

06;07;12

## Длинноволновое излучение в гетероструктурах с InGaAsN/GaAs квантовыми ямами

© Б.В. Воловик, А.Р. Ковш, W. Passenberg,  
H. Kuenzel, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH, Einsteinufer 37,  
10587 Berlin, Germany

Поступило в Редакцию 18 января 2000 г.

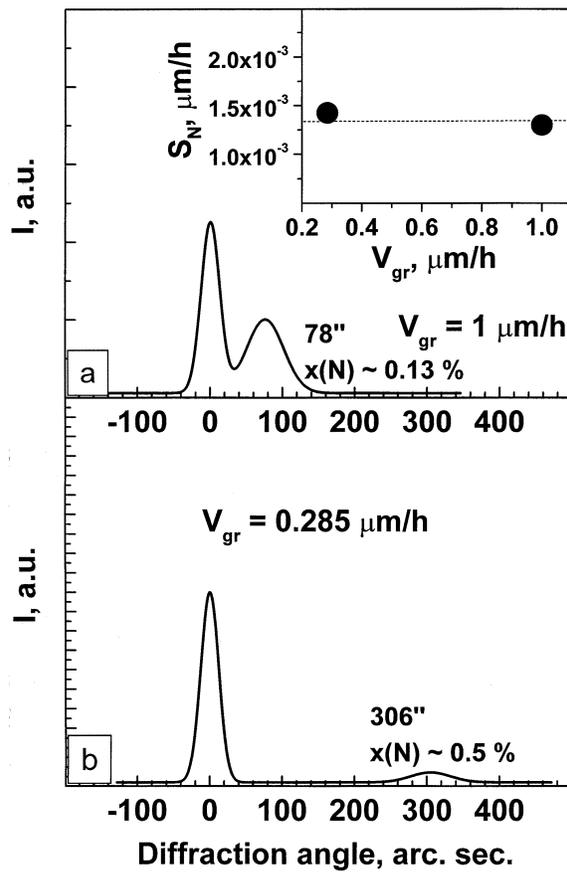
Исследованы свойства гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) InGaAsN/GaAs на подложках GaAs. Получены слои GaAsN и КЯ InGaAsN с высоким (более 1%) содержанием азота. Реализовано длинноволновое излучение в InGaAsN КЯ вплоть до  $1.32 \mu\text{m}$  при комнатной температуре. Исследовано влияние параметров InGaAsN на оптические свойства структур.

Лазеры, излучающие на длине волны около  $1.3 \mu\text{m}$ , являются одними из основных компонент систем оптоволоконной связи. В настоящее время для их изготовления используются гетероструктуры на основе твердых растворов в системах InGaAsP или InGaAlAs на подложках InP. Такие приборы имеют ряд существенных недостатков по сравнению со структурами на подложках GaAs. Во-первых, они имеют низкую температурную стабильность порогового тока вследствие малого разрыва зон в зоне проводимости [1] (типичные значения характеристической температуры около 50–80 К). Кроме того, создание поверхностно-излучающих лазеров затруднено вследствие трудностей получения распределенных брэгговских отражателей (РБО) с высоким коэффициентом отражения, что обусловлено малой разницей показателей преломления составляющих слоев. Таким образом, создание лазеров диапазона  $1.3 \mu\text{m}$  на подложках GaAs является в настоящий момент одной из самых актуальных задач современной микроэлектроники. Наилучшие результаты получены при использовании структур с InGaAs/GaAs квантовыми точками [2,3] и структур InGaAsN/GaAs [4–8]. Было показано, что вследствие большого параметра прогиба (bowing parameter) внедрение азота в (In)GaAs приводит к существенному уменьшению ширины запрещенной зоны.

Кроме того, слой GaAsN/GaAs испытывает напряжение растяжения, а слой InGaAs/GaAs — напряжение сжатия, и, следовательно, внедрение азота компенсирует напряжения в слое InGaAsN/GaAs. Теоретически была предсказана высокая температурная стабильность порогового тока в лазерах на основе InGaAsN, что является следствием большого разрыва в зоне проводимости [4]. Кроме этого, возможно использование AlGaAs/GaAs РБО для создания вертикально излучающих лазеров. На настоящий момент получены лазеры на основе InGaAsN/GaAs квантовых ям, излучающие на длине волны  $1.3 \mu\text{m}$  [5,6]. Для таких лазеров получены низкая пороговая плотность тока и большая ( $2.7 \text{ W}$ ) выходная мощность в непрерывном режиме [6]. Было получено высокое значение характеристической температуры  $T_0$  при длине волны генерации  $1.2 \mu\text{m}$  [7]. Было также сообщено о создании вертикально излучающего лазера с длиной волны  $1.18 \mu\text{m}$  [8].

