

Исследование оптических характеристик структур с сильно напряженными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

© Д.А. Винокуров[¶], В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Н. Соколова,
А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов

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

(Получена 30 марта 2009 г. Принята к печати 3 апреля 2009 г.)

Представлены результаты фотолюминесцентных исследований гетероструктур с сильно напряженными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Показано, что интенсивность фотолюминесценции в зависимости от толщины квантовой ямы имеет максимум, положение которого зависит от состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Длина волны фотолюминесценции при максимальной интенсивности составила 1.13 мкм при толщине квантовой ямы 60 Å и 1.14 мкм при толщине 50 Å для $x = 0.39$ и $x = 0.42$ соответственно.

PACS: 42.55.Px, 78.55.Cr, 78.67.De

1. Введение

Лазерные гетероструктуры, излучающие в диапазоне длин волн 1.2–1.5 мкм, традиционно изготавливались на подложках InP в системе GaInAsP или в системе AlGaInAs [1,2]. В последнее время интенсивно развивается направление по разработке лазерных гетероструктур, излучающих в данном диапазоне и выращиваемых на подложках GaAs [3–11]. По параметрам слоев такие лазерные гетероструктуры аналогичны типичным лазерным гетероструктурам раздельного ограничения, разработанным для диапазона длин волн 0.98–1.1 мкм [12]. Применение подложки GaAs позволяет увеличить температурную стабильность лазерных характеристик благодаря более сильному ограничению носителей заряда в активной области, а также благодаря росту оптического ограничения из-за большего скачка показателя преломления на гетерогранице волновод-эмиттер, что обеспечивает повышение оптической мощности как в непрерывном, так и в импульсном режиме генерации.

В настоящее время в литературе представлены несколько подходов для решения поставленной задачи достижения генерации на длинах волн излучения 1.1–1.5 мкм в гетероструктурах раздельного ограничения, выращенных на подложках GaAs:

— применение в качестве активной области квантовых точек In(Ga)As [3–5] или квантовой ямы на основе четверного твердого раствора InGaAsN [6,7];

— использование в лазерной структуре компенсирующих слоев GaAsP для подавления процессов образования дислокаций [8,9];

— применение специально подготовленной подложки с буферным слоем из твердого раствора InGaAs, что позволяет скомпенсировать напряжения в активной области лазерной структуры и достичь генерации в квантовой яме $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ вплоть до длины волны 1.6 мкм [10];

— подбор технологических режимов эпитаксии напряженного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ активной области, что

позволяет выращивать бездислокационные слои с большими значениями x и толщины твердого раствора и достичь генерации на длине волны 1.2 мкм [11].

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследований влияния состава и толщины квантовой ямы на фотолюминесцентные свойства гетероструктур в системе AlGaAs/GaAs/InGaAs, выращенных на подложках GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). Цель работы — достижение максимальной длины волны излучения и максимальной величины внешнего квантового выхода в гетероструктуре с двумерной квантово-размерной активной областью $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

2. Экспериментальные образцы

Все исследуемые структуры выращивались в идентичных условиях методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS 3100 в вертикальном реакторе с резистивным нагревом подложкодержателя. Температура эпитаксии составляла 625°C, давление в реакторе — 77 Торр, скорость вращения подложкодержателя — 1000 об/мин. В качестве источников служили триэтилгаллий ($\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$), триметилалюминий ($\text{Al}(\text{CH}_3)_3$), триметилиндий ($\text{In}(\text{CH}_3)_3$) и арсин (AsH_3).

Для исследований выращивались гетероструктуры с эмиттерными и волноводными слоями, аналогичными слоям лазерных гетероструктур, описанных в [12]. Исследуемые структуры состояли из нелегированных широкозонных слоев $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ толщиной 300 нм, волноводного слоя GaAs толщиной 1000 нм, в середине которого выращивалась сильно напряженная квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Следует отметить, что для увеличения длины волны люминесценции в гетероструктуре с квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ необходимо увеличивать содержание индия в твердом растворе. Увеличение доли индия в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ведет к возрастанию несоответствия параметров решеток между подложкой GaAs и слоем твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, что приводит к росту упругих

[¶] E-mail: dmitry.vinokurov@mail.ioffe.ru

напряжений и уменьшению критической толщины слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В работе [9] нами было показано, что при толщине слоя активной области больше критической толщины происходит ухудшение фотолюминесцентных характеристик структуры. При толщинах больше критической происходит релаксация упругих напряжений в структуре, степень которой возрастает с увеличением толщины слоя относительно критической, сопровождающаяся образованием дефектов (в частности дислокаций несоответствия).

