

Структурные и оптические свойства гетероструктур с квантовыми точками InAs в квантовой яме InGaAsN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

© И.П. Сошников, Н.В. Крыжановская, Н.Н. Леденцов, А.Ю. Егоров, В.В. Мамутин, В.А. Одноблюдов, В.М. Устинов, О.М. Горбенко*, Н. Kirmse⁺, W. Neumann⁺, D. Bimberg[≠]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт аналитического приборостроения Российской академии наук,
198103 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Humboldt University of Berlin,
D-12489 Berlin, Germany

[≠] Technical University of Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

(Получена 26 августа 2003 г. Принята к печати 9 сентября 2003 г.)

Представлены результаты исследований структурных и оптических свойств гетероструктур на основе GaAs со слоями квантовых точек InAs, выращенных квантовыми ямами InGaAsN. Методами просвечивающей электронной микроскопии изучено влияние толщины слоя InGaAsN, а также содержания и распределения азота в нем на размеры нановключений и характер и плотность дефектов в структуре. Показано, что размеры нанодоменов InAs и контраст рассогласования постоянных решетки в структурах, содержащих азот, выше, чем в структурах, не содержащих азота. Продемонстрирована корреляция длины волны люминесценции с размерами и составом нанодоменов. Показана корреляция интенсивности излучения и плотности дефектов в структуре.

1. Введение

Одним из методов расширения спектрального диапазона излучающих приборов на основе арсенида галлия является применение структур, в которых квантовые точки (КТ) InAs выращены слоем с квантовой ямой (КЯ) InGaAs [1–7]. В частности, такого типа гетероструктуры демонстрируют возможность получения лазерной генерации из структур InAs/InGaAs/GaAs в области 1.3 мкм [3–7]. Дальнейшее смещение полосы излучения в область 1.5 мкм и более сталкивается с проблемами, возможное решение которых связано с применением твердых растворов InGaAsN [1,2,7–9]. Поэтому исследование формирования и оптических свойств гетероструктур на основе GaAs с квантовыми точками InAs, выращенными слоями InGaAsN, является важным и актуальным.

2. Эксперимент

Образцы выращивались на установке ЭП1203, оснащенной плазменным источником химически активного азота EPI Unibulb RF Plasma Source. В качестве подложек использовались стандартные *epiready* пластины арсенида галлия с ориентацией поверхности (001) и уровнем легирования кремнием $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Выращиваемые образцы имели структуру, типичную для лазеров, с волноводом, внутри которого помещена активная область. В качестве активной области на поверхности осаждались нанодомены КТ InAs с эффективной толщиной 3 монослоя, которые затем выращивались слоями

$\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}(\text{As}_a\text{N}_b)$. Толщины слоев наращивания InGaAs/InGaAsN (x/y) приведены в таблице. Содержание азота в слое наращивания выбиралось так, чтобы среднее содержание азота сохранялось для всех образцов и составляло около $b \approx 0.01$.

Характеризация структуры проводилась методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе H8000 (Hitachi, Japan). Анализ электронно-микроскопических изображений высокого разрешения проводился с помощью оригинального программного пакета [10].

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились на специальной установке, оборудованной оптическим гелиевым криостатом замкнутого цикла и охлаждаемым германиевым диодом. Возбуждение фотолюминесценции проводилось аргоновым лазером на длине волны 514 нм при плотности мощности $\sim 100 \text{ Вт/см}^2$.