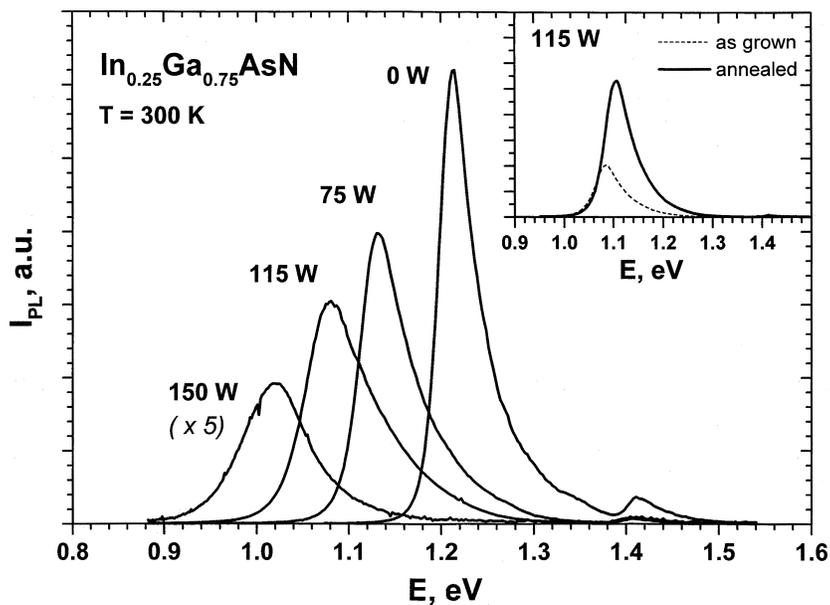
Основной проблемой при создании приборов на основе InGaAsN/GaAs является ухудшение оптического качества структур при увеличении мольной доли азота [9,10]. Для получения эффективного излучения в диапазоне  $1.3 \mu\text{m}$  и создания приборов требуется оптимизация условий роста и параметров структур. В данной работе исследованы свойства структур с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs и показана возможность реализации длинноволнового сдвига линии фотолюминесценции (ФЛ) в область  $1.3 \mu\text{m}$ .

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на полуизолирующих подложках GaAs (100) со стандартными твердотельными источниками элементов третьей группы. Твердотельный источник большого объема с крекинговой зоной использовался для создания потока молекул мышьяка. Поток активных радикалов азота реализовывался путем пропускания газообразного азота через стандартный плазменный источник высокой частоты. Мощность источника варьировалась от 75 до 150 W. Выращивались образцы двух типов: объемные слои GaAsN толщиной  $0.2 \mu\text{m}$ , а также квантовые ямы (КЯ) InGaAsN/GaAs, которые помещались в середину слоя GaAs толщиной  $0.2 \mu\text{m}$ , ограниченного короткопериодными сверхрешетками AlAs/GaAs, для лучшего сбора носителей в КЯ. Рост проводился в стандартных для МПЭ условиях обогащения по мышьяку. Температура роста  $N$ -содержащих слоев равнялась  $500^\circ\text{C}$ . Фотолюминесценция возбуждалась  $\text{Ar}^+$  лазером (длина волны  $514.5 \text{ nm}$ ) и детектировалась охлаждаемым Ge-диодом.



**Рис. 1.** Кривые качания для слоев GaAsN, выращенных при различных скоростях роста. Мощность источника азота равнялась 75 W для обоих образцов. На вставке — зависимость скорости встраивания азота  $S_N$  от скорости роста слоев  $V_{gr}$ .

