

Оптические свойства метаморфных гетероструктур GaAs/InAlGaAs/InGaAs с квантовыми ямами InAs/InGaAs, излучающих в спектральном диапазоне 1250–1400 нм

© А.Ю. Егоров^{++‡}, Л.Я. Карачинский^{++‡}, И.И. Новиков^{++‡}, А.В. Бабичев^{++‡},
В.Н. Неведомский⁺, В.Е. Бугров^{*}

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

^{*} Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия

[‡] ООО „Коннектор Оптик“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: anton@beam.ioffe.ru

(Получена 10 ноября 2015 г. Принята к печати 16 ноября 2015 г.)

Показана возможность создания методом молекулярно-пучковой эпитаксии метаморфных гетероструктур GaAs/InAlGaAs/InGaAs с квантовыми ямами InAs/InGaAs, излучающих в спектральном диапазоне 1250–1400 нм. Исследованы структурные и оптические свойства методами рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии и фотолюминесценции. Проведенный сравнительный анализ интегральной интенсивности фотолюминесценции созданных гетероструктур и эталонного образца подтвердил высокую эффективность излучательной рекомбинации в созданных гетероструктурах. Отсутствие проникновения дислокаций в активную область метаморфных гетероструктур, где происходит процесс излучательной рекомбинации носителей заряда, подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии.

1. Введение

В настоящее время применяются два различных подхода к созданию полупроводниковых лазеров на подложках GaAs, излучающих на длинах волн 1300–1550 нм. Согласно первому подходу, в качестве активной области используются квантовые ямы (КЯ/QW) состава GaInAsN/GaAsN [1,2] или GaInNAsSb/GaNAsSb [3–6] с лазерной генерацией на длине волны 1420 и 1490 нм соответственно. В то же время был предложен оригинальный подход — выращивание квантовых точек с длиной волны излучения ~ 1.5 мкм, основанный на принципах метаморфного роста буферных слоев InGaAlAs на подложках GaAs [7,8], который в дальнейшем позволил реализовать эффективные лазеры с торцевым выводом излучения [9,10]. Достигнутые результаты по метаморфному росту гетероструктур свидетельствуют о перспективности данного подхода, в том числе при создании вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ). Из последних работ по метаморфному росту длинноволновых ВИЛ можно отметить отработку технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) применительно к формированию метаморфной гетероструктуры GaAs–InGaAs [11], работы по созданию метаморфного туннельного перехода на основе пары твердых растворов Ga_{0.76}In_{0.24}As/GaAs_{0.75}Sb_{0.25} [12], а также исследования по формированию метаморфных распределенных брэгговских отражателей In_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.3}Al_{0.7}As [13].

В связи с вышесказанным актуальной задачей является дальнейшая разработка альтернативного подхода

к созданию полупроводниковых лазерных излучателей спектрального диапазона 1300–1550 нм, основанного на метаморфном росте гетероструктур на подложках GaAs.

Целью настоящей работы являлась практическая реализация методом МПЭ метаморфных гетероструктур с КЯ InAs/InGaAs на поверхности арсенида галлия, излучающих на длинах волн > 1250 нм при комнатной температуре и характеризующихся высокой эффективностью излучательной рекомбинации, не уступающей эффективности гетероструктур с КЯ, излучающих в спектральном диапазоне 900–1000 нм.

2. Эксперимент

Экспериментальные образцы были изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на промышленной установке Riber MBE49 компанией ООО „Коннектор Оптик“ на подложках GaAs(001). Спектры оптического отражения образцов были зарегистрированы с использованием установки RPM 2000. Структурные свойства образцов исследовались с помощью рентгеновского дифрактометра фирмы PANalytical и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM 2100F при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образцы для исследований методом ПЭМ были изготовлены в геометрии поперечного сечения (110) с использованием механической обработки и с последующим распылением на конечном этапе до перфорации пучком Ag⁺-ионов с энергией 4 кэВ под углом 7° к поверхности.