3. Результаты и обсуждение

Структурные исследования показывают, что наблюдается формирование нанодоменов, обогащенных InAs, с характерными размерами порядка 4 нм в направлении роста и 11 ± 3 нм — в латеральном направлении. Пример электронно-микроскопических изображений активной области приведен на рис. 1. В результате анализа высокоразрешающих электронно-микроскопических изображений (рис. 2) показано, что содержание InAs в таких нанодоменах достигает 60% и более. Отметим, что существует распределение нанодоменов по размерам. Кроме того, слои в междоменных областях имеют рассо-

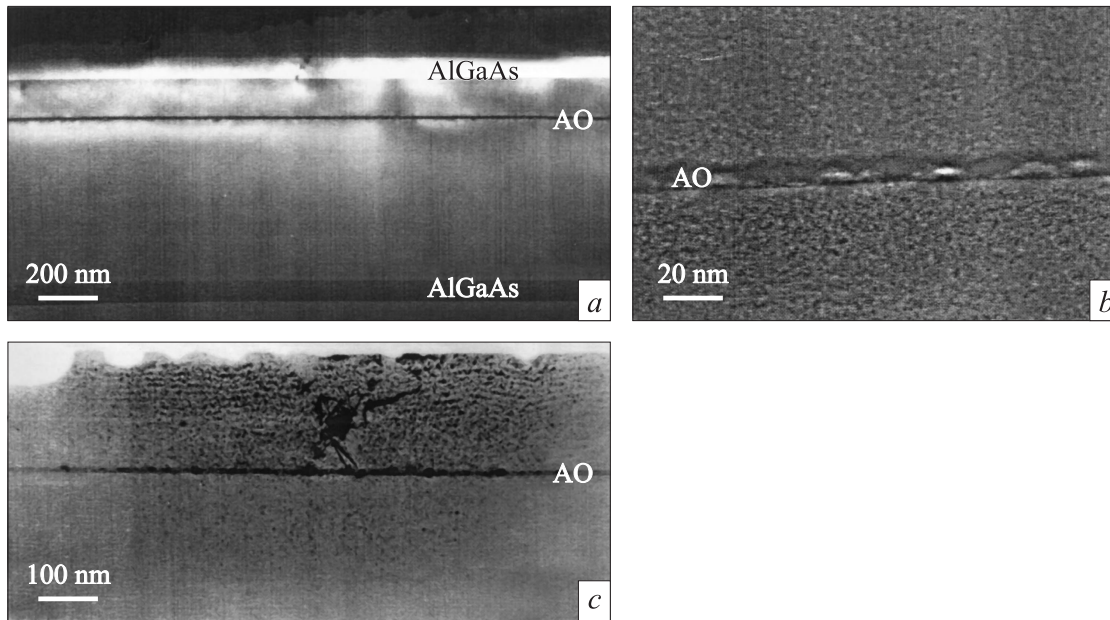


Рис. 1. Темнопольные (002) (a, b) и (022) (c) электронно-микроскопические изображения поперечного сечения (110) гетероструктуры на основе GaAs с квантовыми точками InAs, зарощёнными слоем (1 нм InGaAs)/(4 нм InGaAsN).

гласование решетки в направлении роста около 1.5–2%, что соответствует содержанию InAs около 12–18% в случае КЯ InGaAs. Отметим, что непосредственно над КТ наблюдается область без рассогласования решетки. Последнее может означать либо формирование КЯ только в междоменной области, либо компенсацию рассогласования решеток в результате повышенной концентрации азота. Кроме того, сопоставление результатов, полученных для структур, содержащих азот в КЯ, и без него, показывает, что при добавлении N наблюдается снижение средних размеров нанодоменов. Отметим, что в случае многослойной структуры (см. третью строку в таблице) наблюдается снижение плотности нанодоменов от нижнего слоя к верхнему с сохранением характерных размеров.

В полученных структурах содержатся дефекты как протяженного, так и точечного типов. Пример электронно-микроскопического изображения, отображающего содержание дефектов в структуре, приведен на рис. 1, c. Оценка плотности протяженных (ρ_{ext}) и точечных (ρ_{pnt}) дефектов в исследованных структурах дается в таблице. Сопоставление оценочных величин плотности дефектов показывает, что снижение толщины слоя, содержащего азот, от 4 до 3 нм приводит к снижению плотности дефектов примерно в 2–4 раза. В то же время плотность дефектов в случае многослойной (складированной) структуры, наоборот, возрастает. Отметим, что часть дефектов транслируется (прорастает) из нижних слоев в верхние. Кроме того, напряжения, возникающие при зарощивании части бездефектных нанодоменов, провоцируют образование дефектов в верхних слоях.

