

06

## Исследование оптических свойств сверхрешеток InAs/InGaAsN/GaAsN с компенсацией напряжений

© В.В. Мамутин, О.В. Бондаренко, А.П. Васильев, А.Г. Гладышев,  
А.Ю. Егоров, Н.В. Крыжановская, В.С. Михрин, В.М. Устинов

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

Поступило в Редакцию 21 ноября 2006 г.

Проведены исследования оптических свойств гетероструктур, состоящих из квантовых ям (КЯ) InAs/InGaAsN, помещенных в сверхрешетки GaAsN/InGaAsN с компенсацией напряжений (strain-compensated). Показано, что использование таких сверхрешеток с различным дизайном и толщинами слоев, а также дополнительных монослойных вставок InAs позволяет изменять длину волны излучения квантовых ям InGaAsN в диапазоне 1.3–1.6  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре без ухудшения излучательных характеристик, что открывает дополнительные перспективы создания лазеров в телекоммуникационной области длин волн на подложках арсенида галлия.

PACS: 73.21.Cd, 73.21.Fg, 73.40.Kp, 78.68.De, 78.67.Pt.

**Введение.** Исследование свойств сверхрешеток (СР) на основе азотосодержащих соединений GaAsN/InGaAsN вызвано их уникальными физическими свойствами и возможностью создания лазеров на подложках GaAs в телекоммуникационной области длин волн 1.3–1.55  $\mu\text{m}$  [1–3] в качестве альтернативы системе InGaAsP на подложках InP [4]. Однако использование сравнительно больших концентраций азота ( $\geq 3\%$ ) и индия ( $\geq 35\%$ ), необходимых для достижения требуемой длины волны излучения (до 1.55  $\mu\text{m}$ ) [5] в активной области лазеров, приводит к ухудшению лазерных характеристик за счет образования неоднородностей состава по индию и азоту. Увеличение концентрации азота вызывает и такой нежелательный эффект, как усиление сегрегации индия [6], поэтому в приборных структурах желательнее снижение средней концентрации азота при сохранении нужной длины волны.

Для уменьшения мольной доли азота в квантовых ямах (КЯ) активных областей предлагались различные дизайны структур с дополнительными слоями, например GaAsN [2], в которых помещается рабочая КЯ InGaAsN. Использовались также напряженные КЯ для достижения 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 [7].

В данной работе представлены исследования излучательных свойств напряженно-компенсированных (strain-compensated) сверхрешеток, состоящих из слоев GaAsN/InGaAsN с разными знаками напряжений относительно подложки GaAs, различного дизайна, с КЯ InGaAsN, излучающими в области  $1.4\text{--}1.6\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре.

**Эксперимент.** Исследованные структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на установке 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  $350\text{--}370^\circ\text{C}$ . В данном случае для осаждения активной области со СР и КЯ температура подложки опускалась до  $\sim 350^\circ\text{C}$ . Остальная часть структуры выращивалась при  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . 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  $\sim 5\ \text{min}$  в потоке мышьяка при температуре около  $700^\circ\text{C}$ . Подробнее методика выращивания описана в [8].

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 ( $W = 1500\ \text{W/cm}^2$ ,  $\lambda = 532\ \text{nm}$ ). 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, и улучшения оптических свойств структуры между барьерами GaAs и активной КЯ InGaAsN вставлялись с двух сторон сверхрешетки

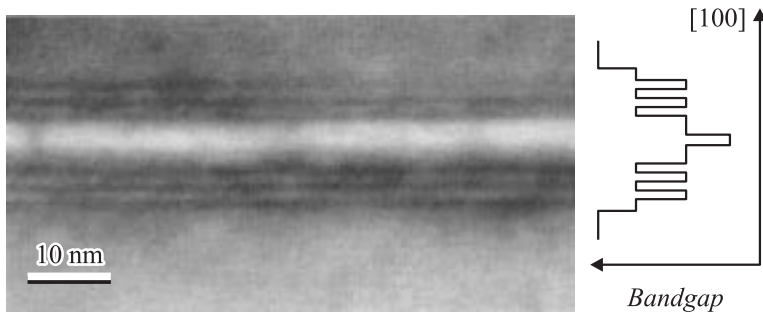
GaAsN/InGaAsN, уменьшающие напряжения и среднюю концентрацию азота во всей активной области. Для увеличения длины волны излучения до  $\sim 1.6 \mu\text{m}$  в активную КЯ добавлялись тонкие (порядка одного монослоя) вставки InAs, приводившие ранее к увеличению длины волны в матрице GaAs [9].