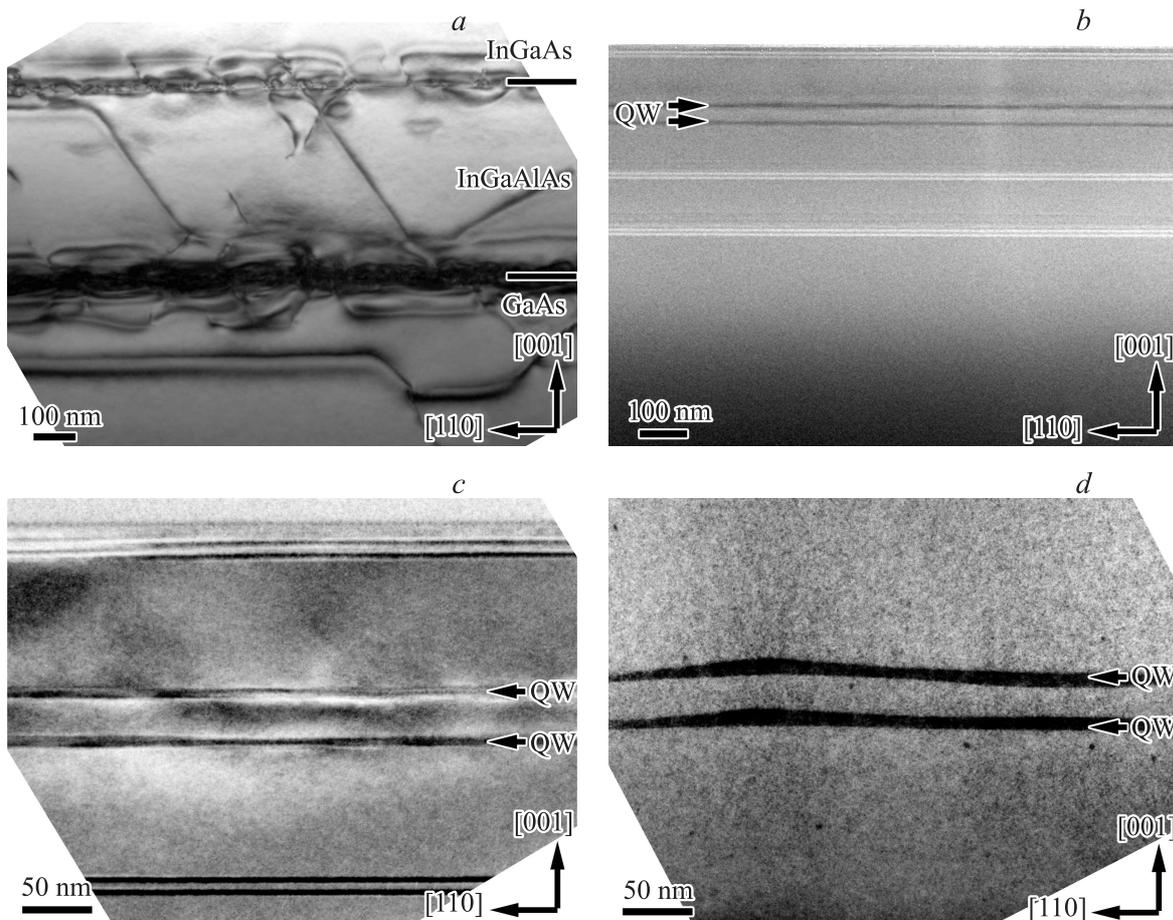


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поперечных сечений образцов метаморфных гетероструктур, выращенных на подложках GaAs(001) методом МПЭ: *a, b, c* — гетероструктура GaAs/In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As/In_{0.32}Ga_{0.68}As/In_{0.45}Ga_{0.55}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As; *d* — гетероструктура GaAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As/In_{0.43}Ga_{0.57}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As.

3. Результаты и их обсуждение

В ходе выполнения работы отрабатывались как технология изготовления переходных метаморфных слоев, так и технология изготовления квантовых ям. На рис. 1 представлены электронно-микроскопические изображения поперечного сечения образцов метаморфных гетероструктур, выращенных на подложках GaAs(001) методом МПЭ. Образцы представляют собой гетероструктуры GaAs/GaAs/In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As/In_{0.32}Ga_{0.68}As/In_{0.45}Ga_{0.55}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As с двухступенчатым переходным метаморфным слоем от кристалла с параметром решетки GaAs к кристаллу с параметром решетки In_{0.32}Ga_{0.68}As. На рис. 1, *a* представлено изображение области гетероструктуры с двухступенчатым переходным метаморфным слоем, на рис. 1, *b* — общий вид поперечного сечения гетероструктуры (слои квантовых ям In_{0.45}Ga_{0.55}As отмечены стрелками), на рис. 1, *c* — увеличенное изображение области гетероструктуры со слоями квантовых ям In_{0.45}Ga_{0.55}As. Слои квантовых ям форми-

