

Гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками InAs/InGaAs/GaNAs, излучающие в спектральном диапазоне 1.4–1.8 мкм

© В.С. Михрин[†], А.П. Васильев, Е.С. Семенова, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.Г. Мусихин, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, В.М. Устинов

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

(Получена 29 июня 2005 г. Принята к печати 13 июля 2005 г.)

Исследованы выращенные на подложках GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs, содержащими монослойные внедрения InAs и ограниченными сверхрешетками InGaAs/GaNAs. При больших концентрациях индия наблюдался вызванный увеличением напряжения рассогласования переход от двумерного к островковому режиму роста. Наибольшая длина волны излучения при комнатной температуре, достигнутая в структурах с квантовыми ямами, составила 1.59 мкм, в структурах с квантовыми точками — 1.76 мкм.

PACS: 78.67.Hc, 78.67.De, 78.55.Cr

1. Введение

Торцевые и вертикальные излучатели, изготавливаемые из полупроводниковых материалов, осаждаемых на подложки GaAs, имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными приборами на подложках InP [1]. К ним относятся меньшая стоимость и больший диаметр коммерчески доступных подложек, их лучшая теплопроводность и механическая прочность, большие разрывы зон и скачки показателя преломления в гетеропарах. В частности, лазеры на основе GaAs характеризуются большей легкостью изготовления монокристаллических вертикальных излучателей вследствие возможности использования высококонтрастных брэгговских зеркал на основе AlGaAs/GaAs или AlGaO/GaAs [2,3]. Отказу от традиционной платформы использования в качестве базового материала InP в пользу GaAs в лазерах для волоконно-оптических линий связи длительное время препятствовало отсутствию достаточно узкозонных эпитаксиально выращиваемых материалов, способных излучать в спектральном диапазоне 1.3–1.55 мкм. На сегодняшний день в лазерах на основе GaAs диапазона длин волн около 1.3 мкм достигнуты приборные характеристики, соответствующие или превосходящие параметры приборов на InP. В качестве активной области этих лазеров были использованы массивы самоорганизующихся квантовых точек In(Ga)As/GaAs или квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAs (см. обзоры [4,5] и ссылки в них). Однако задача продвижения в область больших длин волн по-прежнему остается актуальной.

В случае КЯ InGaAs/GaAs длина волны $\lambda \approx 1.5$ мкм может быть достигнута за счет использования высоких концентраций индия и азота, что, однако, снижает структурное и оптическое качество и приводит к ухудшению лазерных характеристик по сравнению с более коротковолновыми структурами [6]. Как было показано

на примере структур диапазона 1.3 мкм, использование тонких слоев GaAsP [7] или GaNAs [8], частично компенсирующих механическое напряжение, позволяет до некоторой степени подавить нежелательные явления, связанные с распадом сильно напряженного твердого раствора InGaAs и образованием дислокаций, и, как результат, повысить эффективность излучательной рекомбинации. Вставки GaNAs обладают меньшей шириной запрещенной зоны по сравнению с GaAsP и вследствие этого позволяют достичь большей длины волны излучения из КЯ. В частности, в работе [9] за счет использования сверхрешеток InGaAs/GaNAs, снижающих потенциальный барьер для квантовой ямы и частично компенсирующих напряжение рассогласования, была достигнута фотолюминесценция на длине волны 1393 нм. Помещение в середину КЯ слоя InAs толщиной ~ 1 монослоя позволило увеличить длину волны до 1505 нм, указывая на перспективность подобного подхода для реализации на подложках GaAs излучения спектрального диапазона 1.55 мкм.

В данной работе исследована возможность управления длиной волны излучения в подобных гетероструктурах, использующих монослойные внедрения InAs в квантовую яму InGaAs, ограниченную сверхрешетками InGaAs/GaNAs. Наблюдался вызванный увеличением напряжения рассогласования переход от двумерного к островковому режиму роста. Наибольшая длина волны излучения при комнатной температуре, достигнутая в структурах с квантовыми ямами, составила 1.6 мкм, в структурах с квантовыми точками — 1.75 мкм.