**Результаты и обсуждение.** Исследовались симметричные 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 превышавшей 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  $y \sim 4\%$ , и индия  $x \sim 38\%$ , и азота  $y \sim 2.6\%$  в InGaAsN. 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]. Рассогласование параметров решеток слоев  $\text{GaAsN}_{0.4}$  и  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  с GaAs составляет соответственно  $-0.8\%$  и  $+2.14\%$  [2], что отвечает определению напряженно-компенсированных (strain-compensated) сверхрешеток, состоящих из слоев с разными знаками напряжений относительно подложки [8].

Такой подход позволяет существенно понизить концентрацию азота в активной области структуры, необходимую для достижения длины волны излучения  $\sim 1.55 \mu\text{m}$  и больше, что в „обычных“ КЯ достигается только при большом содержании азота ( $\geq 4\%$ ) и значительном (в сотни раз) снижении интенсивности фотолюминесценции [5,12].

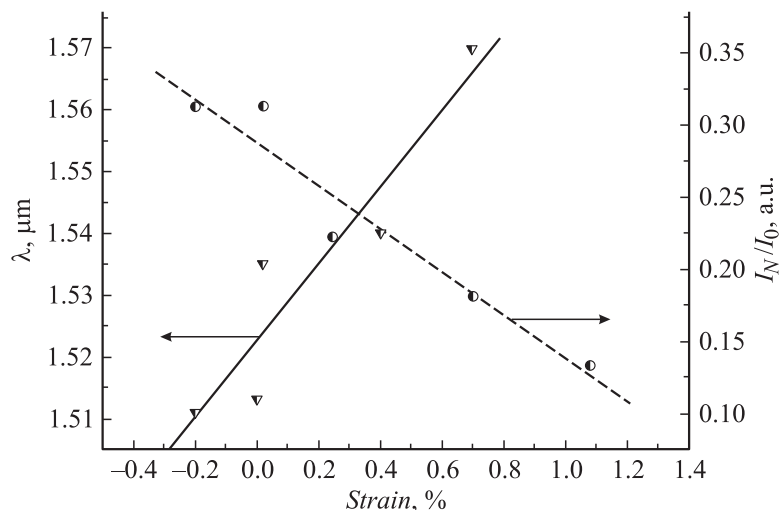
Фотография поперечного сечения стандартной („базовой“) сверхрешетки с излучением на  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ , на основе которой выращивались последующие СР, полученная с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), показана на рис. 1. Толщины слоев GaAsN/InGaAsN составляли 1.3/1.0 nm. На вставке показан профиль ширины запрещенной зоны слоев в направлении роста [001]. На ПЭМ-изображении отчетливо видна высокая планарность всех интерфейсов, подтверждающая данные, полученные из картин ДБЭ, соответствовавших планарному двумерному росту.

Тестовые структуры, состоящие из одной КЯ  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$ , помещенной в матрицу GaAs без сверхрешетки и без вставки InAs, давали линию ФЛ с максимумом на длине волны  $1.3 \mu\text{m}$  при комнатной температуре [12]. Когда выращивалась структура, в которой КЯ помещалась в сверхрешетку, вставленную в GaAs и состоящую



**Рис. 1.** Поперечное сечение активной области структуры для образца с базовой сверхрешеткой, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