ровались посредством выращивания сверхрешетки InAs/In_{0.32}Ga_{0.68}As со средним составом In_{0.45}Ga_{0.55}As и толщиной 9 нм, при этом толщина слоев InAs была выбрана 0.3 нм. На рис. 1, *d* приведено увеличенное изображение области со слоями квантовых ям гетероструктуры GaAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As/In_{0.43}Ga_{0.57}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As. При выращивании гетероструктуры использовался одноступенчатый переходный метаморфный слой от кристалла с параметром решетки GaAs к кристаллу с параметром решетки In_{0.27}Ga_{0.73}As. Слои квантовых ям формировались посредством выращивания сверхрешетки InAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As, согласованной со средним составом In_{0.43}Ga_{0.57}As, толщиной 9 нм, при этом толщина слоев InAs была выбрана 0.15 нм.

Исследования гетероструктур методами просвечивающей электронной микроскопии показали эффективную локализацию дислокаций несоответствия в области переходного метаморфного слоя и практически полное подавление проникновения дислокаций в вышележащие слои гетероструктуры, т.е. в области расположения квантовых ям. Исследования обоих образцов методом

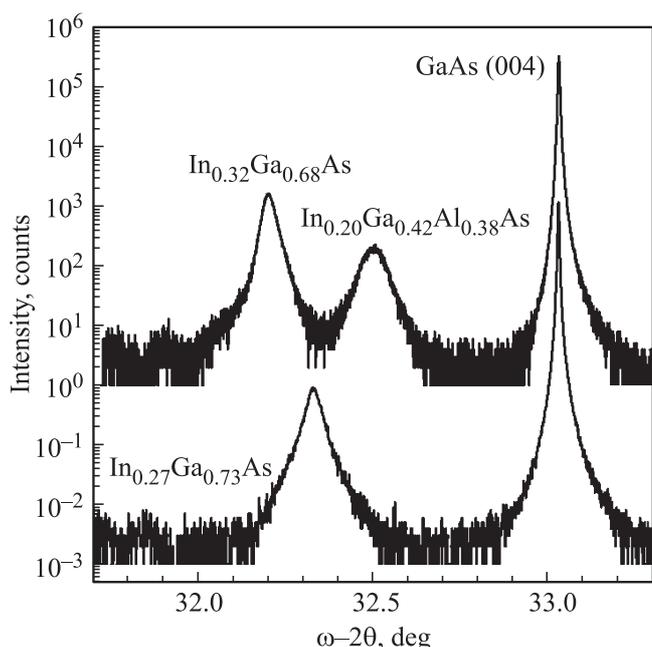


Рис. 2. Дифракционные кривые образцов метаморфных гетероструктур, выращенных на подложках GaAs(001) методом МПЭ: сверху — гетероструктура GaAs/In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As/In_{0.32}Ga_{0.68}As/In_{0.45}Ga_{0.55}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As; внизу — гетероструктура GaAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As/In_{0.43}Ga_{0.57}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As.

рентгеновской дифракции (рис. 2) подтвердили наличие характерных хорошо выраженных и достаточно узких дифракционных пиков, соответствующих метаморфным слоям In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As и In_{0.32}Ga_{0.68}As на поверхности GaAs в случае первого образца и In_{0.27}Ga_{0.73}As на поверхности GaAs в случае второго образца. Компьютерное моделирование дифракционных кривых показало, что степень релаксации упругих напряжений практически близка к 100% для обоих образцов.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) гетероструктур, зарегистрированные при комнатной температуре, приведены на рис. 3. Вверху на рис. 3 показаны спектры для гетероструктуры GaAs/In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As/In_{0.32}Ga_{0.68}As/In_{0.45}Ga_{0.55}As с квантовой ямой In_{0.32}Ga_{0.68}As при различных мощностях накачки от 10 до 45 мВт. Видно, что максимум спектра фотолюминесценции квантовых ям, сформированных посредством выращивания сверхрешетки InAs/In_{0.32}Ga_{0.68}As со средним составом In_{0.45}Ga_{0.55}As и толщиной 9 нм, расположен на длине волны 1320 нм. Максимум спектра фотолюминесценции слоя In_{0.32}Ga_{0.68}As расположен на длине волны 1205 нм. При увеличении мощности накачки линия, соответствующая квантовым ямам, постепенно насыщается, и при большой мощности в спектре доминирует линия слоя In_{0.32}Ga_{0.68}As, окружающего квантовую яму. Такое поведение характерно для гетероструктур с квантовыми точками или гофрированными квантовыми ямами. Вывод о наличии неоднородностей в слоях исследуемых квантовых ям следует из детального рассмотре-