2. Эксперимент

Исследуемые образцы были выращены на подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32P, оборудованной источником азота Applied Epi UNI-bulb с радиочастотным возбуждением

[†] E-mail: mikhrin@yahoo.com

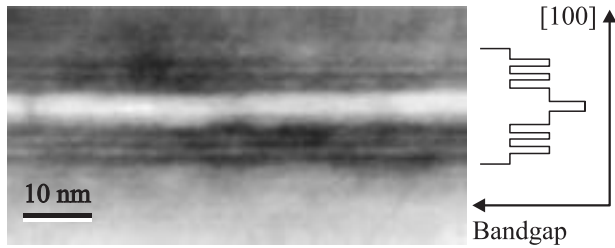


Рис. 1. ПЭМ-изображение (вид с торца) квантовой ямы $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}_{0.024}\text{As}_{0.976}$, содержащей монослой InAs и ограниченной сверхрешетками $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}_{0.024}\text{As}_{0.976}/\text{GaN}_{0.04}\text{As}_{0.96}$. Справа — зонная диаграмма.

плазмы. Активная область структуры представляет собой одиночную КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ толщиной ~ 6 нм, содержащую помещенный в центр слой InAs толщиной ~ 1 монослоя, ограниченную с обеих сторон 3 периодами сверхрешетки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ (1.3 нм)/ $\text{GaN}_z\text{As}_{1-z}$ (1 нм). Активная область зарождалась слоем GaAs толщиной 50 нм и слоем $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 50 нм. Зонная диаграмма исследованных структур схематически показана на рис. 1.

Для каждого образца содержание индия в квантовой яме и слоях InGaAsN сверхрешеток (x) было одинаковым. Была исследована серия образцов, в которой x варьировалось от 33 до 43%, что достигалось выбором соответствующей скорости роста бинарного компонента InAs при фиксированной скорости роста компонента GaAs, равной 0.16 нм/с. Все исследованные образцы имеют одинаковое содержание азота в слоях GaNAs, $z = 4\%$. Содержание азота в квантовой яме и слоях InGaAsN сверхрешетки составляло $y \approx 2.4\%$. Слабое изменение y в различных образцах обусловлено изменением встраивания азота при изменении скорости роста бинарного компонента InAs.

Температура подложки при осаждении азотсодержащих соединений составляла 370°C , для других частей гетероструктуры 580°C . После осаждения слоя AlGaAs проводился отжиг структуры в течение ~ 5 мин в потоке мышьяка при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$. Поджиг азотной плазмы производился без остановки роста до начала понижения температуры подложки, при закрытой заслонке азотного источника.

Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась YAG:Nd³⁺-лазером, работающим на второй гармонике в непрерывном режиме (длина волны излучения 532 нм). Плотность мощности возбуждения составила 2 кВт/см². Детектирование производилось с помощью охлаждаемого InGaAsSb/AlGaAsSb-фотодиода. Микрофотографии были получены методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Phillips EM 420.

3. Результаты и обсуждение

Наблюдение картины дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение во время выращивания образцов показало, что при содержании индия $x \leq 37\%$

сохраняется послойный режим роста на протяжении всех слоев структуры. При большем содержании индия картина дифракции во время осаждения квантовой ямы переходит в точечную, что соответствует островковому режиму роста. Поверхность роста затем вновь становится планарной за время роста покрывающего слоя GaAs толщиной 50 нм. Таким образом, образцы с содержанием индия 41 и 43% из исследованной серии могут быть охарактеризованы как содержащие массивы самоорганизующихся квантовых точек, тогда как образцы с меньшим содержанием индия представляют собой истинно двумерную квантовую яму. В качестве примера на рис. 1 приведено изображение поперечного сечения активной области структуры для образца с содержанием индия в квантовой яме $x = 36\%$, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии. На вставке к рисунку схематически показан профиль ширины запрещенной зоны слоев в направлении роста [001]. На ПЭМ-изображении отчетливо видна высокая планарность всех границ слоев, подтверждая данные, полученные из картин ДБЭ.

