

06;07

## Излучательные свойства гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN с компенсацией напряжений в диапазоне 1.3–1.55 $\mu\text{m}$

© В.В. Мамутин, О.В. Бондаренко, А.Ю. Егоров,  
Н.В. Крыжановская, Ю.М. Шерняков, В.М. Устинов

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

Поступило в Редакцию 16 декабря 2005 г.

Проведены исследования излучательных свойств гетероструктур, предназначенных для активных областей лазеров на диапазон 1.3–1.55  $\mu\text{m}$ , состоящих из квантовых ям (КЯ) InAs/InGaAsN, помещенных в сверхрешетки GaAsN/InGaAsN с компенсацией напряжений (strain-compensated). Показано, что использование таких сверхрешеток, а также дополнительных монослойных вставок InAs позволяет существенно изменять длину волны излучения квантовых ям InGaAsN в диапазоне 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре. Продемонстрирована лазерная генерация таких структур при 85 К с длиной волны, соответствующей  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  при комнатной температуре.

PACS: 42.55.Px

**Введение.** Интерес к исследованию четверных соединений InGaAsN вызван их уникальными физическими свойствами и возможностью создания излучателей на базе подложек GaAs в телекоммуникационной области длин волн 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  [1–3], как весомой альтернативы системе InGaAsP/InP [4]. Однако использование достаточно больших концентраций азота ( $\geq 3\%$ ) и индия ( $\geq 35\%$ ) в InGaAsN квантовых ямах (КЯ) активной области приводит к ухудшению характеристик таких лазеров за счет образования неоднородностей состава по индию и азоту. Для уменьшения мольной доли азота и индия в КЯ были предложены различные дизайны структур и активных областей с использованием дополнительных слоев, например GaAsN [2], в которых помещается рабочая КЯ InGaAsN. Использовались также напряженные КЯ для достижений длины волны 1.3  $\mu\text{m}$  [3]. Недавно была предложена оригинальная методика изменения длины волны излучения в области

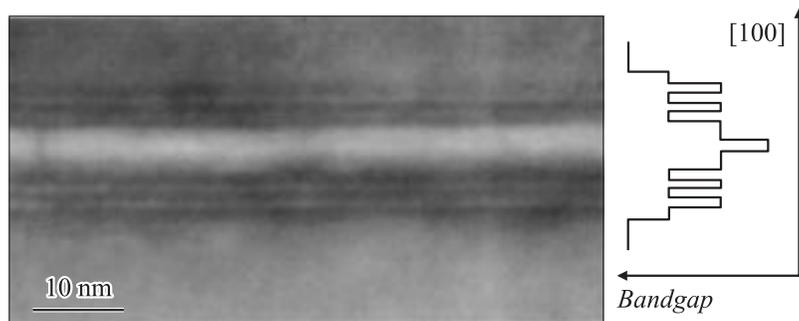
от 1.2 до 1.6  $\mu\text{m}$  с использованием напряженно-компенсированных сверхрешеток GaAsN/InGaAsN [5].

В данной работе представлены результаты исследования излучательных свойств квантовых ям InGaAsN и таких же КЯ с монослойными вставками InAs, помещенных в сверхрешетки GaAsN/InGaAsN с компенсацией напряжений, а также полученных на их основе лазерных гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN, излучающих в области  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  при комнатной температуре.

**Эксперимент.** Исследованные структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) ЭП-1203 на подложках GaAs (001) с плазменным источником азота с радиочастотным разрядом (Applied Epi UNI-bulb RF Plasma Source). Температуры подложки при росте азотсодержащих слоев находились в области 350–360°С. Планарность и качество слоев во время роста контролировались системой дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Подробнее методика выращивания описана в [6]. 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 ( $W = 1500 \text{ W/cm}^2$ ,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ). Детектирование сигнала производилось с помощью монохроматора и охлаждаемого германиевого фотодиода. Микрофотографии просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) получены на микроскопе Phillips EM 420.

Для уменьшения эффектов, связанных с присутствием атомов азота в слое, и улучшения оптических свойств структуры между барьерами GaAs и активной КЯ InGaAsN вставлялись напряженно-компенсированные сверхрешетки GaAsN/InGaAsN, уменьшающие напряжения и среднюю концентрацию азота. Для увеличения длины волны излучения до 1.5  $\mu\text{m}$  в активную КЯ добавлялись тонкие (порядка одного монослоя) вставки InAs.