Данные исследований фотолюминесценции (положение и интенсивность полосы излучения) и ПЭМ (рассогласование решетки, характерные высота и латеральные размеры наноклучений, плотность протяженных и точечных дефектов)

Структура слоя зарощивания	ФЛ	ПЭМ
$x = 1 \text{ нм}, y = 4 \text{ нм}$	$\lambda = 1490 \text{ нм},$ $I/I_0 = 1.35\%$	$(\Delta a/a_0)_{\text{max}} = 7.5\%$ $h = 4.5 \text{ нм}, l = 11 \text{ нм},$ $\rho_{\text{ext}} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3},$ $\rho_{\text{pnt}} \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$
$x = 2 \text{ нм}, y = 3 \text{ нм}$	$\lambda = 1451 \text{ нм},$ $I/I_0 = 3.5\%$	$(\Delta a/a_0)_{\text{max}} = 6.5\%$ $h = 4 \text{ нм}, l = 10 \text{ нм},$ $\rho_{\text{ext}} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3},$ $\rho_{\text{pnt}} \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
(InAs–3МС, $x = 1 \text{ нм},$ $y = 4 \text{ нм}) \times 3$	$\lambda = 1470 \text{ нм},$ $I/I_0 = 2.3\%$	$(\Delta a/a_0)_{\text{max}} = 7.2\%$ $h = 4 \text{ нм}, l = 10 \text{ нм},$ $\rho_{\text{ext}} \approx 10^5 \text{ см}^{-3},$ $\rho_{\text{pnt}} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$
$x = 5 \text{ нм}, y = 0 \text{ нм}$	$\lambda = 1289 \text{ нм},$ $I/I_0 = 100\%$	$(\Delta a/a_0)_{\text{max}} = 6\%$ $h = 4.5 \text{ нм}, l = 13 \text{ нм},$ $\rho_{\text{ext}} \approx 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3},$ $\rho_{\text{pnt}} \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Примечание. x, y — толщины слоев не содержащих и содержащих азот соответственно; λ — длина волны фотолюминесценции (ФЛ); I и I_0 — относительные интенсивности ФЛ исследованных и реперных образцов соответственно, в качестве реперного образца использовалась структура, не содержащая азот; h и l — характерные размеры нанодоменов в вертикальном и латеральном направлениях соответственно; $(\Delta a/a_0)_{\text{max}}$ — относительное рассогласование постоянных решетки в нанодоменах InAs/InGaAsN и окружающей матрице GaAs.