На рис. 2 представлен спектр ФЛ этой структуры при комнатной температуре (структура А). Для сравнения также показан спектр ФЛ квантовой ямы того же химического состава ($\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}_{0.024}\text{As}_{0.976}$), но без монослойного внедрения InAs и с барьерными слоями на основе GaAs (структура В). Как видно, применение монослойного внедрения InAs в сочетании с барьерами на основе сверхрешеток InGaAsN/GaNAs позволяет при незначительном уменьшении интенсивности ФЛ и слабом уширении линии достичь сильного длинноволнового сдвига максимума ФЛ. В то время как квантовая яма InGaAsN/GaAs (структура В) имеет пик ФЛ на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 1.29$ мкм, в исследуемой структуре InAs/InGaAsN/GaNAs (структура А) длина волны достигает $\lambda_{\text{max}} = 1.55$ мкм.

На рис. 2 также приведен спектр ФЛ от образца с содержанием индия 43% (структура С) — наибольшим

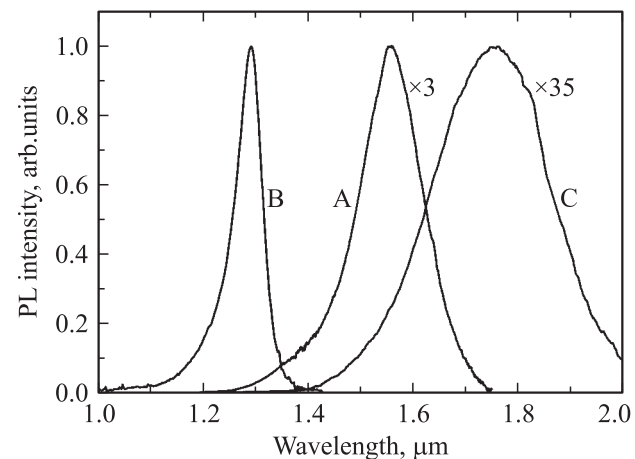


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (PL) при 300 К гетероструктур InAs/InGaAsN/GaNAs с содержанием индия $x = 36\%$ (структура А) и 43% (структура С), а также квантовой ямы без монослоя InAs $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{N}_{0.024}\text{As}_{0.976}/\text{GaAs}$ (структура В).

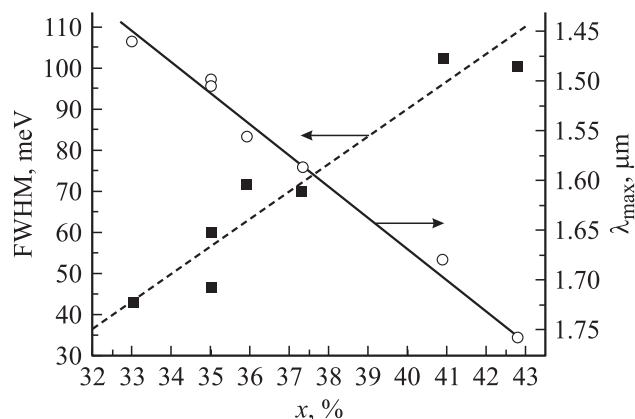


Рис. 3. Зависимость полной ширины линии ФЛ на полувысоте и положения пика ФЛ от мольной доли индия в InGaNAs.

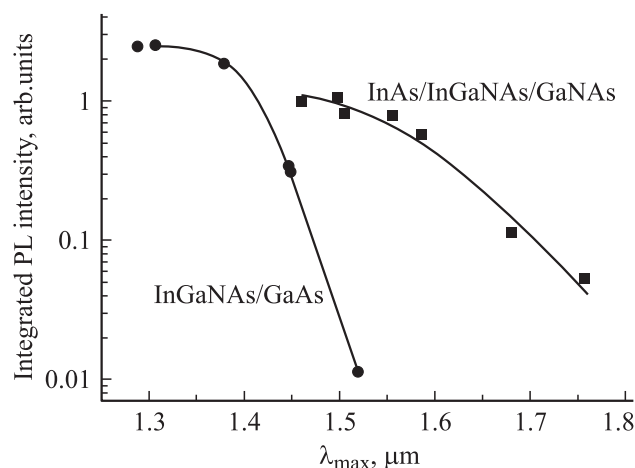


Рис. 4. Зависимость интегральной интенсивности фотолюминесценции (PL) гетероструктур с КЯ InGaNAs, барьерами GaAs и с КЯ InGaNAs/InAs, барьерами InGaNAs/GaN_{0.04}As_{0.96} от положения пика ФЛ. Температура измерений 300 К.