**Результаты и обсуждение.** Для исследования излучательных свойств выращивались структуры с InGaAsN КЯ, толщиной  $6.2 \pm 0.5 \text{ nm}$ , не превышавшей критическую для данного состава по индию толщину, составляющую  $\sim 7 \text{ nm}$  [7]. Вследствие существования зоны несмешиваемости, из-за большого различия размеров атомов азота и индия, с увеличением мольной доли  $N$  происходит фазовый распад твердого раствора InGaAsN с образованием  $N$ -обогащенных нановключений и корругированием поверхности. Для подавления этих эффектов, усиливающихся при увеличении концентрации  $N$ , в молекулярно-пучковой эпитаксии осаждение азотсодержащих слоев проводится при

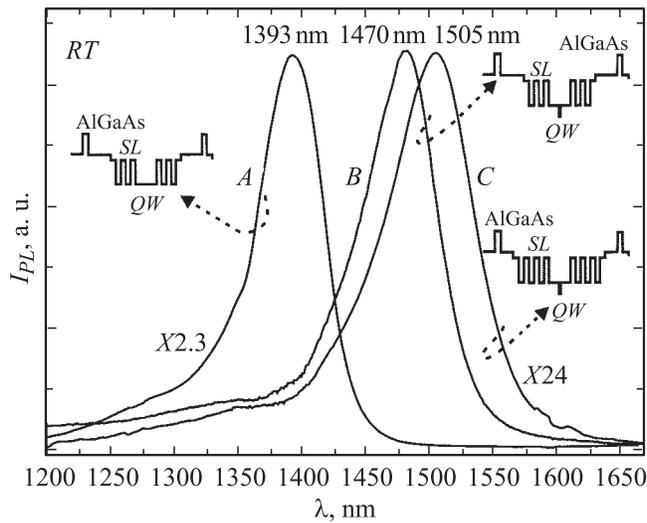


**Рис. 1.** Поперечное сечение активной области структуры для образца с содержанием индия в квантовой яме  $x \sim 38\%$ , полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

пониженной температуре подложки. В данном случае для осаждения КЯ температура подложки опускалась до  $\sim 350^\circ\text{C}$ . Остальная часть структуры выращивалась при  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Квантовые ямы осаждались в середину волноводного слоя GaAs, ограниченного со стороны подложки и поверхности барьерами AlGaAs. После осаждения слоя AlGaAs проводился отжиг структуры в течение  $\sim 5\text{ min}$  в потоке мышьяка при температуре около  $700^\circ\text{C}$ . Затем выращивались аналогичные структуры с такими же КЯ, но вставленными между сверхрешетками GaAsN/InGaAsN. Такой подход позволяет существенно понизить концентрацию азота (и индия в активной области структуры, необходимую для достижения длины волны излучения  $\sim 1.5\ \mu\text{m}$ , что в „обычных“ КЯ достигается только при большом содержании азота ( $\geq 4\%$ ) и значительном (в сотни раз) снижении интенсивности люминесценции [8].

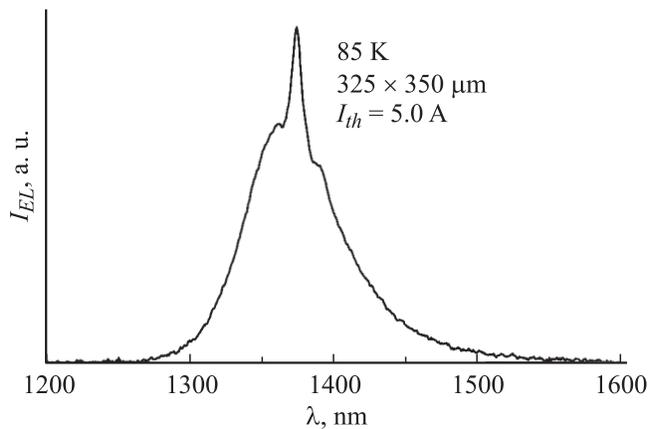
На рис. 1 приведено изображение поперечного сечения активной области такой структуры с компенсацией напряжений для образца с содержанием индия в квантовой яме InGaAsN  $x \sim 38\%$ , полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). На вставке к рисунку схематически показан профиль ширины запрещенной зоны слоев в направлении роста [001]. На ПЭМ-изображении отчетливо видна высокая планарность всех интерфейсов, подтверждая данные, полученные из картин ДБЭ, соответствовавших планарному двумерному росту.

Тестовые структуры состояли из одной КЯ  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$ , помещенной в матрицу GaAs без сверхрешетки. Они давали линию



**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции ГС InAs/InGaAsN/GaAsN различного дизайна (вставки) при комнатной температуре.

