

## Исследование приборных характеристик низкопорогового лазера на квантовых точках, излучающего на 1.9 мкм

© А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, В.И. Копчатов, А.В. Лунев, А.Ф. Цацульников, Б.В. Воловик, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 декабря 1997 г. Принята к печати 30 декабря 1997 г.)

Квантовые точки InAs в матрице InGaAs, выращенной на подложке InP методом молекулярно-пучковой эпитаксии, были использованы в качестве активной области инжекционного лазера. Лазерная генерация через состояния квантовых точек наблюдалась в диапазоне температур  $77 \div 200$  К. При наименьшей пороговой плотности тока  $11 \text{ A/cm}^2$  длина волны излучения составила  $1.894 \text{ мкм}$  ( $77 \text{ K}$ ).

Массивы квантовых точек (КТ) перспективны для использования в качестве активной области инжекционного лазера. Для них, в частности, теоретически были предсказаны сверхнизкая пороговая плотность тока и резкое уменьшение ее температурной зависимости [1], а также увеличение удельного усиления [2]. Для инжекционных лазеров на основе КТ, сформированных с помощью эффекта самоорганизации трехмерных островков в сильно напряженной системе материалов  $\text{In(Ga)As/(Al)GaAs}$  [3,4], сообщалось о достижении сверхнизкой пороговой плотности тока ( $60 \text{ A/cm}^2$ ), внутренней квантовой эффективности  $70\%$  [5] и достижения непрерывного режима генерации с выходной мощностью порядка  $1 \text{ Вт}$  [6].

Однако наибольшая длина волны излучения, достигнутая в структурах на основе КТ подобного типа, составляла  $1.3 \text{ мкм}$  [7], что существенно ограничивает возможные применения в таких практически важных областях, как волноводная оптическая связь и контроль загрязнения атмосферы. Ранее нами было показано, что расширить диапазон излучения из КТ вплоть до  $2 \text{ мкм}$  позволяет использование массивов квантовых островков InAs, помещенных в матрицу InGaAs, выращенную на подложке InP [8]. Увеличение длины волны излучения по сравнению с КТ  $\text{(In,Ga)As}$  в матрице GaAs в данном случае обусловлено в первую очередь применением более узкозонной матрицы. В настоящей работе мы сообщаем о создании инжекционного лазера на основе КТ в системе материалов InAs/InGaAs/InP и представляем результаты исследований его оптических и приборных характеристик.

Исследуемая структура была выращена на подложке  $n^+\text{-InP (100)}$  методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Волноводный слой нелегированного InGaAs толщиной  $0.6 \text{ мкм}$  был осажден непосредственно на подложку, которая выполняла роль нижнего эмиттера. Массив КТ InAs был помещен в середину волноводного слоя, ограниченного сверху эмиттерным слоем  $p\text{-InAlAs}$  толщиной  $1.5 \text{ мкм}$ . Структура была завершена контактным слоем  $p^+\text{-InGaAs}$  толщиной  $0.6 \text{ мкм}$ . Эпитаксиальные слои InGaAs и InAlAs были номинально согласованы по параметру решетки с подложкой InP. Температура выращивания всей структуры составляла  $500^\circ\text{C}$ .

Лазерные диоды, схематически показанные на рис. 1, формировали в геометрии с четырьмя сколотыми гранями, что позволяло минимизировать потери на выход излучения. В качестве омических контактов к  $p^+$ -слою использовали сплавы  $\text{Ti/AuZn/Ni/Au}$ , а к  $n^+\text{-InP}$ -подложке  $\text{Au:Te/Ni/Au}$ . Исследования лазерных характеристик проводили при импульсной накачке при частоте  $5 \text{ кГц}$  и длительности импульсов  $3 \text{ мкс}$  в температурном диапазоне  $77 \div 300 \text{ K}$ . Фотолюминесценцию (ФЛ) исследовали на структурах с удаленным верхним контактным слоем, возбуждали полупроводниковым GaAs-AlGaAs-лазером и регистрировали охлажденным фотодиодом InSb. Мощность возбуждения составляла  $30 \text{ Вт/cm}^2$ .

