

06;07

## Длинноволновая лазерная генерация в структурах на основе квантовых ям InGaAs(N) на подложках GaAs

© В.А. Одноблюдов, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, В.В. Мамутин,  
Е.В. Никитина, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, В.М. Устинов

Физико-технический институт им. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: vovaod@pop.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2002 г.

Проведена оптимизация режимов выращивания методом молекулярно-пучковой эпитаксии лазерных структур на основе квантовых ям InGaAs(N)/GaAs с высоким содержанием индия. Продемонстрирована длинноволновая низкопороговая генерация при комнатной температуре в структурах на основе одиночных квантовых ям InGaAs и InGaAsN. Достигнутые пороговые плотности тока и длина волны генерации составили  $60 \text{ A/cm}^2$  и  $1.085 \mu\text{m}$  и  $350 \text{ A/cm}^2$  и  $1.295 \mu\text{m}$  для лазеров на основе квантовой ямы  $\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$  и  $\text{In}_{0.35}\text{GaAsN}_{0.023}$  соответственно.

**Введение.** В настоящее время усилия многих исследовательских лабораторий направлены на создание лазеров на основе GaAs, работающих в диапазоне длин волн  $1.3 \mu\text{m}$ . Подобные структуры являются альтернативой лазерам на основе системы материалов InGaAsP/InP. Ожидается, что они лягут в основу дешевой элементной базы телекоммуникационных систем, приведя к широкому распространению волоконно-оптической связи в локальных компьютерных сетях. Принципиальным преимуществом структур на основе GaAs перед фосфидиндиевыми аналогами является возможность эпитаксиального выращивания структур для вертикально-излучающих лазеров в одном ростовом цикле.

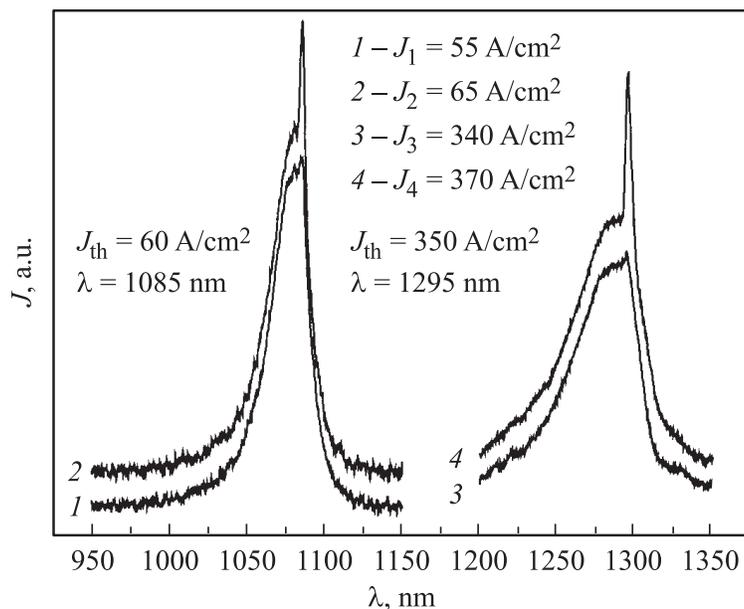
Основными кандидатами для использования в качестве активной области длинноволновых лазеров на основе арсендия галлия являются гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) InGaAsN/GaAs и квантовыми точками (КТ) InAs/InGaAs. Инжекционные лазеры как в полосковой [1–3], так и в вертикально-излучающей геометрии [4,5] на

длине волны  $1.3\ \mu\text{m}$  были успешно реализованы на основе обоих типов гетероструктур.

Однако следует отметить, что прогресс в области роста квантовых ям InGaAsN с длиной волны излучения  $1.3\ \mu\text{m}$  крайне неравномерен, о чем свидетельствует существенный разброс опубликованных лазерных характеристик. Мы связываем данную проблему с тем, что выращивание лазерных структур на основе КЯ InGaAsN затруднено в связи с нетипичными для оптических приборов условиями выращивания. Высокое содержание индия в квантовых ямах приводит к необходимости использования пониженных температур роста с целью подавления эффекта перехода механизма роста от двумерного к островковому. Более того, добавление азота (2–2.5%) приводит к усилению эффектов фазовой сепарации, несмотря на уменьшение рассогласования по параметру решетки между матрицей и квантовой ямой [6]. В итоге для предотвращения фазовой сепарации и поддержания механизма двумерного роста выращивание активной области лазера с длиной волны генерации  $1.3\ \mu\text{m}$  должно проводиться на температурах, не превышающих  $440^\circ\text{C}$ , что практически на  $100$  градусов ниже, чем температура роста „стандартных“ лазерных структур на основе КЯ  $\text{In}_{0.18}\text{GaAs}$  с длиной волны  $980\ \text{nm}$ . Это может приводить к резкому повышению концентрации примесей, внедряющихся в эпитаксиальный слой, и созданию дефектов, что в свою очередь драматически ухудшает оптические и электрические свойства структуры.

В данной работе нами проведены тщательный анализ и оптимизация условий роста и предростовой обработки камеры МПЭ для возможности получения низкопороговых GaAs лазеров с активной областью, выращиваемой на низкой температуре. Это позволило нам продемонстрировать лазеры с рекордными характеристиками. Для лазера на основе КЯ  $\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$  (температура выращивания КЯ  $440^\circ\text{C}$ ) минимальная измеренная пороговая плотность тока составила  $60\ \text{A}/\text{cm}^2$  при длине волны генерации  $1085\ \text{nm}$ . Для лазера на основе КЯ  $\text{In}_{0.35}\text{GaAsN}_{0.023}$  (температура выращивания КЯ  $425^\circ\text{C}$ ) указанные величины составили  $350\ \text{A}/\text{cm}^2$  и  $1295\ \text{nm}$  соответственно.