Состав твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ определялся в тестовых слоях толщиной 1000 нм, выращенных при тех же технологических условиях и соотношениях элементов в газовой фазе, что и активные области в исследуемых фотолюминесцентных структурах. Измерения состава слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ производились методом рентгеноспектрального микроанализа на электронно-зондовом микроанализаторе CAMEBAX.

Толщина активной области определялась путем расчета из известной скорости роста GaAs, состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и времени осаждения слоя. Скорость роста слоев GaAs в наших экспериментах составляла 200 Å/мин.

Известно, что в процессе МОС-гидридной эпитаксии слоев твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в волноводных слоях GaAs наблюдается неравномерное распределение In по толщине слоя, обусловленное процессами сегрегации индия [13]. Соответственно расчетные значения толщин слоев твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, приведенные в нашей работе, могут несколько отличаться от их реальных значений.

Проконтролировать задаваемую толщину квантовой ямы можно, рассчитывая ее на основании задаваемого состава и полученной длины волны фотолюминесценции. В работах [14,15] приведены различные зависимости ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от состава. Согласно этим зависимостям, с использованием значений разрывов зон между ненапряженными материалами волновода и активной области [16], с учетом напряжений в структуре согласно [17] и эффекта размерного квантования на основе [18] были получены несколько различающиеся значения толщины квантовой ямы. Так, если для твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием In $x = 0.39$ по скорости роста мы задаем толщину 60 Å и получаем длину волны фотолюминесценции 1.13 мкм, то расчетные значения толщины по [14] составляют 50 Å, а по [15] — 64 Å. Для твердого раствора с $x = 0.42$ при заданной толщине 60 Å мы получаем расчетные значения 44 и 54 Å соответственно. Согласно проведенным расчетам, наилучшее согласие с экспериментально задаваемой по скорости роста толщиной квантовой ямы достигается при использовании в расчетах ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, приведенной в работе [15].

Однако, поскольку соотношение $[\text{Ga}]/[\text{In}]$ в газовой фазе в исследуемом диапазоне составов твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ практически не зависит от мольного

потока In, мы считаем, что профиль распределения индия в слое квантовой ямы — одинаковый для всех составов, а толщина слоя пропорциональна времени роста во всем диапазоне исследуемых толщин. Это предположение позволяет нам проводить сравнительный анализ для структур с разными составами активной области $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

3. Результаты исследований

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились при оптической накачке Ar^+ -лазером с длиной волны излучения 488 нм и плотностью оптической мощности в диапазоне от 10 до 100 Вт/см². Сигнал регистрировался фотоприемником „Hamamatsu“ со спектральной чувствительностью в диапазоне 0.9–2.1 мкм. Все измерения проводились при температуре 300 К.

На рис. 1 представлены зависимости относительной интенсивности максимума спектра ФЛ от задаваемой толщины слоя квантовой ямы для разных составов твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Для составов с $x = 0.39$ и $x = 0.42$ в зависимостях наблюдается ярко выраженный максимум, в то время как для состава с $x = 0.28$ интенсивность максимума спектра ФЛ слабо зависит от толщины слоя квантовой ямы. При этом максимальная интенсивность ФЛ для структур с активной областью $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ состава с $x = 0.42$ сдвинута в область меньших толщин относительно максимума интенсивности ФЛ структур с $x = 0.39$ и имеет более резкую зависимость. Это обусловлено, по нашему мнению, большими напряжениями в активной области и началом образования дефектов и дислокаций при меньших толщинах. Нами были проведены расчеты критических толщин для слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составов с $x = 0.39$ и $x = 0.42$ по модели, представленной в [19]. Расчетные значения составили 56 Å при содержании In $x = 0.42$ и 62 Å при