ния изображений, полученных с помощью ПЭМ и приведенных на рис. 1, b, c. Внизу на рис. 3 показан спектр ФЛ для гетероструктуры GaAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As/In_{0.43}Ga_{0.57}As с квантовой ямой In_{0.32}Ga_{0.68}As при мощности накачки 45 мВт. Спектральный максимум фотолюминесценции квантовых ям, сформированных посредством выращивания сверхрешетки InAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As, согласованной со средним составом In_{0.43}Ga_{0.57}As и толщиной 9 нм при толщине слоев InAs 0.15 нм, расположен на длине волны 1280 нм. Второй максимум в спектре ФЛ на длине волны 1140 нм соответствует рекомбинации носителей в барьерных слоях In_{0.29}Ga_{0.71}As, окружающих слой квантовых ям. Даже при большой мощности накачки в спектре доминирует линия, соответствующая рекомбинации носителей в слоях квантовых ям. Контраст электронно-микроскопического изображения (рис. 1, d), полученного в условиях, чувствительных к изменениям химического состава, показывает, что значительных (более 5%) флуктуаций состава по индию в слоях квантовых ям нет. При этом сами КЯ имеют флуктуации толщины. Необходимо отметить, что интегральная интенсивность фотолюминесценции исследуемых образцов не уступает интегральной интенсивности ФЛ эталонного псевдоморфного образца с квантово-размерной гетероструктурой GaAs/In_{0.17}Ga_{0.83}As/GaAs с толщиной слоя In_{0.17}Ga_{0.83}As ~ 12 нм.

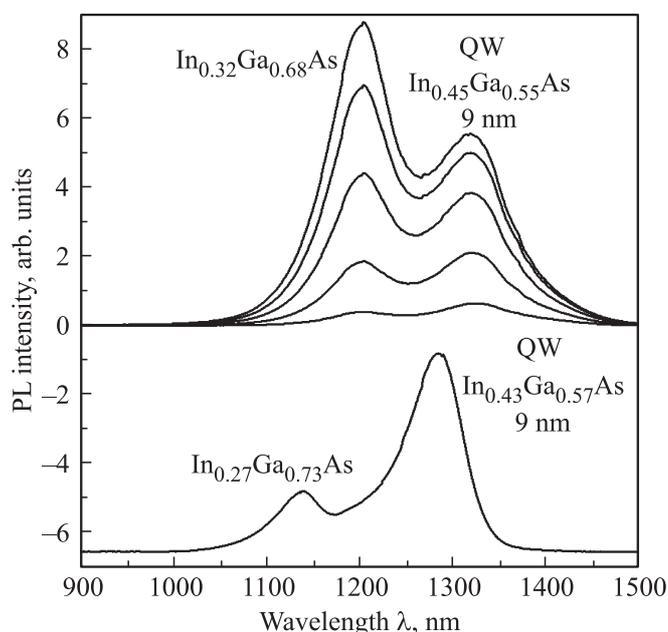


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (PL) образцов метаморфных гетероструктур при комнатной температуре: вверху — гетероструктура GaAs/In_{0.20}Ga_{0.42}Al_{0.38}As/In_{0.32}Ga_{0.68}As/In_{0.45}Ga_{0.55}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As, различные мощности накачки от 10 до 45 мВт (снизу вверх); внизу — гетероструктура GaAs/In_{0.27}Ga_{0.73}As/In_{0.43}Ga_{0.57}As(КЯ)/In_{0.32}Ga_{0.68}As, при мощности накачки 45 мВт.