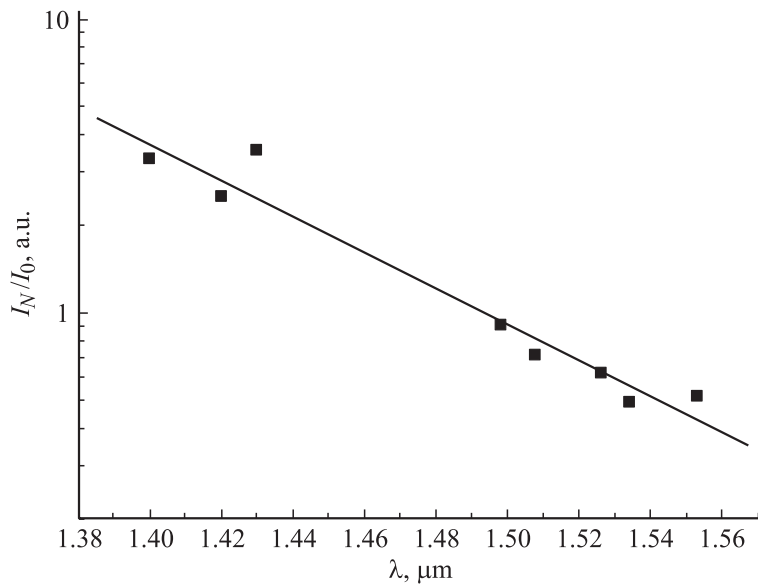
из последовательности слоев  $\text{GaAsN}_{0.04}/\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$ , это приводило к увеличению длины волны до  $\sim 1.4 \mu\text{m}$ . В структурах, в которых в середину  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  КЯ дополнительно осаждали слой  $\text{InAs}$  толщиной порядка одного монослоя („базовая“ в данной работе), максимум ФЛ сдвигался еще больше в длинноволновую сторону — до  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  [8]. В данной работе проводилось выращивание несколько типов структур с различным набором толщин ( $0.5\text{--}0.7 \text{ nm}$ ) и количества слоев ( $10\text{--}30$ ) в сверхрешетках, дающих напряжения разных знаков и величин, что обеспечивало изменение длины волны в пределах  $1.4\text{--}1.6 \mu\text{m}$ . Составы слоев сохранялись постоянными, как и потоки в процессе МПЭ. В некоторых структурах вместо одной вставки  $\text{InAs}$  использовались три — в центре и по краям активной КЯ, что давало увеличение длины волны излучения еще на  $20\text{--}30 \text{ nm}$ . Исследовалась фотолюминесценция таких структур в зависимости от дизайна, и интенсивность ФЛ сравнивалась с лучшим образцом из всех предыдущих, выращенных нами в тех же условиях, с длиной волны  $\sim 1.5 \mu\text{m}$  („реперным“ (reference), с интенсивностью  $I_0$ ). В каждой серии образцов после калибровки потоков сначала выращивалась базовая структура (рис. 1), и дальнейшие измерения сравнивались с ее параметрами, что исключало неконтролируемые приводящие факторы при росте. На рис. 2 показано изменение длины волны и интенсивности ФЛ ( $I_N$ ) относительно самого яркого образца ( $I_0$ ) в зависимости от общего напряжения в структуре в узком диапазоне длин волн  $1.50\text{--}1.57 \mu\text{m}$  (прямые — линейная



**Рис. 2.** Зависимость длины волны излучения и относительной интенсивности ФЛ от общего напряжения в структуре.

аппроксимация). Интегральная интенсивность не сильно отличается от реперного образца, особенно для нулевых и отрицательных напряжений. При изменении толщин только ям  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.026}$  относительно базовой структуры при неизменных барьерах  $\text{GaAsN}_{0.04}$  (1.3 nm) по направлению к центральной КЯ (1.0, 1.5, 2.0 nm) происходило заметное (в 2 раза) увеличение интенсивности ФЛ до уровня лучших образцов. Отношение интегральной интенсивности составляло  $I_N/I_0 \sim 0.91$  без изменения полуширины линий ФЛ ( $\sim 50\text{--}60\text{ meV}$ ).

На рис. 3 показана относительная интенсивность ФЛ структур в зависимости от длины волны (напряжений) для всего набора образцов, изучавшихся в данной работе. Для образцов вблизи  $1.50\text{--}1.56\ \mu\text{m}$  все интенсивности ФЛ находятся на уровне  $0.5\text{--}0.9$  от реперного, а для длин волн, приближающихся к  $1.3\ \mu\text{m}$  и превышают в 3–4 раза. При этом полуширины (FWHM) линий ФЛ достигали  $\sim 40\text{ meV}$  при комнатной температуре. Это может быть связано и с общим уменьшением доли индия и азота в более коротковолновых структурах (более совершенные твердые растворы, меньше центров безызлучательной рекомбинации) и



**Рис. 3.** Зависимость относительной интенсивности ФЛ от длины волны.

с тем, что реперный образец выбирался с ФЛ на  $1.5 \mu\text{m}$  (при увеличении длины волны в азотосодержащих соединениях падает интенсивность ФЛ). Подробное исследование ФЛ проведено в работе [12].