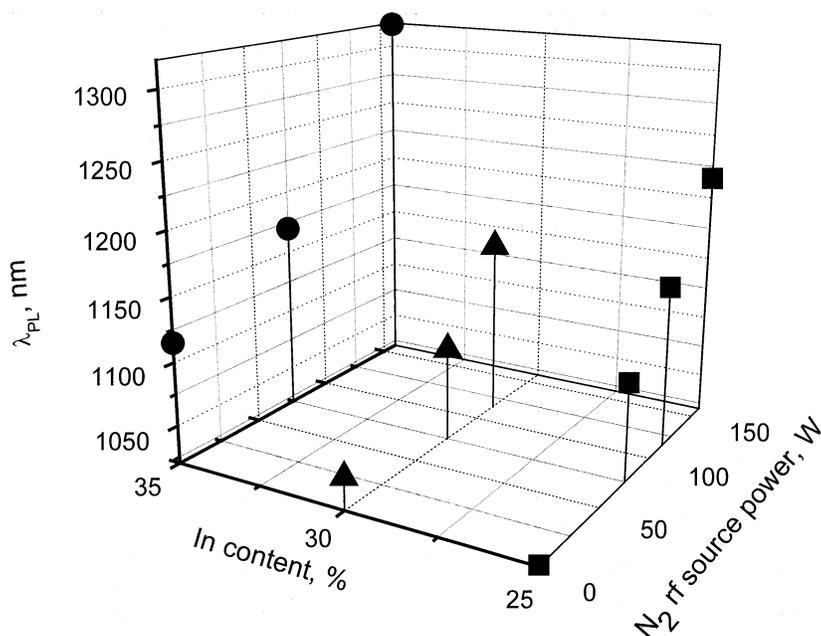
На рис. 1 представлены результаты рентгенодифракционных исследований для слоев GaAsN, выращенных при различных скоростях роста. Мощность плазменного источника поддерживалась равной 75 W для обоих образцов. Для расчета концентрации азота в слое мы ис-



**Рис. 2.** Спектры ФЛ структур с InGaAsN КЯ, выращенных при различной мощности плазменного источника азота (значения мощности источника указаны около спектров). На вставке — спектры ФЛ для структуры, выращенной при мощности источника 115 W, до и после отжига ( $700^{\circ}\text{C}$ , 1 h).

пользовали методику, описанную в работе [11], и значения упругих постоянных, опубликованные в работе [12]. Нами были получены значения концентрации азота для исследованных слоев 0.13 и 0.5% соответственно. Видно, что уменьшение скорости роста приводит к увеличению концентрации азота в слое GaAsN. Более того, скорость встраивания азота  $S_N = V_{gr} \cdot [N]$ , где  $V_{gr}$  — скорость роста,  $[N]$  — мольная доля азота в слое, остается постоянной (см. вставку на рис. 1). Эти данные согласуются с данными работы [13], где также было показано, что скорость встраивания азота практически не зависит от скорости роста.

Мы исследовали свойства структур с InGaAsN КЯ с различным содержанием азота. На рис. 2 показаны спектры ФЛ образцов с



**Рис. 3.** Зависимость положения длины волны максимума линии ФЛ при комнатной температуре от концентрации In в КЯ и от мощности источника азота.

$\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{AsN}$  КЯ, выращенных при различной мощности плазменного источника азота. Видно, что для образца, выращенного при мощности источника 75 W, длинноволновый сдвиг линии ФЛ относительно линии излучения InGaAs КЯ составляет 80 meV. В предположении, что концентрация в КЯ InGaAsN и в слое GaAsN при одинаковой мощности плазменного источника также одинакова, такой сдвиг линии ФЛ соответствует встраиванию  $\sim 0.5\%$  азота. Таким образом, это соответствует линейной аппроксимации зависимости запрещенной зоны InGaAsN от концентрации азота с коэффициентом наклона 160 meV (%), что близко к значениям, опубликованным в работе [14]. Таким образом, используя эту аппроксимацию, мы оцениваем максимальную концентрацию азота в исследованных образцах как  $\sim 1.3\%$ .

Таким образом, нам удалось получить существенное длинноволновое смещение линии ФЛ InGaAs КЯ при внедрении азота в КЯ. Для реализации излучения на длине волны  $1.3\ \mu\text{m}$  были выращены серии образцов с InGaAsN КЯ с различной концентрацией индия и азота. На рис. 3 показана зависимость длины волны излучения ФЛ при комнатной температуре от концентрации индия и азота в КЯ. Видно, что при любой данной концентрации In в КЯ увеличение мощности плазменного источника (и, следовательно, увеличение мольной доли азота в КЯ) приводит к монотонному длинноволновому смещению линии ФЛ. При наибольшей используемой мощности источника азота и концентрации In в КЯ, равной 35%, линия излучения находится при длине волны  $1.32\ \mu\text{m}$ . Отметим, что увеличение мольной доли азота приводит также и к соответствующему падению интенсивности ФЛ при комнатной температуре. Такое поведение ФЛ является типичным для InGaAsN и может быть связано с разрушением поверхности высокоэнергетичными ионами из плазменного источника, а также с увеличением скорости безызлучательной рекомбинации в слоях с высоким содержанием азота [15].