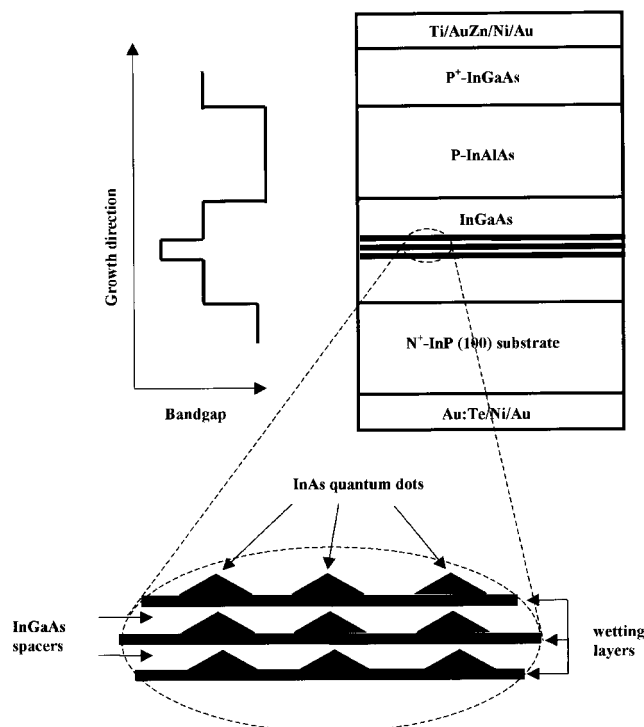
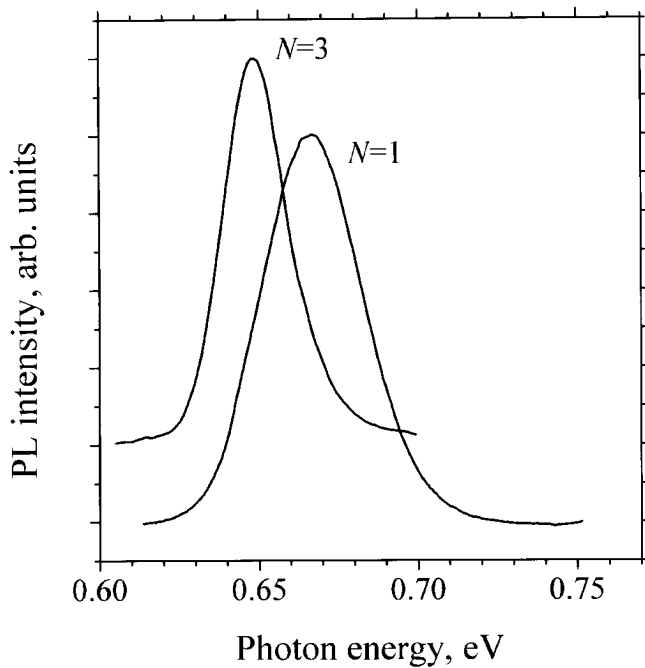


Рис. 1. Схематическое изображение сечения и зонной диаграммы исследуемого лазера на основе квантовых точек InAs в матрице InGaAs. На вставке схематически показано вертикальное совмещение КТ соседних рядов.



**Рис. 2.** Спектры ФЛ структур, полученных однократным ( $N = 1$ ) и трехкратным ( $N = 3$ ) осаждением рядов КТ InAs, разделенных спейсерами InGaAs толщиной 5 нм. Температура измерения 77 К.

