [14,15].

Легирование LT-GaAs атомами кремния приводит к образованию дополнительных точечных дефектов типа  $\text{Si}_{\text{Ga}}$  (донорные состояния) и  $\text{Si}_{\text{As}}$  (акцепторные состояния), а также новых комплексов дефектов [10,16,17]. Более того, в работе [18] было показано, что легирующие  $\delta$ -слои кремния могут влиять на параметры преципитатов мышьяка.

Цель настоящей работы заключается в исследовании оптических свойств LT-GaAs с  $\delta$ -легированными слоями кремния. Для регистрации оптических переходов между энергетическими состояниями использовалась спектроскопия фотолюминесценции (ФЛ). Исследование временной динамики неравновесных носителей заряда проводилось методом „накачка–зондирование“ в геометрии пропускания света через образец LT-GaAs.

## 2. Образцы и методики измерений

В работе исследовались структуры LT-GaAs двух типов, которые были изготовлены методом МЛЭ в ИСВЧПЭ РАН. Структуры типа 1 представляли собой нелегированный слой LT-GaAs толщиной 2.4 мкм, структуры типа 2 содержали слой LT-GaAs той же толщины,

<sup>†</sup> E-mail: denis\_lavruhin@mail.ru

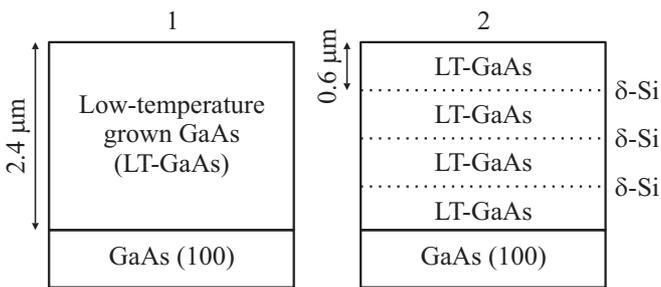


Рис. 1. Расположение слоев в структурах типов 1 и 2.

но разделенный на четыре части одинаковой толщины эквидистантными  $\delta$ -легированными слоями кремния. Все структуры были выращены на полуизолирующих подложках GaAs диаметром 2 дюйма с ориентацией (100). Схематически расположение слоев показано на рис. 1.

Перед началом роста проводился отжиг подложек GaAs в потоке мышьяка при температуре  $590^\circ\text{C}$  в течение 20 мин, после чего температура была снижена до  $240^\circ\text{C}$  для выращивания слоя LT-GaAs. Скорость роста GaAs составляла  $140 \text{ \AA}/\text{мин}$ , соотношение потоков мышьяка и галлия  $\gamma = 10$ . В структурах типа 2 формировались три слоя с  $\delta$ -легированием кремнием: время легирования каждого слоя составляло 200 с, температура эффузионной ячейки с кремнием равнялась  $1060^\circ\text{C}$ . Расчетная степень легирования  $N_{\text{Si}} \approx 2.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

В ходе работы было исследовано по три образца каждого типа структур. Для этого каждый выращенный образец был разделен на 3 части. Первые части образцов типов 1 и 2 были исследованы без отжига — образцы 1а и 2а соответственно. Вторые части образцов обоих типов были подвергнуты постростовому отжигу при  $T_a = 520^\circ\text{C}$  (образцы 1б и 2б), а третьи части были отожжены при  $T_a = 580^\circ\text{C}$  (образцы 1с и 2с). Отжиг выполнялся в атмосфере азота в течение 20 мин.

Регистрация спектров ФЛ образцов LT-GaAs проводилась в оптическом криостате при температуре 77 К в атмосфере азота. Для возбуждения ФЛ использовалось сфокусированное излучение гелий-неонового лазера с длиной волны излучения 632.8 нм (энергия кванта 1.96 эВ) мощностью до 50 мВт. Регистрация излучения осуществлялась охлаждаемым жидким азотом фотоэлектронным умножителем с катодом типа S1 (ФЭУ-61) в режиме счета фотонов.

Для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в исследуемых образцах LT-GaAs использовалась схема „накачка–зондирование“ в геометрии пропускания света через образец. Накачка выполнялась импульсным излучением Ti:Sapphire-лазера с длиной волны 797 нм (энергия кванта 1.56 эВ), длительностью 130 фс и частотой следования 1 кГц. Зондирование проводилось импульсами ТГц излучения с длительностью  $\sim 1.5$  пс от возбуждаемой этим же лазером фотопроводящей антенны.