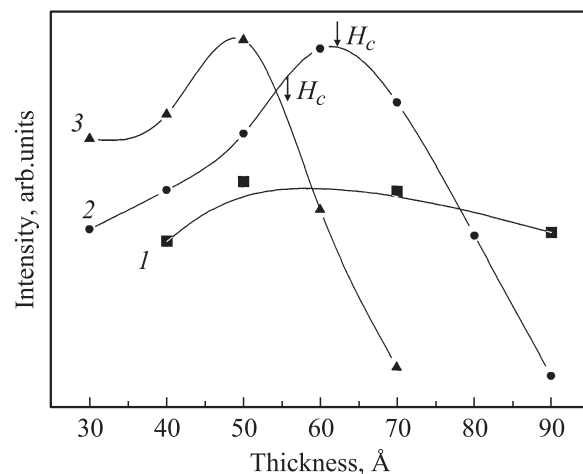


Рис. 1. Зависимости относительной интенсивности максимума спектра фотолюминесценции от задаваемой толщины слоя квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: 1 — $x = 0.28$, 2 — $x = 0.39$, 3 — $x = 0.42$. H_c — критическая толщина.

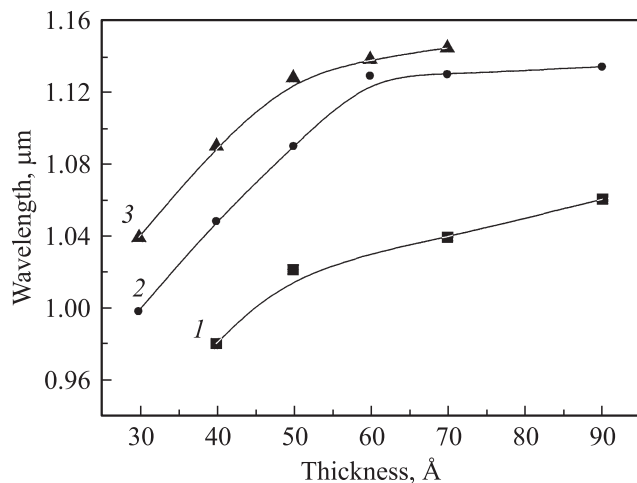


Рис. 2. Зависимости длины волны максимума спектров фотолюминесценции от толщины квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: 1 — $x = 0.28$, 2 — $x = 0.39$, 3 — $x = 0.42$.

$x = 0.39$, что совпадает со спадом интенсивности люминесценции экспериментальных структур (на рис. 1 расчетные значения критических толщин H_c отображены стрелками). Необходимо отметить, что при изменении уровня возбуждения Ar^+ -лазером исследуемых образцов от 10 до 100 Вт/см² ход зависимостей интенсивности люминесценции от толщины квантовой ямы сохранялся и длина волны максимума спектра люминесценции от квантовой ямы также не зависела от уровня накачки.

Интерес вызывает снижение интенсивности максимума ФЛ при уменьшении толщины квантовой ямы в исследуемых зависимостях. По нашему мнению, есть две возможные причины наблюдаемого эффекта. Снижение интенсивности спектров ФЛ с уменьшением толщины может быть связано с увеличением времени излучательной рекомбинации [20], а также с возрастанием вклада безызлучательной рекомбинации на гетерограницах квантовой ямы и волновода [21].

На рис. 2 представлены зависимости длины волны максимума спектров ФЛ от толщины квантовой ямы при разных составах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Такой характер зависимостей, по нашему мнению, свидетельствует о двумерном росте квантовых ям без образования трехмерных островков, подобных квантовым точкам, поскольку, согласно данным [22], длина волны для квантовых точек практически не зависит от номинальной толщины выращиваемого слоя. Максимальная длина волны для структур с содержанием In в активной области $x = 0.39$ и $x = 0.42$ при толщинах, соответствующих максимумам интенсивности ФЛ (рис. 1), была практически одинакова и составляла 1.13–1.14 мкм.

4. Заключение

В данной работе исследованы полупроводниковые гетероструктуры с сильно напряженными квантовыми

ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Показано, что зависимость интенсивностей ФЛ таких гетероструктур от толщины активной области имеет максимум, положение которого зависит от состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Зависимость длины волны люминесценции гетероструктур от номинальной толщины квантовой ямы свидетельствует о двумерном характере роста активной области. Максимальная длина волны ФЛ, достигнутая в структурах, выращенных при данных условиях, составила 1.13–1.14 мкм.

Авторы благодарят Т.Б. Попову за проведение рентгеноспектрального микроанализа слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Работа поддержана грантом РФФИ № 07-02-00714, программами президиума РАН № 27 и отделения ОФН III-7, госконтрактом № 02.513.12.3011.