среди исследованных структур, в которой имел место переход от двумерного к островковому режиму роста. В отличие от рассмотренного выше образца А с меньшим содержанием индия, линия ФЛ в нем значительно уширена, а интенсивность ФЛ более чем на порядок ниже. В то же время следует отметить, что максимум линии расположен на длине волны $\lambda_{\max} = 1.76$ мкм. Насколько нам известно, это является наибольшей достигнутой длиной волны излучения при комнатной температуре в азотсодержащих структурах на GaAs-подложках.

На рис. 3 обобщены данные ФЛ, полученные для серии образцов, использующих монослойные внедрения InAs в квантовую яму InGaNAs, ограниченную сверхрешетками InGaNAs/GaNAs. На рис. 3 длина волны максимума фотолюминесценции (λ_{\max}) и спектральная ширина линии ФЛ на половине высоты (FWHM) представлены в зависимости от содержания индия (x) в слоях InGaNAs. Как видно, положение максимума ФЛ характеризуется практически линейной зависимостью от x , что делает по-

следний параметр удобным для управления длиной волны излучения подобных гетероструктур. Спектральный диапазон, который может быть перекрыт посредством структур, в которых рост активной области происходит в двумерной (последней) моде, простирается от 1.45 до 1.59 мкм и таким образом охватывает все окно прозрачности вблизи 1.55 мкм стандартного оптического волокна. Как отмечалось выше, продвижение в область больших длин волн (вплоть до 1.76 мкм) может быть реализовано в структурах, в которых рост активной области происходит в островковом режиме.

Данные, приведенные на рис. 3 для спектральной ширины линии ФЛ, показывают, что в структурах с двумерной активной областью ($x \leq 37\%$) линия остается достаточно узкой (FWHM < 70 мэВ). Наблюдаемая тенденция к уширению линии с увеличением x в этих структурах, по-видимому, обусловлена образованием локальных областей, обогащенных арсенидом индия и имеющих наименьшую энергию локализации носителей заряда. При переходе к островковому режиму роста ($x \approx 40\%$) линия ФЛ заметно уширяется (FWHM > 100 мэВ), что, вероятно, вызвано возникновением массива квантовых точек, заметно различающихся размерами. Детальное исследование этих образцов методом ПЭМ позволит выявить их основные структурные характеристики.

На рис. 4 представлена зависимость интегральной интенсивности ФЛ исследуемых гетероструктур InAs/InGaNAs/GaNAs от спектрального положения максимума ФЛ. Измерения проводились при комнатной температуре. Интенсивность нормирована на значение, полученное для структуры с содержанием индия $x = 33\%$. Для сравнения также показана соответствующая зависимость, наблюдаемая в квантовых ямах InGaNAs различного состава с барьерами GaAs. Как видно, в структурах с квантовыми ямами InGaNAs/GaAs интенсивность линии ФЛ в существенной степени уменьшается уже начиная с длин волн ~ 1.45 мкм, а длина волны ~ 1.52 мкм является практическим длинноволновым пределом для люминесценции при комнатной температуре. В то же время в исследуемых структурах со вставками InAs и барьерами в виде сверхрешеток InGaNAs/GaNAs вплоть до длин волн ~ 1.6 мкм наблюдаемый спад интенсивности ФЛ весьма незначителен. В результате в диапазоне длин волн 1.45–1.6 мкм интенсивность ФЛ подобных структур превышает уровень излучения четверных квантовых ям InGaNAs/GaAs. Хотя при переходе к островковому режиму роста интенсивность ФЛ заметно снижается, это может быть обусловлено недостаточной оптимизацией условий выращивания массивов азотсодержащих квантовых точек. В частности, на примере системы материалов InGaAs известно, что оптимальные условия осаждения слоев квантовых ям и квантовых точек различаются весьма существенно [10]. В то же время важно, что достигнута длина волны 1.79 мкм.

