

06;07

## **Влияние дизайна напряженно-компенсированных сверхрешеток InAs/InGaAsN/GaAsN на их оптические свойства**

© В.В. Мамутин, А.Ю. Егоров, Н.В. Крыжановская,  
А.М. Надточий, А.С. Паюсов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: mamutin@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 августа 2007 г.

Проведены исследования влияния различного дизайна на оптические свойства гетероструктур, состоящих из квантовых ям и квантовых точек InAs, помещенных в напряженно-компенсированные (strain-compensated) сверхрешетки GaAsN/InGaAsN. Показано, что использование таких сверхрешеток с различными толщинами ям и барьеров и от одной до трех монослойных вставок InAs в активной области позволяет изменять длину волны излучения в диапазоне 1.30–1.76  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре без ухудшения излучательных характеристик.

PACS: 73.21.Cd, 73.21.Fg, 73.21.La, 73.40.Kp, 78.55.-m, 78.67.Pt

В настоящее время интерес к исследованию свойств азотосодержащих соединений InGaAsN вызван их уникальными физическими свойствами и возможностью создания низкопороговых лазеров на подложках GaAs в телекоммуникационной области длин волн 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  [1–2], в качестве альтернативы системе InGaAsP/InP [3]. Но использование сравнительно больших концентраций азота ( $\geq 3\%$ ) и индия ( $\geq 35\%$ ), необходимых для достижения длины волны излучения  $\sim 1.55 \mu\text{m}$  в активной области лазеров, приводит к ухудшению лазерных характеристик за счет образования неоднородностей по индию и азоту [4]. Поэтому в приборных структурах желательное снижение концентрации этих элементов при сохранении нужной длины волны.

Для улучшения эффективности излучения при сохранении длины волны  $\sim 1.55 \mu\text{m}$  в структурах с активными областями, использующими квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ), предлагались различные

дизайны гетероструктур (ГС) с дополнительными слоями, например Ga(In)AsN [5,6], в которых помещается активная область. Недавно была предложена оригинальная методика изменения длины волны излучения в области от 1.2 до 1.6  $\mu\text{m}$  с использованием напряженно-компенсированных сверхрешеток (НКСП) GaAsN/InGaAsN [7].

В данной работе представлены результаты исследования излучательных свойств гетероструктур с напряженно-компенсированными сверхрешетками, состоящими из слоев InGaAs/InGaAsN, различного дизайна, с КЯ и КТ InAs в активной КЯ InGaAsN, излучающими в диапазоне 1.3–1.76  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре. Основное внимание уделялось длинам волн вблизи 1.55  $\mu\text{m}$ , так как низкопороговые лазеры на 1.33  $\mu\text{m}$  были получены нами ранее [1,8]. В то же время 1.76  $\mu\text{m}$  является наибольшей длиной волны, достигнутой на сегодня в азотсодержащих соединениях на подложках арсенида галлия.

Исследованные структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на установках ЭП-1203 и RIBER-32 с плазменным источником азота с радиочастотным разрядом (Applied Epi UNI-Bulb RF Plasma Source) на подложках GaAs (001). Температуры подложки при росте азотсодержащих слоев находились в области 350–370°C. В данном случае для осаждения активной области со сверхрешеткой (СР) и КЯ температура подложки опускалась до  $\sim 350^\circ\text{C}$ . Остальная часть структуры выращивалась при 500–600°C. Активные области осаждались в середину волноводного слоя GaAs, ограниченного со стороны подложки и поверхности барьерами AlGaAs. После роста верхнего слоя AlGaAs проводился отжиг структуры в течение  $\sim 5$  min в потоке мышьяка при температуре около 700°C. Подробнее методика выращивания описана в [9].