4. Заключение

В настоящей работе показана возможность создания методом молекулярно-пучковой эпитаксии метаморфных гетероструктур GaAs–InGaAs с квантовыми ямами, излучающими в спектральном диапазоне 1250–1400 нм. Сравнительный анализ интегральной интенсивности фотолуминесценции исследованных гетероструктур и эталонного образца подтвердил высокую эффективность излучательной рекомбинации в созданных гетероструктурах. Отсутствие проникновения дислокаций в активную область метаморфных гетероструктур, где происходит процесс излучательной рекомбинации носителей заряда, подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии (плотность дислокаций, проникающих в активную область гетероструктур, оказалась меньше предела обнаружения метода ПЭМ для данного образца, т. е. $< 1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$).

Проведенные исследования подтверждают перспективность подхода, основанного на метаморфном росте, для практической реализации светоизлучающих приборов спектрального диапазона 1250–1400 нм и в дальнейшем вплоть до 1550 нм на подложках арсенида галлия.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 14-29-08273 офи_м, с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.621.21.0007 id RFMEFI62114X0007).

Список литературы

- [1] D. Gollub, S. Moses, M. Fischer, A. Forchel. *Electron. Lett.*, **39** (10), 777 (2003).
- [2] T. Hakkarainen, J. Toivonen, H. Koskenvaara, M. Sopanen, H. Lipsanen. *J. Phys.: Condens. Matter*, **16** (31), S3009 (2004).
- [3] S.R. Bank, H.P. Bae, H.B. Yuen, M.A. Wistey, L.L. Goddard, J.S. Harris. *Electron. Lett.*, **42** (3), 156 (2006).
- [4] S.R. Bank, M.A. Wistey, L.L. Goddard, H.B. Yuen, V. Lordi, jr, J.S. Harris. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40** (6), 656 (2004).
- [5] S.R. Bank, L.L. Goddard, M.A. Wistey, H.B. Yuen, jr, J.S. Harris. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **11** (5), 1089 (2005).
- [6] V.M. Korpijarvi, E.L. Kantola, T. Leinonen, R. Isoaho, M. Guina. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **21** (6), 1 (2015).
- [7] И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, С.С. Михрин, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг. *ФТП*, **37** (10), 1270 (2003).
- [8] N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, V.M. Ustinov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **39** (15), 1126 (2003).
- [9] T. Kettler, L.Y. Karachinsky, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, G. Fiol, M. Kuntz, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, K. Posilovic, D. Bimberg, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (4), 041113 (2006).
- [10] L.Y. Karachinsky, T. Kettler, I.I. Novikov, Y.M. Shernyakov, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, G. Fiol, M. Kuntz, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, K. Posilovic, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **21** (5), 691 (2006).
- [11] А.Ю. Егоров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.В. Бабичев, В.Н. Неведомский, В.Е. Бугров. *ФТП*, **49** (11), 1569 (2015).
- [12] I. García, J.F. Geisz, R.M. France, J. Kang, S.H. Wei, M. Ochoa, D.J. Friedman. *J. Appl. Phys.*, **116** (7), 074508 (2014).
- [13] А.Ю. Егоров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А.В. Бабичев, Т.Н. Березовская, В.Н. Неведомский. *ФТП*, **49** (10), 1434 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical properties of metamorphic GaAs/InAlGaAs/InGaAs heterostructures with quantum wells InAs/InGaAs radiating in the spectral range 1250–1400 nm

A.Yu. Egorov^{+,*†}, L.Ya. Karachinsky^{+,*†},
I.I. Novikov^{+,*†}, A.V. Babichev^{+,*†},
V.N. Nevedomskiy⁺, V.E. Bugrov^{*}

⁺ Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

^{*} ITMO University, 197101 St. Petersburg, Russia

[†] Connector Optics LLC, 194292 St. Petersburg, Russia

Abstract The ability to create the metamorphic GaAs/InAlGaAs/InGaAs heterostructures with quantum wells InAs/InGaAs radiating in the spectral range 1250–1400 nm by of molecular beam epitaxy technique is demonstrated. The structural and optical properties of heterostructures are studied by X-ray diffraction, transmission electron microscopy and photoluminescence techniques. Conducted a comparative analysis of the photoluminescence integrated intensity of the heterostructures and reference sample confirmed high efficiency of radiative recombination in heterostructures. Lack of penetration of dislocations in the active region of the metamorphic heterostructures confirmed by transmission electron microscopy.