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

При лазерном возбуждении образцов без постростового отжига (1а и 2а) при температуре 77 К сигналов ФЛ в диапазоне энергии фотонов 1.10–1.55 эВ зафиксировать не удалось, что связано с высоким содержанием центров безызлучательной рекомбинации в изготовленных образцах. В литературе эффективную безызлучательную рекомбинацию неравновесных носителей тока в LT-GaAs связывают с глубокими донорными состояниями  $\text{As}_{\text{Ga}}$  [6,10].

Спектры ФЛ, измеренные при 77 К, для образцов после проведения постростового отжига при  $T_a = 520^\circ\text{C}$  (1б и 2б) приведены на рис. 2, а. Видно, что спектры образцов обоих типов не имеют существенных отличий. Выраженный пик с энергией фотонов  $\hbar\omega = 1.51$  эВ соответствует излучательной рекомбинации носителей в GaAs [19]. Пики с  $\hbar\omega = 1.44$  и 1.33 эВ относятся к образованию точечных дефектов с зарядовыми состояниями  $\text{Ga}_{\text{As}}^-$  и  $\text{Ga}_{\text{As}}^{2-}$  из-за того, что при отжиге часть атомов As аккумулируется в преципитаты мышьяка. Спектральные особенности в полосе энергий фотонов 1.38–1.42 эВ

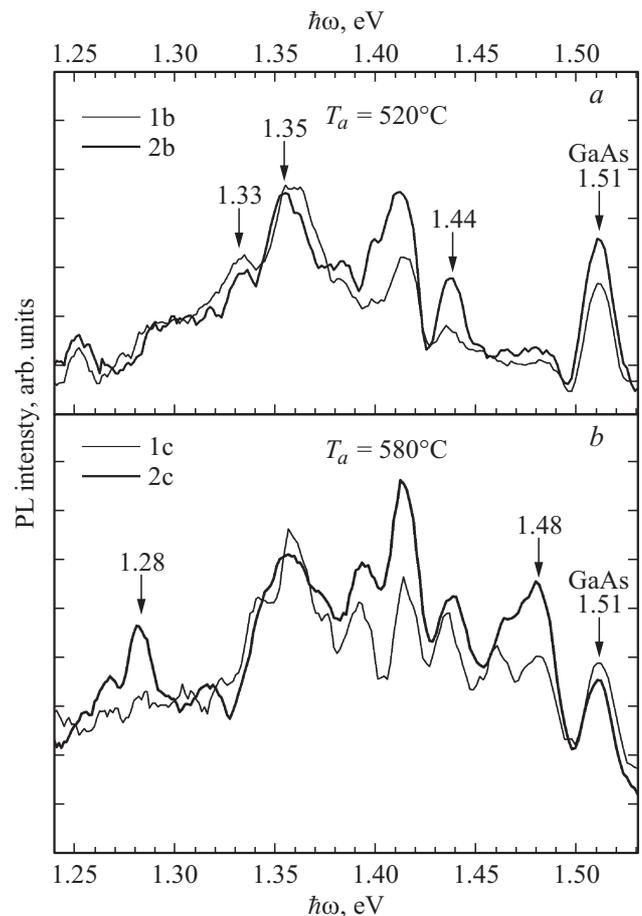


Рис. 2. Спектры ФЛ (PL) исследованных образцов структур LT-GaAs при температуре отжига  $T_a = 520^\circ\text{C}$  (а) и  $580^\circ\text{C}$  (б). Температура измерений 77 К.

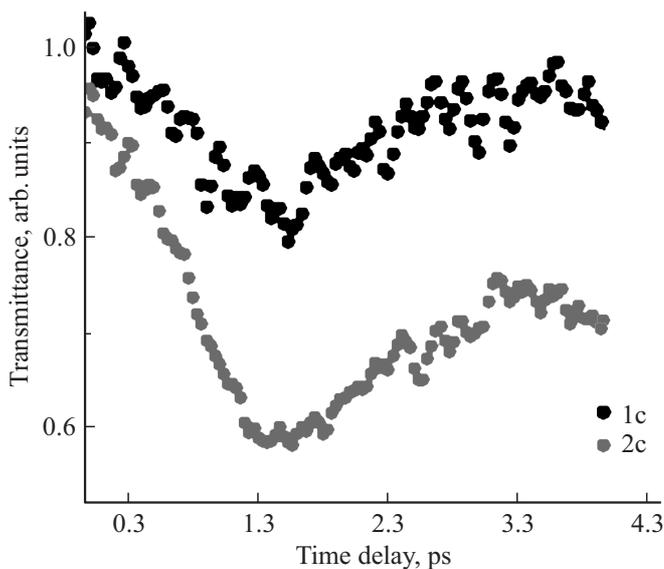


Рис. 3. Временная динамика носителей при фотовозбуждении на длине волны 797 нм, измеренная для образцов 1с и 2с.