Планарность и качество слоев во время роста контролировались системой дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Фотолюминесценция (ФЛ) структур возбуждалась  $\text{Ar}^+$  лазером, работающим в непрерывном режиме ( $W = 1\text{--}1500 \text{ W/cm}^2$ ,  $\lambda = 514 \text{ nm}$ ), или YAG:Nd лазером, работающим на второй гармонике в непрерывном режиме ( $W = 1500 \text{ W/cm}^2$ ,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ). ФЛ сигнал пропусклся через монохроматор МДР-23 и регистрировался с помощью охлаждаемого ( $-25^\circ\text{C}$ ) InGaAs фотодиода фирмы Hamamatsu Photonics типа G5853-21 с двухстадийным Пельтье охлаждением, включенного в фотогенераторном режиме со спектральным диапазоном чувствительности 1100–2500 nm.

Для уменьшения эффектов, связанных с присутствием атомов азота и улучшения оптических свойств структуры между барьерами GaAs

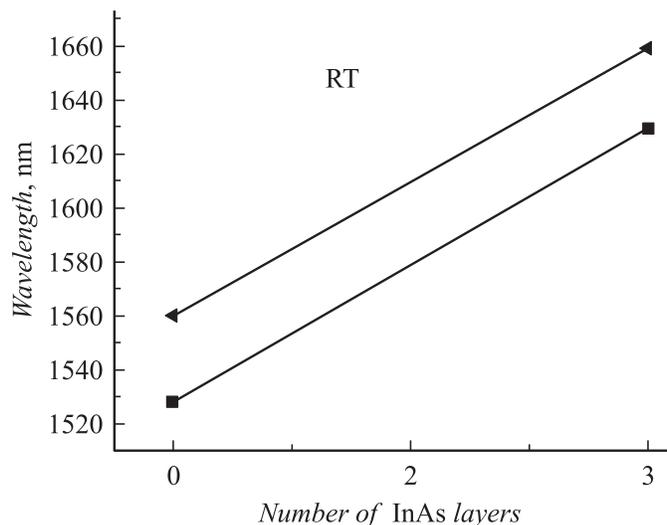
и активной квантовой ямой InGaAsN, вставлялись с двух сторон сверхрешетки GaAsN/InGaAsN, уменьшающие потенциальный барьер, напряжения и среднюю концентрацию азота во всей активной области. Для увеличения длины волны излучения до 1.60–1.76  $\mu\text{m}$  в активную КЯ InGaAsN добавлялись монослойные квантовые ямы или квантовые точки из InAs.

Исследовались симметричные и несимметричные сверхрешетки GaAsN/InGaAsN с центральной КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ , толщиной  $6.2 \pm 0.1 \text{ nm}$ , не превышающей критическую для данного состава по индию ( $x \sim 38\%$ ), составляющую  $\sim 7 \text{ nm}$  [10]. Менялись количество и толщины слоев и, следовательно, напряжения в структуре при сохранении составов: содержание азота в GaAsN  $y \sim 4\%$ , индия  $x \sim 38\%$  и азота  $y \sim 2.6\%$  в InGaAsN. Более подробно структура описана в [7]. Оценивались как общее напряжение в структуре, так и напряжения в сверхрешетке до и после активной КЯ по известному рассогласованию параметров решеток слоев, относительно подложки GaAs, аналогично работе [11], которые составляют для GaAsN<sub>0.04</sub> и In<sub>0.38</sub>GaAsN<sub>0.026</sub> соответственно  $-0.7\%$  и  $+2.1\%$ , исходя из последних данных по зависимости постоянных решетки от составов [12]. Нужно отметить, что наиболее явное влияние на эффективность ФЛ оказывало напряжение в СР между подложкой и активной ямой, в то время как напряжение в последующей СР могло не влиять на эффективность ФЛ, особенно в несимметричных структурах. Более подробно эти зависимости представлены в [13].

Фотография поперечного сечения СР с излучением на  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ , полученная с помощью просвечивающей электронной микроскопии, приведена в [13] и показывала высокую планарность всех интерфейсов, подтверждая данные, полученные из картин ДБЭ, соответствовавших планарному двумерному росту.