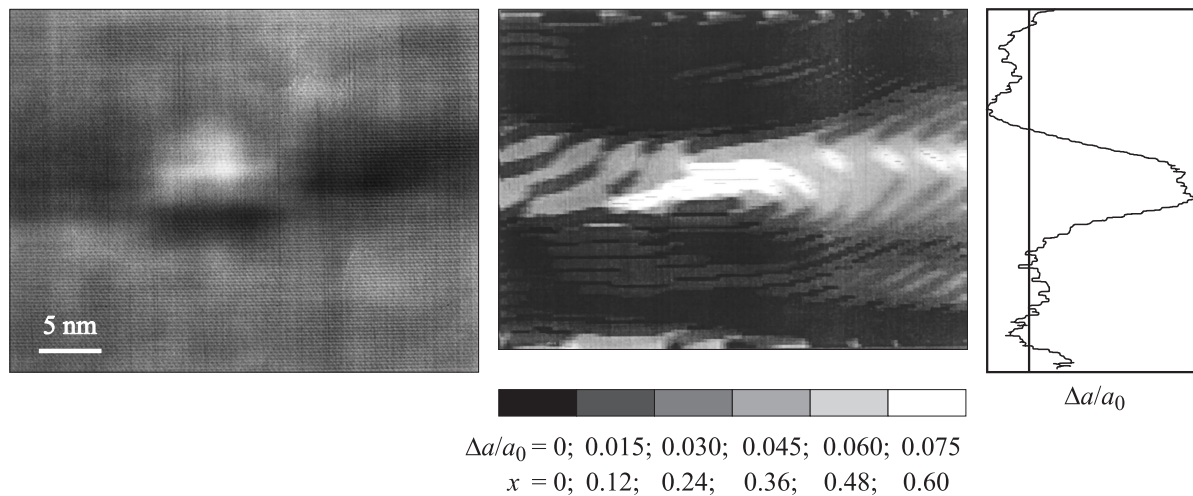


Рис. 2. Высокорастворимые электронно-микроскопические изображения поперечного сечения (110) гетероструктуры на основе GaAs с квантовыми точками InAs, выращенными слоем $\langle 1 \text{ нм InGaAs} \rangle / \langle 4 \text{ нм InGaAsN} \rangle$, и карта распределения рассогласования постоянной решетки в нанодоменах InAs/InGaAsN в направлении (002); a_0 — постоянная решетки окружающей матрицы GaAs.

Спектры ФЛ исследованных гетероструктур приведены на рис. 3. Из них видно, что добавление азота в матрицу выращивания приводит к смещению полосы излучения из области 1.3 мкм в случае структуры, не содержащей N, в область 1.54 мкм — для структуры с содержанием азота 1.5%. Интенсивность ФЛ структур, содержащих азот, падает в 10–100 раз в зависимости от содержания и распределения азота. Изменение распределения азота, при котором интегральное содержание азота сохраняется, но изменяется соотношение толщин разделительного и азотосодержащего слоя $x : y$ от 1:4 до 2:3, приводит к росту интенсивности фотолюминесценции примерно в 4 раза.

Структура со складированными слоями КТ (рис. 3, кривая 3) по сравнению с „однослойной“ демонстрирует

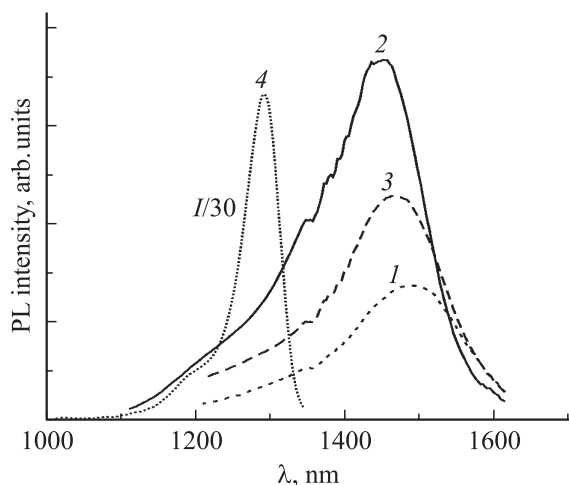


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми точками InAs, выращенными слоями: 1 — $\langle 1 \text{ нм InGaAs} \rangle / \langle 4 \text{ нм InGaAsN} \rangle$, 2 — $\langle 2 \text{ нм InGaAs} \rangle / \langle 3 \text{ нм InGaAsN} \rangle$, 3 — $\langle \langle 1 \text{ нм InGaAs} \rangle / \langle 4 \text{ нм InGaAsN} \rangle \rangle \times 3$, 4 — 5 нм InGaAs.

увеличение интенсивности полосы ФЛ в 2–3 раза при небольшом коротковолновом смещении.

Сопоставление данных структурных и оптических исследований для „однослойных“ гетероструктур показывает удовлетворительную корреляцию плотности протяженных дефектов и интенсивности полосы люминесценции. В то же время сопоставление размеров нанодоменов и положения полосы излучения показывает обратную зависимость, т.е. при снижении размеров КТ происходит смещение в длинноволновую сторону, что может объясняться инкорпорацией азота в нанодомены.