Список литературы

- [1] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, Ю.А. Рябоштан, Е.Н. Голикова, И.С. Тарасов. ФТП, **36** (11), 1393 (2002).
- [2] С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Н. Голикова, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **29** (3), 65 (2003).
- [3] F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao, N. Kirstaedter, A. Krost, D. Bimberg, A.O. Kosogov, P. Werner. Appl. Phys. Lett., **71** (1), 22 (1997).
- [4] С.С. Михрин, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, В.М. Устинов, М.М. Кулагина, Е.В. Никитина, И.П. Сошников, Ю.М. Шерняков, Д.А. Лившиц, Н.В. Крыжановская, Д.С. Сизов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, D. Bimberg, Ж.И. Алфёров. ФТП, **36** (11), 1400 (2002).
- [5] E.C. Le Ru, P. Howe, T.S. Jones, R. Murray. Phys. Rev. B, **67**, 165 303 (2003).
- [6] D.A. Livshits, A.Y. Egorov, H. Riechert. Electron. Lett., **36** (16), 1381 (2000).
- [7] M. Kondow, T. Kitatani, S. Nakatsuka, M.C. Larson, K. Nakahara, Y. Yazawa, M. Okai, K. Uomi. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **3** (3), 719 (1997).
- [8] N. Tansu, J.-Y. Yeh, L.J. Mawst. Appl. Phys. Lett., **82** (23), 4038 (2003).
- [9] В.В. Шамахов, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.А. Капитонов, С.А. Зорина, Д.Н. Николаев, А.В. Мурашова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **31** (23), 1 (2005).
- [10] Z.H. Zhu, R. Zhou, F.E. Ejeckam, Z. Zhang, J. Zhang, J. Greenberg, Y.H. Lo, H.Q. Hou, B.E. Hammons. Appl. Phys. Lett., **72** (20), 2598 (1998).
- [11] T.K. Sharma, M. Zorn, U. Zeimer, H. Kissel, F. Bugge, M. Weyers. Cryst. Res. Technol., **40** (9), 877 (2005).
- [12] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.В. Мурашова, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. ФТП, **39** (3), 388 (2005).
- [13] A.A. Marmalyuk, O.I. Govorkov, A.V. Petrovsky, D.B. Nikitin, A.A. Padalitsa, P.V. Bulaev, I.V. Budkin, I.D. Zalevsky. J. Cryst. Growth, **237-239**, 264 (2002).
- [14] S. Adachi. J. Appl. Phys., **53** (12), 8775 (1982).

- [15] K.-H. Goetz, D. Bimberg, H. Jurgensen, J. Selders, A.V. Solomonov, G.F. Glinskii, M. Razeghi. *J. Appl. Phys.*, **54** (8), 4543 (1983).
- [16] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89** (11), 5815 (2001).
- [17] M.P.C.M. Krijn. *Semicond. Sci. Technol.*, **6**, 27 (1991).
- [18] Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщев, И.Н. Арсентьев, А.Д. Бондарев, М.К. Трукан, И.С. Тарасов. *ФТП*, **41** (10), 1247 (2007).
- [19] *Quantum Well Lasers*, ed. by P.S. Zory, jr. (Academic Press, 1993) p. 373.
- [20] В.Б. Халфин, Д.З. Гарбузов, В.В. Красовский. *ФТП*, **20** (10), 1816 (1986).
- [21] Г.Г. Зегря, В.А. Харченко. *ЖЭТФ*, **101** (1), 327 (1992).
- [22] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.В. Коваленков, Д.А. Лившиц, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **33** (7), 858 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of optical characteristics of high strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum wells

*D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, D.N. Nikolaev,
Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, V.V. Shamakhov,
I.S. Tarasov*

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

Abstract The results of photoluminescent research of heterostructures with strongly strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum wells are presented. It is shown that photoluminescent intensity as a function of quantum well thickness has a peak; its position depends on composition of solid solution $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. The photoluminescent wavelength at the highest intensity amounts to $1.13\ \mu\text{m}$ for quantum well with $60\ \text{\AA}$ thickness and $x = 0.39$ and amounts to $1.14\ \mu\text{m}$ for $50\ \text{\AA}$ thickness and $x = 0.42$.