В данной работе проводилось выращивание несколько типов ГС с различным набором толщин (0.5–7.0 nm) и количества слоев (10–30) в СР, дающих напряжения разных знаков и величин, аналогично работам [13,14], что обеспечивало изменение длины волны в пределах 1.3–1.76  $\mu\text{m}$ . Интенсивности нормировались на лучший реперный образец с длиной волны  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ , как и в [13]. Потоки в процессе МПЭ и составы слоев сохранялись постоянными. Исследовалась ФЛ структур в зависимости от дизайна СР (толщин и количества ям и барьеров, а также от количества вставок InAs).

На рис. 1 представлена зависимость длины волны ФЛ от количества монослойных вставок InAs в активную центральную квантовую яму

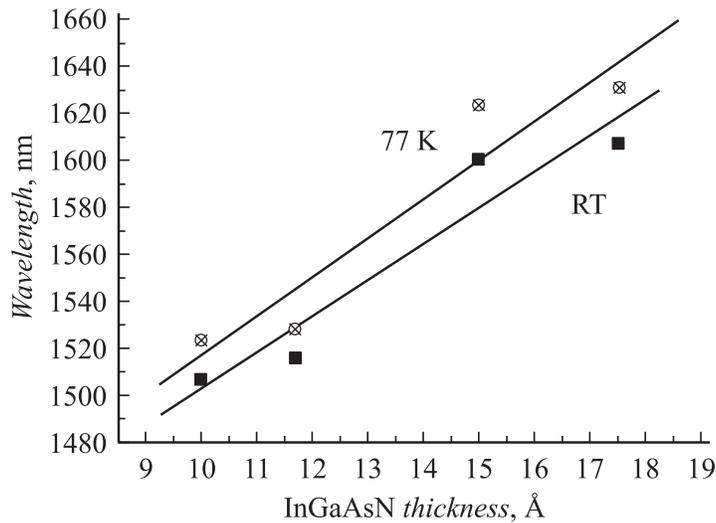


**Рис. 1.** Зависимость длины волны излучения при комнатной температуре (RT) от количества монослойных вставок InAs в активной квантовой яме InGaAsN для двух величин барьеров симметричной сверхрешетки: 13 Å — треугольники, 26 Å — квадраты.

InGaAsN для СР с различными толщинами барьеров — 13 и 26 Å. Видно, что увеличение слоев от одного до трех увеличивает длину волны примерно на 100 nm вблизи 1.55 μm, причем с меньшей толщиной барьеров достигается большая длина волны ~ 1.66 μm.

На рис. 2 показана зависимость изменения длины волны при изменении средней толщины ям СР. Видно, что только изменением толщин ям СР возможно управление длиной волны в интересующем диапазоне (1.5–1.6 μm), и длина волны увеличивается для больших толщин КЯ, что соответствует уменьшению потенциального барьера в СР.

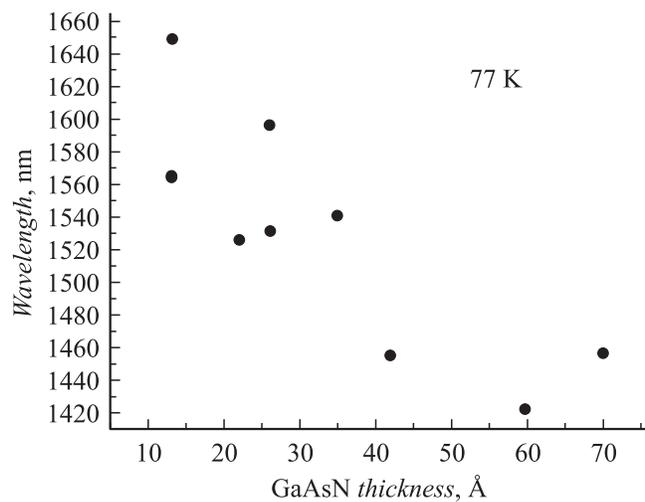
На рис. 3 показано воздействие изменения толщины барьеров СР на длину волны излучения при 77 К (при 300 К (RT) зависимость аналогичная, но с большим разбросом). Видно, что большая длина волны ~ 1.66 μm достигается при наименьших барьерах, что согласуется и с рис. 1. Влияние толщин барьеров GaAsN в сверхрешетках (и об-