обычно связывают с вакансиями галлия [16]. Пик с  $\hbar\omega = 1.35$  эВ, мы связываем с оптическими переходами между центрами рекомбинации  $V_{Ga}-Si_{As}$ , как в [20].

Увеличение температуры отжига до  $T_a = 580^\circ\text{C}$  приводит к большому количеству особенностей в спектрах ФЛ (рис. 2, b). Это указывает на появление новых энергетических состояний, связанных с точечными дефектами и их комплексами. В частности, для спектра ФЛ образца с  $\delta$ -слоями кремния (2с) характерно значительное увеличение интенсивности амплитуды пика с энергией фотонов 1.48 эВ по сравнению с ФЛ нелегированного образца (1с). В литературе [16,21] фотоны с такой энергией относят к оптическим переходам между донорными и акцепторными состояниями атомов кремния (комплексами)  $Si_{Ga}-Si_{As}$  в LT-GaAs. Также не следует исключать возможности формирования сложных комплексов, содержащих атомы кремния и избыточного мышьяка [17], из-за того что при высокой температуре увеличивается коэффициент диффузии атомов кремния.

Еще одной особенностью спектра ФЛ образца с  $\delta$ -слоями кремния (2с) является наличие пика с энергией фотонов 1.28 эВ. Этот пик скорее всего связан с рекомбинацией носителей между заряженными центрами  $Si_{Ga}-V_{Ga}$ , которые сформировались в LT-GaAs после введения  $\delta$ -слоев Si [21,22]. Как видно из рис. 2, a и b, при увеличении  $T_a$  от 520 до  $580^\circ\text{C}$  интенсивность этого пика возрастает. Это означает увеличение концентрации комплексов  $Si_{Ga}-V_{Ga}$ , которое, по всей видимости, связано с увеличением длины диффузии атомов Si.

Стоит отметить, что образование дефектов и их комплексов может приводить к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда. Для непосредственного наблюдения динамики фотовозбужденных носителей заряда применялся метод „накачка–зондирование“ в геометрии пропускания света через образец. Измеренная

зависимость амплитуды терагерцового (ТГц) импульса, прошедшего через исследуемые образцы LT-GaAs, в зависимости от времени прихода возбуждающего оптического импульса показана на рис. 3.

При отрицательной задержке, т.е. когда лазерный импульс накачки опережает ТГц зондирующий импульс, зондирующий импульс проходит сквозь образец, как в случае отсутствия импульса оптической накачки. В случае положительной задержки амплитуда прошедшего через образец ТГц зондирующего импульса зависит от величины задержки, так как вследствие рекомбинации концентрация фотовозбужденных носителей заряда со временем снижается. Времена жизни носителей заряда для образцов 1с и 2с составили  $\tau_c \approx 1.5$  и  $\approx 1.2$  пс соответственно. Таким образом, введение  $\delta$ -слоев кремния приводит к некоторому уменьшению  $\tau_c$ , что, вероятно, связано с появлением дополнительных точечных дефектов  $Si_{Ga}$  и  $Si_{As}$ , а также комплексов с их участием в образце 2с.

#### 4. Заключение

В работе проведено исследование оптических свойств LT-GaAs с введенными  $\delta$ -слоями кремния после проведения отжига при температурах 520 и  $580^\circ\text{C}$ . В спектрах ФЛ обнаружено увеличение интенсивности амплитуды пика с энергией фотонов 1.48 эВ, что связано с оптическими переходами между донорными и акцепторными состояниями атомов кремния (комплексами)  $Si_{Ga}-Si_{As}$ , возникающими в LT-GaAs. Кроме того, обнаружен пик с энергией фотона 1.28 эВ, связанный с рекомбинацией носителей между заряженными центрами  $Si_{Ga}-V_{Ga}$ . Введение  $\delta$ -слоев кремния привело к уменьшению времени жизни неравновесных носителей, что может быть связано с образованием дополнительных точечных дефектов  $Si_{Ga}$ ,  $Si_{As}$ , а также комплексов на основе атомов кремния.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ А.П. Шкуринову и И.А. Ожередову за проведение измерений временной динамики фотовозбужденных носителей тока.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 14-29-00277 и РФФИ № 14-07-31108 мол\_а.