Сопоставление со структурными данными по гетероструктурам InGaAsN/GaAs из работы [11] показывает, что примененная схема роста приводит к снижению размеров КТ и снижению плотности дефектов, что в свою очередь ведет к существенному росту интенсивности люминесценции.

4. Заключение

Таким образом, нами проведено исследование структурных и оптических свойств гетероструктур на основе GaAs с квантовыми точками InAs, выращенными слоем InGaAsN с различным распределением азота. Показано, что размеры нанодоменов InAs и контраст рассогласования параметра решетки в структурах, содержащих азот, меньше, чем в структурах, не содержащих азота. Продемонстрирована корреляция длины волны полосы фотолюминесценции с размерами и композицией нанодоменов. Показана корреляция интенсивности излучения и плотности дефектов в структуре.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и программы NanoOp BMBF.

Список литературы

- [1] N.N. Ledentsov. *Growth Processes and Surface Phase Equilibria in Molecular Beam Epitaxy. Springer Tracts in Modern Physics* (Berlin Springer, 1999) v. 156, p. 81.
- [2] D. Gollub, M. Fischer, A. Forchel. *Electron. Lett.*, **38**, 1183 (2002).
- [3] D.G. Deppe, D.L. Huffaker, Z. Zou, G. Park, O.B. Shchekin. *IEEE J. Quant. Electron.*, **35**, 1238 (1999).
- [4] N.N. Ledentsov. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **8**, 1015 (2002).
- [5] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, V.I. Kopchatov, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, Z. Liliental-Weber, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **34**, 670 (1998).
- [6] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, Ю.Г. Мусихин, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **37**, 1143 (2003).
- [7] H.A. Wonnill, V. Gambin, B. Sank, M. Wistey, H. Yuen, L. Goddard, K. Seongsin, J. Harris. *Abstracts Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy* (2002) v. 61, p. 89.
- [8] I.P. Soshnikov, N.V. Kryzhanovskaya, O.M. Gorbenko, N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, H. Kirmse, W. Neumann, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.* (to be published).
- [9] L.H. Li, V. Sallet, G. Patriarche, L. Largeau, S. Bouchoule, K. Merghem, L. Travers, J.C. Harmand. *Electron. Lett.*, **39**, 519 (2003).
- [10] И.П. Сошников, О.М. Горбенко, А.О. Голубок, Н.Н. Леденцов. *ФТП*, **35**, 361 (2001).
- [11] I.P. Soshnikov, N.N. Ledentsov, B.V. Volovik, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, O.M. Gorbenko, W. Passenberg, H. Kuenzel, N. Grote, V.M. Ustinov, H. Kirmse, W. Neumann, P. Werner, N.D. Zakharov, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Proc 9th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (2001) v. 1, p. 82.

Редактор Т.А. Полянская

Structural and optical properties of heterostructures with InAs quantum dots in InGaAsN quantum well grown by molecular beam epitaxy

I.P. Soshnikov, N.V. Kryzhanovskaya, N.N. Ledentsov, A.Yu. Egorov, V.V. Mamutin, V.A. Odnoblyudov, V.M. Ustinov, O.M. Gorbenko*, H. Kirmse⁺, W. Neumann⁺, D. Bimberg**

loffe Physicothecnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institute for Analytical Instrumentation,
Russian Academy of Sciences,
198103 St. Petersburg, Russia

⁺ Humboldt University of Berlin,
D-12489 Berlin, Germany

** Technical University of Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract Results of investigation of structural and optical properties of GaAs-based heterostructures with InAs quantum dot layers overgrown by InGaAsN quantum well are presented in the work. The effect of the thickness of the InGaAsN layer, composition and distribution of nitrogen on the character and density of defects in structure is studied by transmission electron microscopy. It demonstrated that InAs nanodomain size and contrast of lattice mismatch is higher for structures that contain the nitrogen. The correlation between the luminescence wavelength and the size and composition of nanodomains is displayed. This has demonstrated the correlation between the defect density and the luminescence intensity.