Нами также было проведено исследование спектров фотолюминесценции образцов в диапазоне температур от 77 до 300 К. Для структур, выращенных в двумерной моде, не наблюдалось S-образной зависимости

положения пика ФЛ от температуры, которая считается присущей КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ с высоким содержанием индия ($x > 35\%$) и азота ($y > 2\%$) [11,12]. Положение пика ФЛ изменялось плавно, сдвиг при изменении температуры в интервале 77–300 К составил 60–70 мЭВ. Это сопоставимо с температурным изменением ширины запрещенной зоны (~ 80 мЭВ в этом диапазоне температур согласно закону Варшни) и свидетельствует об их высокой однородности.

4. Заключение

Использование структур, содержащих квантовую яму InGaNaNs в сочетании с барьерами InGaNaNs/GaNaNs и монослойным внедрением InAs, позволяет при сохранении двумерного режима роста достичь длины волны излучения 1.59 мкм при комнатной температуре. Увеличение содержания индия приводит к формированию массива квантовых точек и значительному длинноволновому сдвигу пика ФЛ (1.76 мкм). Подобные гетероструктуры с длиной волн максимума ФЛ, превышающей 1.45 мкм, имеют более высокую интенсивность фотолюминесценции по сравнению с квантовыми ямами InGaNaNs/GaAs. Таким образом, примененная конструкция активной области является весьма многообещающей для применения в длинноволновых лазерах на GaAs.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16282), проекта SANDiE (контракт NMP4-ST-2004-500101) и проекта CRDF #RUE 1-5036-ST-04. А.Е. Жуков благодарит грант президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых (МД-4277.2004.2).

Список литературы

- [1] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, Y. Yazawa. *Jap. J. Appl. Phys.*, **35** (2B), 1273 (1996).
- [2] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **36** (5), 1384 (2000).
- [3] K.D. Choquette, J.F. Klem, A.J. Fischer, O. Blum, A.A. Allerman, I.J. Fritz, S.R. Kurtz, W.G. Breiland, R. Sieg, K.M. Geib, J.W. Scott, R.L. Naone. *Electron. Lett.*, **36** (5), 1388 (2000).
- [4] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **15** (8), R41 (2000).
- [5] A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov. *J. Electron. Mater.*, **30** (5), 477 (2001).
- [6] M.O. Fischer, M. Reinhardt, A. Forchel. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **7** (2), 149 (2001).
- [7] N. Tansu, A. Quandt, M. Kanskar, W. Mulhearn, L.J. Mawst. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 18 (2003).
- [8] A. Livshits, A.Yu. Egorov, H. Riechert. *Electron. Lett.*, **36**, 1381 (2000).
- [9] Н.В. Крыжановская, А.Ю. Егоров, В.В. Мамутин, Н.К. Поляков, А.Ф. Цацульников, А.Р. Ковш, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Д. Бимберг. *ФТП*, **39** (6), 735 (2005).

- [10] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов. *ФТП*, **28** (8), 1439 (1994).
- [11] A. Pomarico, M. Lomascolo, R. Cingolani, A.Yu. Egorov, H. Riechert. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 145 (2002).
- [12] S. Shirakata, M. Kondow, T. Kitatani. *Appl. Phys. Lett.*, **80** (12), 2087 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Heterostructures with InAs/InGaNaNs/GaNaNs quantum wells and quantum dots emitting at 1.4–1.8 μm

V.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, N.V. Kryzhanovskaya, A.G. Gladyshev, Yu.G. Musikhin, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 Saint-Petersburg, Russia

Abstract InGaAsN quantum wells with InAs monolayer insertions and InGaNaNs/GaAs superlattice barriers, grown by molecular-beam epitaxy were investigated. For high indium fractions, strain-induced shift from planar to island growth mode of quantum well material was observed. The maximum values of the photoluminescence maximum wavelength in quantum well structures was 1.59 μm at room temperature, and for InGaNaNs quantum dots — 1.76 μm.