#### Список литературы

- [1] I.S. Gregory, C. Baker, W.R. Tribe, M.J. Evans, H.E. Beere, E.H. Lineld, A.G. Davies, M. Missous. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (20), 4199 (2003).
- [2] G.H. Dohler, F. Renner, O. Klar, M. Eckardt, A. Schwanhauer, S. Malzer, D. Driscoll, M. Hanson, A.C. Gossard, G. Loata, T. Loffler, H.G. Roskos. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 178 (2005).
- [3] Н.А. Берт, Ю.Г. Мусихин, В.В. Преображенский, М.А. Путьято, Б.Р. Семягин, А.А. Суворова, В.В. Чалдышев, Р. Werner. *ФТП*, **32** (7), 769 (1998).

- [4] M.V. Baidakova, N.A. Bert, V.V. Chaldyshev, V.N. Nevedomsky, M.A. Yagovkina, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, B.R. Semyagin. *Acta Crystallogr. B*, **69**, 30 (2013).
- [5] E.S. Harmon, M.R. Melloch, J.M. Woodall, D.D. Nolte, N. Otsuka, C.L. Chang. *Appl. Phys. Lett.*, **63**(16), 2248 (1993).
- [6] F.W. Smith, A.R. Calawa, C.-L. Chen, M.J. Manfra, L.J. Mahaney. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **2**, 77 (1988).
- [7] Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, Р.Р. Галиев, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, Ю.В. Федоров, А.С. Бугаев. *НМСТ*, **6**, 28 (2014).
- [8] X. Zheng, Y. Xu, R. Sobolewski, R. Adam, M. Mikulics, M. Siegel, P. Kordos. *Appl. Optics*, **42** (9), 1726 (2003).
- [9] T. Obata, S. Fukushima, T. Araya, N. Otsuka. *J. Cryst. Growth*, **227**, 112 (2001).
- [10] M.R. Brozel, G.E. Stillman. *Properties of gallium arsenide*, 3rd edn (INSPEC, London, 1996).
- [11] D.C. Look, J.T. Grant, J.R. Sizelove. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (11), 1329 (1992).
- [12] D.C. Look, D.C. Walters, G.D. Robinson, J.R. Sizelove, M.G. Mier, C.E. Stutz. *J. Appl. Phys.*, **74** (1), 306 (1993).
- [13] J.K. Luo, H. Thomas, D.V. Morgan, D. Westwood. *J. Appl. Phys.*, **79** (7), 3622 (1996).
- [14] M.R. Melloch, J.M. Woodall, E.S. Harmon, N. Otsuka, F.H. Pollak, R.M. Feenstra, M.A. Lutz. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **25**, 547 (1995).
- [15] J. Terso. *Phys. Rev. Lett.*, **52** (6), 465 (1984).
- [16] A. Miyagawa, T. Yamamoto, Y. Ohnishi, J.T. Nelson, T. Ohachi. *J. Cryst. Growth*, **237**, 1434 (2002).
- [17] M.H. Zhang, Y.F. Zhang, Q. Huang, C.L. Bao, J.M. Sun, J.M. Zhou. *J. Cryst. Growth*, **209**, 37 (2000).
- [18] K.L. Kavanagh, J.C.P. Chang, P.D. Kirchner, A.C. Warren, J.M. Woodall. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (3), 286 (1993).
- [19] S. Sinha, B.M. Arora, S. Subramanian. *J. Appl. Phys.*, **79** (1), 427 (1996).
- [20] L. Pavesi, M. Guzzi. *J. Appl. Phys.*, **75** (10), 4779 (1994).
- [21] A.A. Bernussi, C.F. Souza, W. Carvillio, D.I. Lubyshchev, J.C. Rossi, P. Rasmaji. *Braz. J. Phys.*, **24** (1), 460 (1994).
- [22] H.K. Nguyen, F.K. Reinhart. *J. Appl. Phys.*, **83**, 718 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

## Investigation of the optical properties of low-temperature grown GaAs with $\delta$ -Si doping

*D.V. Lavrukhin*<sup>+,\*</sup>, *A.E. Yachmenev*<sup>+,\*</sup>, *A.S. Bugaev*<sup>+,\*</sup>,  
*G.B. Galiev*<sup>+</sup>, *E.A. Klimov*<sup>+</sup>, *R.A. Khabibullin*<sup>+,\*</sup>,  
*D.S. Ponomarev*<sup>+,\*</sup>, *P.P. Maltsev*<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

<sup>\*</sup> Center for Photonics and Infrared Engineering, Bauman Moscow State Technical University, 105005 Moscow, Russia

**Abstract** Low-temperature grown GaAs samples with  $\delta$ -Si doping have been fabricated by means of molecular-beam epitaxy. Photoluminescence spectra of the samples annealed at the temperatures 520 and 580°C demonstrated defect-related features in the range of 1.28–1.48 eV. The pump–probe transmission measurements revealed average carrier lifetimes  $\tau_c \approx 1.2$ –1.5 ps in the samples.