Отдельно исследовалось влияние толщин барьеров GaAsN в сверхрешетках (и общих напряжений) на оптические свойства при неизменной толщине ям  $\text{In}_{0.38}\text{GaAsN}_{0.26}$ , равной  $1.0 \text{ nm}$  (центральная яма не менялась: толщина  $\sim 6.2 \text{ nm}$ , одна вставка InAs). Общая тенденция при увеличении толщин барьеров GaAsN<sub>0.04</sub> от  $1.0$  до  $7.0 \text{ nm}$  — это увеличение интенсивности ФЛ (до уровня лучших образцов) и уменьшение полуширины линии ФЛ в  $1.5$  раза (от  $85$  до  $55 \text{ meV}$  при  $300 \text{ K}$ ) при некотором уменьшении длины волны (от  $1.58$  до  $1.51 \mu\text{m}$ ). При этом общие напряжения в структурах менялись от положительных ( $+1.0\%$ ) до отрицательных ( $-0.3\%$ ). Наименьшая полуширина линии ФЛ ( $\sim 50 \text{ meV}$  при  $300 \text{ K}$ ) наблюдалась у образцов с отрицательным напряжением, равным  $-0.2\%$ . Более подробно исследования будут опубликованы в другом месте (ФТП).

**Заключение.** Исследованы излучательные свойства гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN с напряженно-компенсированными сверхрешетками GaAsN/InGaAsN, предназначенных для активных областей светоизлучающих (лазерных) структур в спектральном диапазоне 1.3–1.6  $\mu\text{m}$ . Показано, что использование таких сверхрешеток и дополнительных вставок InAs улучшает излучательные свойства структур и позволяет достичь длины волны вплоть до  $\sim 1.6 \mu\text{m}$  с меньшими средними концентрациями азота в структуре. Лучшие образцы показывали интегральную интенсивность ФЛ при комнатной температуре, в 3.5 раза превышающую ФЛ лучших реперных, и полуширины (FWHM) на уровне 40–50 meV.

Примененный метод использования сверхрешеток с компенсацией напряжений и новый дизайн структур позволяют изменять длину волны излучения в диапазоне 1.3–1.6  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре и дают возможность улучшения характеристик лазеров на подложках арсенида галлия.

Работа была выполнена при поддержке фонда РФФИ, в рамках проектов РФФИ 06-02-16958, РФФИ 04-02-16282, а также проекта Минобрнауки РФ „Полупроводниковые наноструктуры — новые физические эффекты и приборы на их основе“.

## Список литературы

- [1] *Soshnikov I.P., Egorov F.Yu., Mamutin V.V., Ledentsov N.N., Kryzhanovskaya N.V., Odnoblyudov V.A., Ustinov V.M. et al. // Semiconductors. 2004. V. 38. P. 354.*
- [2] *Spruytte S.G., Larson M.C., Wampler W., Colden C.W., Peterson H.E., Harris J.S. // Journ. Cryst. Growth. 2001. V. 506. P. 227–228.*
- [3] *Chow W.W., Harris J.S., Jr. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 1673.*
- [4] *Kondow M., Uomi K., Niwa A., Kitatni T., Watahiki S., Yazawa Y. // Jpn. J. Appl. Phys. Part I. 1996. V. 35. P. 1273.*
- [5] *Ishikawa F., Horicke M., Jahn U., Trampert A., Ploog K. // Appl. Phys. Lett. 2006; V. 88. P. 191115; Hugues H., Damilano B., Duboz J.-Y. Massies J. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 091111.*
- [6] *Liu H.F., Xiang N., Chua S.J. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 071905.*
- [7] *Егоров А.Ю., Мамутин В.В., Устинов В.М. Патент РФ № 2257640. Заявка № 2004113171, приоритет от 28.04.2004.*

- [8] *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.
- [9] *Hazdra P., Voves J., Oswald J., Hulcius E., Pangrac J., Simecek T.* // *J. Cr. Growth.* 2003. V. 248. P. 328.
- [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. 812. P. 175–176.
- [12] *Kryzhanovskaya N.V., Egorov A.Yu., Mamutin V.V., Polyakov N.K., Tsatsul'nikov A.F., Kovsh R.V., Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Bimberg D.* // *Semiconductors.* 2005. V. 39. P. 703.