Для увеличения интенсивности излучения в структурах InGaAsN используется постростовой отжиг образцов [15]. Мы также исследовали влияние постростового отжига на интенсивность ФЛ. Отжиг проводился в ростовой камере в потоке As. По нашим данным, отжиг при температуре  $650^\circ\text{C}$  в течение 1 h не приводит к изменению как интенсивности ФЛ, так и длины волны излучения. В то же время отжиг при  $700^\circ\text{C}$  привел к значительному (примерно в 3 раза) увеличению интенсивности ФЛ и к сравнительно небольшому ( $20\text{--}25\ \text{meV}$  для различных структур) коротковолновому сдвигу линии ФЛ (см. вставку на рис. 2). Таким образом, возможно повышение интенсивности ФЛ при использовании постростового отжига, которое необходимо для дальнейшего улучшения параметров лазеров на основе InGaAsN/GaAs структур [6].

В заключение нами были исследованы гетероструктуры (In)GaAsN/GaAs. Получены структуры с InGaAsN КЯ с содержанием азота порядка 1%. Реализовано излучение на длине волны  $1.32\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре. Продемонстрировано увеличение интенсивности ФЛ вследствие постростового отжига структур.

Работа выполнялась при поддержке программы Министерства науки и технологий РФ "Физика твердотельных наноструктур" (грант 99–2034), РФФИ и Nato Science for Peace Program (grant SFP-972484).

## Список литературы

- [1] *Phillips A.F., Sweeney S.J., Adams A.R., Thijs P.J.A.* // IEEE J. of Selected topics in Quantum Electronics. 1999. V. 5. P. 401.
- [2] *Huffaker D.L., Park G., Zou Z., Shchekin O.B., Deppe D.G.* // Appl Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2564.
- [3] *Zhukov A.E., Kovsh A.R., Ustinov V.M., Shernyakov Yu.M. Mikhrin S.S., Maleev N.A., Kondrat'eva E.Yu., Livshits D.A., Maximov M.V., Volovik B.V., Bedarev D.A., Musikhin Yu.G., Ledentsov N.N., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Bimberg D.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1999. V. 11. P. 1345.
- [4] *Kondow M., Uomi K., Niwa A., Kitatani T., Watahiki S., Yazawa Y.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 1273.
- [5] *Nakahara K., Kondow M., Kitatani T., Larson M.C., Uomi K.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1998. V. 10. P. 487.
- [6] *Egorov A.Yu., Bernklau D., Livshits D., Ustinov V., Alferov Zh.I.* // Electron. Lett. 1999. V. 35. P. 1643.
- [7] *Larson M.C., Kondow M., Kitatani T., Nakahara K., Tamura K.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1998. V. 10. P. 188.
- [8] *Kondow M., Nakatsuka S., Kitatani T., Yazawa Y., Okai M.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 5711.
- [9] *Xin H.P., Tu C.W.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 2442.
- [10] *Sato S., Satoh S.* // J. Cryst. Growth. 1998. V. 192. P. 381.
- [11] *Krijn M.P.C.M.* // Semicond. Sci. Technol. 1991. V. 6. P. 27.
- [12] *Kondow M., Uomi K., Niwa A., Kitatani T., Watahiki S., Yazawa Y., Hosomi K., Mozume T.* // Solid-State Electronics. 1997. V. 41. P. 209.
- [13] *Kitatani T., Kondow M., Nakahara K., Larson M.C., Yazawa Y., Okai M., Uomi K.* // J. Cryst. Growth. 1999. V. 201/202. P. 351.
- [14] *Pozina G., Ivanov I., Monemar B., Thordson J.V., Anderson T.G.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 3830.
- [15] *Mars D.E., Babic D.I., Kneko Y., Chang Y.L., Subramanya S., Kruger J., Perlin P., Weber E.R.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1999. V. 17. P. 1272.