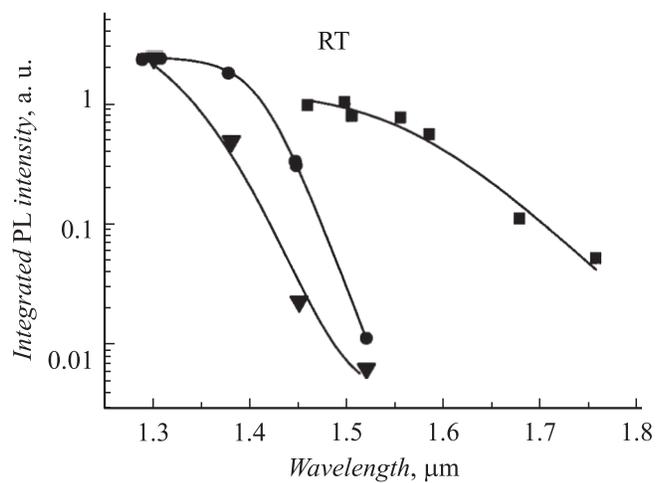
**Рис. 2.** Зависимость длины волны излучения от толщины ям InGaAsN напряженно-компенсированной сверхрешетки.

ших напряжений) на оптические свойства при неизменной толщине ям  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  СР, равной 1.0 nm (центральная яма не менялась: толщина  $\sim 6.2$  nm, одна вставка InAs), следующее. Общая тенденция при увеличении толщин барьеров  $\text{GaAsN}_{0.04}$  от 1.0 до 7.0 nm — это увеличение интенсивности ФЛ (до уровня лучших образцов) и уменьшение полуширины линии ФЛ в 1.5 раза (от 85 до 50 meV при 300 K) при уменьшении длины волны (от 1.65 до 1.42  $\mu\text{m}$ ). Общие напряжения в структурах менялись от положительных (+1.0%) до отрицательных (−0.2%). Наименьшая полуширина линии ФЛ ( $\sim 50$  meV при 300 K) наблюдалась у образцов с отрицательным напряжением, равным −0.2%.

На рис. 4 показана относительная интегральная интенсивность ФЛ структур в зависимости от длины волны для всего набора изучавшихся образцов. Образцы с квантовыми ямами и квантовыми точками без сверхрешеток демонстрируют хорошую интенсивность ФЛ вблизи 1.3  $\mu\text{m}$ , превышая в 3–4 раза реперную. При этом полуширины линий ФЛ достигали  $\sim 40$  meV при комнатной температуре. Подробное исследование ФЛ было приведено в работе [14]. Однако при увеличении



**Рис. 3.** Зависимость длины волны излучения от толщины барьеров GaAsN напряженно-компенсированной сверхрешетки.



**Рис. 4.** Зависимости интегральной интенсивности от длины волны излучения для трех типов гетероструктур: InAs/InGaAsN КТ (треугольники), InGaAsN/GaAs КЯ (круги) и InAs/InGaAsN/GaAsN слоев с компенсацией напряжений (квадраты).

длины волны выше  $1.4\ \mu\text{m}$  происходит резкое падение интенсивности (более чем на два порядка). Это делает проблематичным достижение низкопороговых лазеров на  $1.55\ \mu\text{m}$  с помощью таких структур. Для образцов же с напряженно-компенсированными сверхрешетками для длин волн  $1.45\text{--}1.60\ \mu\text{m}$  все интенсивности находятся на уровне  $1.0\text{--}0.7$  от реперного. Видно, что при использовании НКСП при увеличении длины волны выше  $1.4\ \mu\text{m}$  не происходит заметного снижения интенсивности ФЛ, как в случае использования только квантовых точек или квантовых ям без сверхрешеток.