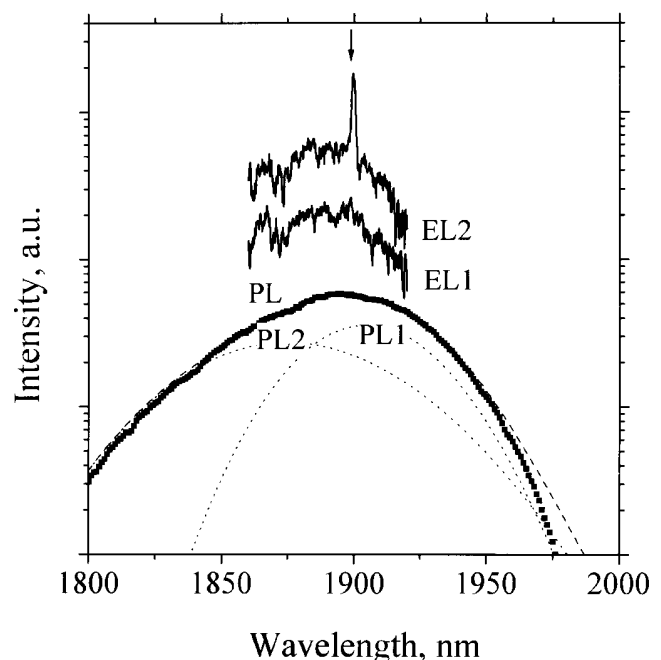
Поскольку число носителей заряда, которые могут участвовать в лазерной генерации, ограничено плотностью КТ, зависимость усиления, достижимого на КТ, от плотности тока накачки должна испытывать насыщение по достижении некоторого значения. Насыщение усиления проявляется в резком сверхлинейном увеличении пороговой плотности тока при увеличении потерь и наблюдалось в некоторых лазерах на основе КТ In(Ga)As в матрице GaAs [9]. Для преодоления насыщения усиления было предложено увеличить плотность КТ с помощью повторного осаждения нескольких рядов КТ [10,11].

Этот же технологический прием был использован в данной работе. Активная область состояла из трех рядов квантовых точек InAs, разделенных спейсерами InGaAs толщиной 5 нм. Переход от двумерного к трехмерному режиму роста наблюдался непосредственно в процессе выращивания по возникновению штриховой картины в дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение после осаждения 3 монослоев (МС) InAs на поверхности InGaAs (100). Эффективная толщина InAs, осажденного в каждом из рядов КТ, составляла 7 МС.

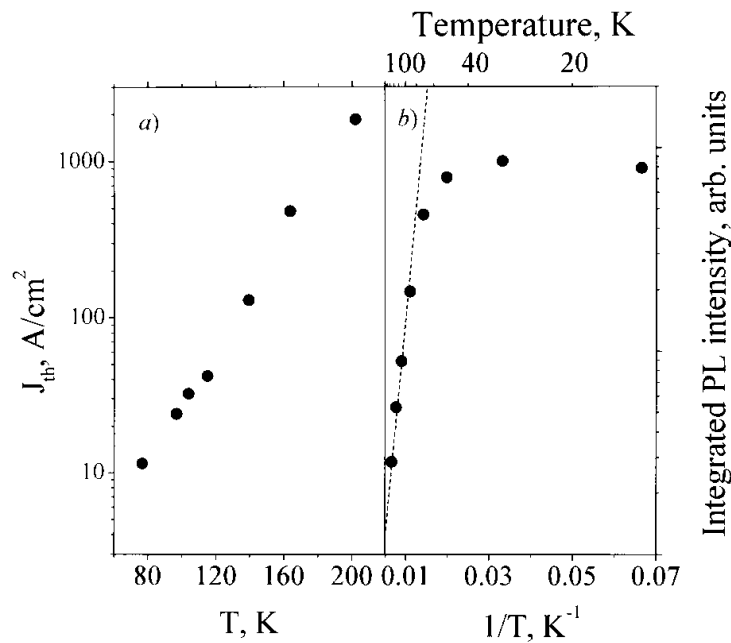
Данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) подтверждают формирование когерентно-напряженных островков InAs в матрице InGaAs, когда эффективная толщина осажденного InAs превосходит  $3 \div 3.3$  МС [8]. Размеры островков, характеризующиеся основанием около 50 нм и высотой порядка  $4 \div 5$  нм, сравнимы с радиусом экситона в этой системе материалов, что должно приводить к размерному квантованию носителей заряда во всех трех направлениях.