**Эксперимент.** Структуры выращивались на отечественной установке молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) ЭП-1203, оснащенной плазменным радиочастотным источником азота Epi Unibulb RF Plasma Source и твердотельным источником мышьяка. Температура выращивания активной области лазера на основе КЯ  $\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$  составила  $440^\circ\text{C}$ ,



Спектры электролюминесценции для лазеров, записанные при значениях тока меньше и больше порогового. Спектры 1 и 2 измерены на лазерной структуре с КЯ InGaAs. Спектры 3 и 4 измерены на лазерной структуре с КЯ InGaAsN.

а на основе КЯ In<sub>0.35</sub>GaAsN<sub>0.023</sub> — 425°С. Лазерные структуры содержат Al<sub>0.35</sub>GaAs эмиттеры толщиной 1.5 μm и GaAs волновод толщиной 0.5 μm. Процесс выращивания контролировался методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Пороговая плотность тока измерялась на образцах с четырьмя сколотыми гранями.

**Результаты измерений и их обсуждение.** На рисунке представлены спектры электролюминесценции лазеров с четырьмя сколотыми гранями на основе КЯ InGaAs(N). Спектры записаны при значениях плотности тока ниже пороговой и после наступления лазерной генерации. Спектры 1 и 2 соответствуют лазеру с КЯ In<sub>0.35</sub>GaAs (лазер № 1), а спектры 3 и 4 — лазеру с КЯ In<sub>0.35</sub>GaAsN<sub>0.023</sub> (лазер № 2).

Пороговая плотность тока, достигнутая в лазере № 1 (60 A/cm<sup>2</sup>), близка к лучшим опубликованным [7] результатам, что свидетельствует о практически полном отсутствии безызлучательной рекомбинации в ла-

зерной структуре. Таким образом, нами были подобраны режимы роста, которые позволили уменьшить отрицательный эффект роста активной области на низкой температуре практически до нуля. В частности, уменьшение потока мышьяка на время роста квантовой ямы, вероятно, позволило сократить количество точечных дефектов, образующихся при встраивании As в междоузлия. Данный эффект играет существенную роль при росте на низкой температуре ( $420 - 440^\circ\text{C}$ ), так как в этом случае подавлена миграция атомов III группы по поверхности растущей пленки.

Таким образом, лазер № 1 может служить базой для выращивания азотсодержащего лазера. Добавление 2.3% азота в  $\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$  активную область лазера № 1 должно привести к сдвигу длины волны генерации с 1085 до 1300 nm. Ранее нами было показано, что при определенных режимах работы плазменного источника внедрение в эпитаксиальный слой вплоть до 2% азота не вызывает кардинального ухудшения интенсивности фотолюминесценции в структурах с КЯ [6]. Более высокое значение пороговой плотности тока в лазере на основе  $\text{InGaAsN}$  КЯ мы связываем с еще более низкой температурой роста, а также возможным присутствием примесей в газообразном азоте. Лазер № 2 был выращен аналогично лазеру № 1, за исключением температуры выращивания КЯ  $\text{In}_{0.35}\text{GaAsN}_{0.023}$ . В лазере № 2 она составила  $425^\circ\text{C}$ , так как добавление азота может стимулировать фазовую сепарацию высокосоставной по индию напряженной  $\text{In}_{0.35}\text{GaAs}$  КЯ. Было показано, что постростовой отжиг приводит к улучшению оптических характеристик как  $\text{InGaAs}$  КЯ, выращиваемых при низких температурах, так и соединений с малым содержанием азота [8]. В нашем случае активная область отжигалась во время роста верхнего эмиттера в течение 1.5 h при температуре  $700^\circ\text{C}$ .

Таким образом, на лазере № 2 была достигнута низкая пороговая плотность тока  $350 \text{ A/cm}^2$ . Мы связываем дальнейший прогресс с более существенной очисткой газообразного азота от примесей (кислород, углерод, вода) с использованием других режимов роста плазменного источника, а также с оптимизацией активной области лазеров с использованием различных комбинаций составов In и N в КЯ.

**Заключение.** Таким образом, в данной работе продемонстрирована низкопороговая лазерная генерация на КЯ  $\text{InGaAs}$  и  $\text{InGaAsN}$ , выращенных методом МПЭ при низких температурах. Комплексный подход к решению проблемы низкотемпературного роста (подбор ростовых

условий, использование сверхчистых материалов и т.д.) предлагается в качестве объяснения полученных результатов.

Работа была выполнена при поддержке программы Министерства науки и технологий РФ „Физика твердотельных наноструктур“, РФФИ (проект 02-02-17677) и NATO Science for Peace Program (SfP 972484).

## Список литературы

- [1] *Ustinov V.M., Zhukov A.E.* // *Semicond. Sci. Technol.* 2000. V. 15. R41.
- [2] *Egorov A.Yu. et al.* // *Journal of Crystal Growth.* 2001. V. 227–228. P. 545–552.
- [3] *Kovsh A.R. et al.* // *Electron. Lett.* 2002. V. 38. N 19. P. 1104–1106.
- [4] *Maleev N.A. et al.* *Semiconductors.* 2001. V. 35 (7). P. 847–853.
- [5] *Lott J.A. et al.* // *Electr. Lett.* 2000. V. 36 (5). P. 1384.
- [6] *Kovsh A.R. et al.* // *J. Vac. Sci. Technol. B.* May/June 2002. V. 20. N 3. P. 1158–1162.
- [7] *Chand N. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 58 (20). P. 1704–1706.
- [8] *Kageyama T. et al.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999. Part 2. V. 38. L 298.