ФЛ с максимумом на длине волны  $1.3\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре [8]. После этого выращивалась структура *A*, в которой КЯ помещалась в сверхрешетку, вставленную в GaAs и состоящую из последовательности слоев  $\text{GaAsN}_{0.04}/\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  (рис. 2). Толщины слоев варьировались в этих структурах в пределах  $1\text{--}2\ \text{nm}$ . Максимум люминесценции по сравнению с ямой без сверхрешетки (в GaAs) сдвигался на  $\sim 1.4\ \mu\text{m}$ . В структурах *B* и *C*, созданных на базе структуры *A*, в середину  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  КЯ дополнительно осаждали слой InAs толщиной порядка одного монослоя. При этом картина ДБЭ соответствовала двумерному росту без срыва в трехмерный рост с образованием квантовых точек. Максимум ФЛ сдвигался еще больше в длинноволновую сторону — до  $1.5\ \mu\text{m}$  (рис. 2). Очевидно, что это связано с понижением потенциальных барьеров и общим изменением напряжений в центральной излучающей части структуры, внесенных сверхрешетками, помещенными между активной ямой и барьерами. При этом важно, что увеличение эффективной толщины сверхрешетки приводит к сдвигу максимума ФЛ в длинноволновую область до  $1.5\ \mu\text{m}$  без значительного падения интенсивности ФЛ. Схематические диаграммы



**Рис. 3.** Спектр электролюминесценции лазерной структуры с активной областью InAs/InGaAsN/GaAsN при 85 К.

дна зоны проводимости исследованных структур приведены на вставках рис. 2, где показаны также спектры ФЛ таких структур при комнатной температуре. Подробное исследование ФЛ проведено в работе [8]. В наших структурах варьировались толщины и количество слоев при сохранении параметров центральной ямы и составов слоев сверхрешеток. Рассогласование параметров решеток слоев  $\text{GaAsN}_{0.4}$  и  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.26}$  с GaAs составляет соответственно  $-0.8\%$  и  $+2.14\%$  [9], что отвечает определению напряженно-компенсированных (strain-compensated) сверхрешеток, состоящих из слоев с разными знаками напряжений относительно подложки [10].

Лазерные структуры изготавливались с активными областями InAs/InGaAsN/GaAsN (аналогичными рис. 2, структуры B и C) и содержали AlGaAs эмиттеры толщиной  $1.5\ \mu\text{m}$  и GaAs волновод толщиной  $0.5\ \mu\text{m}$ .

На рис. 3 показан спектр электролюминесценции одной из таких структур с четырьмя сколотыми гранями (неоптимизированная, с напряжением отсечки  $\sim 1\ \text{V}$ ) при температуре 85 К с длиной волны, соответствующей по температурному сдвигу запрещенной зоны длине волны  $\lambda \sim 1.5\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре.

**Заключение.** Исследованы излучательные свойства гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN с напряженно-компенсированными сверхрешет-

ками, предназначенных для активных областей лазерных структур на спектральный диапазон 1.3–1.55  $\mu\text{m}$ . Показано, что использование таких сверхрешеток и дополнительных вставок InAs улучшает излучательные свойства структур и позволяет достичь длины волны  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  с меньшими средними концентрациями азота в структуре. Продемонстрирована лазерная генерация таких структур с длиной волны, соответствующей 1.5  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре.

Примененный метод выращивания и новый дизайн структуры позволяют не только изменять длину волны излучения квантовых ям InGaAsN в диапазоне 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре, но и дают возможность улучшения характеристик лазерных структур за счет снижения концентрации азота при использовании таких структур на подложках арсенида галлия.

Работа выполнена при поддержке фонда CRDF, в рамках проекта #RUE1-5036-ST-04.

## Список литературы

- [1] *Harris J.S.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2002. V. 17. P. 880.
- [2] *Borchert B., Egorov A.Yu., Illek S., Komanda M., Riechert H.* // *El. Lett.* 1999. V. 35. P. 2204.
- [3] *Chow W.W., Harris J.S.* // *Jr. Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 1673. *O'Reilly P., Adams R.* // *IEEE-QE.* 1998. V. 30. P. 366.
- [4] *Kondow M., Uomi K., Niwa A., Kitani T., Watahiki S., Yazawa Y.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1996. Part 1. V. 35. P. 1273.
- [5] *Егоров А.Ю., Мамутин В.В., Устинов В.М.* Патент РФ № 2257640. Заявка № 2004113171, приоритет от 28.04.2004.
- [6] *Odnoblyudov V.A., Egorov A.Yu., Kryzhanovskaya N.V., Gladyshev A.G., Mamutin V.V., Tsatsul'nikov A.F., Ustinov V.M.* // *Technical Physics Lett.* 2002. V. 28. P. 964.
- [7] *Anderson T.G., Chen Z.G., Kulakovskii V.D., Uddin A., Vallin J.T.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. P. 752.
- [8] *Kryzhanovskaya N.V., Egorov A.Yu., Mamutin V.V., Polyakov N.K., Tsasul'nikov A.F., Kovsh R.V., Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Bimberg D.* // *Semiconductors.* 2005. V. 39. P. 703.
- [9] *Spruytte S.G., Larson M.C., Wampler W., Colden C.W., Peterson H.E., Harris J.S.* // *J. Cryst. Growth.* 2001. V. 227–228. P. 506.
- [10] *Bian L.F., Jiang D.S., Lu S.L., Huang J.S., Chang K., Li L.H., Harmand J.C.* // *J. Cr. Gr.* 2003. V. 250. P. 339.