Было обнаружено, что при многократном осаждении нескольких рядов КТ, разделенных спейсерами InGaAs толщиной порядка характерной высоты островков (5 нм), островки второго и последующего рядов формируются в точности над островками предыдущего ряда, как схематически показано на вставке к рис. 1. Этот же эффект вертикального совмещения КТ соседних рядов был ранее обнаружен при повторном осаждении КТ InAs в матрицах GaAs или AlGaAs [12] и был объяснен влиянием неоднородных полей напряжения, возникающих в результате формирования первого ряда точек, на темпы поверхностной миграции атомов Ga и In [13]. Мы полагаем, что это объяснение справедливо и в исследуемом случае КТ InAs в матрице InGaAs/InP.

Данные ФЛ показывают, что излучение напряженных островков InAs в матрице (In,Ga)As перекрывает при 77 К диапазон длин волн  $1.65 \div 1.944$  мкм в зависимости от эффективной толщины осажденного InAs, управляющей размерами островков [8]. Однако использование эффекта вертикального совмещения позволяет еще более увеличить длину волны излучения. На рис. 2 приведены спектры ФЛ при 77 К структур, отличающихся количеством ( $N$ ) рядов КТ в активной области. Эффективная толщина InAs, формирующего один ряд КТ, была одинакова в обоих образцах и составляла 7 МС. Как видно из сравнения спектров, трехкратное ( $N = 3$ ) осаждение рядов КТ приводит к заметному (около 20 мэВ) сдвигу максимума линии ФЛ в сторону меньших энергий по



**Рис. 3.** Спектры электро- ( $EL1$ ,  $EL2$ ) и фотолюминесценции ( $PL$ ) лазерной структуры.  $EL1$  и  $EL2$  записаны при пороговой плотности тока  $10.8$  и  $12.5$  А/см<sup>2</sup> соответственно ( $J_{th} = 11.4$  А/см<sup>2</sup>). Стрелкой обозначена линия лазерной генерации. Штриховая кривая показывает математическое моделирование формы линии ФЛ с помощью двух гауссовских кривых  $PL1$  и  $PL2$ .



**Рис. 4.** Зависимость пороговой плотности тока для образца с четырьмя сколотыми гранями ( $290 \times 290$  мкм) (a) и интегральной интенсивности линии ФЛ (b) от температуры. Штриховая линия на рис. b показывает аппроксимацию спада ФЛ экспоненциальной зависимостью с энергией активации 46 мэВ.

сравнению со случаем одиночного массива КТ ( $N = 1$ ). Мы полагаем, что это обусловлено понижением энергии размерного квантования в системе, состоящей из трех вертикально совмещенных КТ, разделенных между собой туннельно-прозрачными барьерами [14].

Линия ФЛ массива КТ, сформированного с помощью эффекта самоорганизации, является неоднородно уширенной, с полной шириной на половине высоты обычно около  $40 \div 80$  мэВ, отражая значительный разброс размеров островков. Как следует из данных рис. 2, вертикальное совмещение КТ сопровождается уменьшением ширины линии ФЛ от 37 мэВ в случае  $N = 1$  до 23 мэВ для  $N = 3$ . Следует отметить, что столь малая ширина линии люминесценции КТ является одним из лучших известных значений и является косвенным свидетельством улучшения однородности размеров КТ в результате вертикального совмещения.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) вблизи порога генерации исследуемой лазерной структуры сравниваются на рис. 3 с данными ФЛ. Возгорание сверхузкой, менее 1 мэВ, линии в спектре ЭЛ свидетельствует о переходе диода в режим лазерной генерации при плотности тока накачки  $J_{th} = 11.4$  А/см<sup>2</sup>. Длина волны лазерной генерации составила 1.894 мкм. Насколько нам известно, эти значения являются наименьшей величиной пороговой плотности тока и наибольшей длиной волны, когда-либо сообщенными для лазеров на основе КТ.

Математическое моделирование формы экспериментального спектра ФЛ позволяет выделить две гауссовские линии  $PL1$  и  $PL2$  (рис. 3). Наиболее длинноволновая из них ( $PL1$ ) связана с рекомбинацией через

основное состояние КТ, тогда как коротковолновая ( $PL2$ ) обусловлена, по-видимому, возбужденным состоянием КТ. Две линии наблюдаются также в спектрах ЭЛ. Важно отметить, что лазерная генерация возникает в непосредственной близости от максимума линии  $PL1$ , указывая на то, что лазерная генерация происходит через основное состояние КТ.