Исследованы излучательные свойства гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN с напряженно-компенсированными сверхрешетками GaAsN/InGaAsN, предназначенных для активных областей светоизлучающих (лазерных) структур в телекоммуникационной области длин волн  $1.3\text{--}1.6\ \mu\text{m}$ . Показано, что использование таких сверхрешеток и дополнительных вставок InAs улучшает излучательные свойства структур и позволяет достичь длины волны  $\sim 1.76\ \mu\text{m}$  — наибольшей известной для азотсодержащих соединений на GaAs, без заметного ухудшения излучательной эффективности, типичного для структур без сверхрешеток. Лучшие образцы показывали интегральную интенсивность ФЛ при комнатной температуре, в 3.5 раза превышающую ФЛ лучших реперных, и полуширины на уровне  $40\text{--}50\ \text{meV}$ .

Примененный метод использования сверхрешеток с компенсацией напряжений и новый дизайн структур позволяют изменять длину волны фотолюминесценции в диапазоне  $1.3\text{--}1.76\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре и показывают возможности для улучшения характеристик лазеров на подложках арсенида галлия с длиной волны излучения  $\sim 1.55\ \mu\text{m}$ .

Работа была выполнена при поддержке фонда РФФИ в рамках проекта РФФИ № 06-02-16958.

## Список литературы

- [1] Устинов В.М., Егоров А.Ю., Мамутин В.В., Ковш А.Р., Одноблюдов В.А., Лившиц Д.А., Крыжановская Н.В., Семенова Е.С., Никитина Е.В., Шерняков Ю.М., Максимов М.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. С. 15.
- [2] Chow W.W., Harris J.S. // Jr. Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1673.
- [3] Kondow M., Uomi R., Niwa A. et al. // Jpn. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 1273.
- [4] Hugues H., Damilano B., Duboz J.-Y., Massies J. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 091111.

- [5] *Y Liu H., Hopkinson H., Navaretti P., Gutierrez M., Hg J.S., David J.P.R.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 4951.
- [6] *Soshnikov I.P., Egorov A.Yu., Mamutin V.V.* et al. // Semiconductors. 2004. V. 38. P. 340.
- [7] *Егоров А.Ю., Мамутин В.В., Устинов В.М.* Патент РФ № 2257640. Заявка № 2004113171, приоритет от 28.04.2004.
- [8] *Odnoblyudov V.A., Egorov A.Yu., Mamutin V.V., Kovsh A.R., Nikitina E.V., Shernyakov Yu.M., Maksimov M.V., Ustinov V.M.* // Tech. Phys. Lett. 2003. V. 29. P. 433.
- [9] *Mamutin V.V., Bondarenko O.V., Egorov A.Yu., Kryzhanovskaya N.V., Shernyakov Yu.M., Ustinov V.M.* // Technical Physics Lett. 2006. V. 32. P. 229.
- [10] *Anderson T.G., Chen Z.G., Kulakovskii V.D., Uddin A., Vallin J.T.* // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. P. 752.
- [11] *Moy A.M., Chen A.C., Cheng K.Y., Chou L.J., Hsieh K.C.* // J. Cr. Growth. 1997. V. 175/176. P. 812.
- [12] *Kudrawiec R.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 023522.
- [13] *Mamutin V.V., Bondarenko O.V., Egorov A.Yu., Kryzhanovskaya N.V., Vasil'ev A.P., Gladyshev A.G., Mikhrin V.S., Ustinov V.M.* // Technical Physics Lett. 2007. V. 33. P. 384.
- [14] *Kryzhanovskaya N.V., Egorov A.Yu., Mamutin V.V., Polyakov N.K., Tsa-tsul'nikov A.F., Kovsh R.V., Ledentsov N.N., Ustinov V.M. Bimberg D.* // Semiconductors. 2005. V. 39. P. 703.