На рис. 4 приведены зависимости  $J_{th}$  и интегральной интенсивности линии ФЛ, обусловленной рекомбинацией в КТ, от температуры. Как видно, исследуемая лазерная структура демонстрирует очень сильную зависимость пороговой плотности тока от температуры, описываемую в терминах характеристической температуры величиной  $T_0$  около 25 К. Одновременно наблюдается резкий спад интенсивности ФЛ, описываемый экспоненциальной зависимостью от обратной температуры с энергией активации 46 мэВ. Наибольшая температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 200 К.

Подобное поведение, хотя и не в столь сильной степени, наблюдалось ранее в лазерах на основе КТ (In,Ga)As в матрице GaAs и, как было доказано, является следствием термического выброса носителей из состояний КТ в матрицу и смачивающий слой [15]. В исследуемой в настоящей работе системе материалов термический выброс должен, по-видимому, быть выражен существенно сильнее вследствие меньшего энергетического разделения между уровнями в КТ и краями зон матрицы. Мы полагаем, что эта проблема может быть частично преодолена применением более широкозонного четверного соединения InGaAlAs в качестве материала матрицы.

Таким образом, продемонстрирована лазерная генерация в структуре на основе квантовых точек InAs в матрице InGaAs, выращенной на подложке InP. Пороговая плотность тока составляет  $11 \text{ A/cm}^2$ , а длины волны излучения  $1.894 \text{ мкм}$  при  $77 \text{ K}$ .

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант 96-02-17824), министерства науки РФ (проект 2-001), программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 97-1090) и программы Copernicus (CP94/01180).

## Список литературы

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40**, 939 (1982).
- [2] M. Asada, Y. Miyamoto, Y. Suematsu. J. Quant Electron., **22**, 1915 (1986).
- [3] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. Le Roux. Appl. Phys. Lett., **47**, 1099 (1985).
- [4] D. Leonard, M. Krishnamurthy, L.M. Reaves, S.P. Den Baars, P.M. Petroff. Appl. Phys. Lett., **63**, 3203 (1993).
- [5] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, N.Yu. Gordeev, S.V. Zaitsev, Yu.M. Shernyakov, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Gosele. J. Cryst. Growth, **175/176**, 689 (1997).
- [6] Ю.М. Шерняков, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, С.В. Зайцев, А.Р. Ковш, И.Л. Крестников, А.В. Лунев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, Чжао Чжень, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Письма ЖТФ, **23**, 51 (1997).
- [7] R.P. Mirin, J.P. Ibbetson, K. Nishi, A.C. Gossard, J.E. Bowers, Appl. Phys. Lett., **67**, 3795 (1995).
- [8] В.М. Устинов, А.Е. Жуков, А.Ф. Цацульников, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, М.В. Максимов, А.А. Суворова, Н.А. Берт, П.С. Копьев. ФТП, **31**, 1256 (1997).
- [9] S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, N. Kirstaedter, D. Bimberg. Superlat. Microstruct., **21**, 559 (1997).
- [10] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, N.N. Ledentsov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, N.A. Bert, A.O. Kosogov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. MRS Symp. Proc. (Pittsburgh, Pennsylvania, 1996) v. 417, p. 141.
- [11] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, N. Kobayashi. Phys. Rev. Lett., **75**, 2542 (1995).
- [12] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Н.А. Берт, А.О. Косоков, Д. Бимберг, Ж.И. Алферов. ФТП, **30**, 1682 (1996).
- [13] Q. Xie, P. Chen, A. Madhukar. Appl. Phys. Lett., **65**, 2051 (1994).
- [14] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоков, А.В. Сахаров, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ж.И. Алферов, J. Bohrer, D. Bimberg. ФТП, **31**, 670 (1997).
- [15] А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, П.С. Копьев, Д. Бимберг, Ж.И. Алферов. ФТП, **31**, 483 (1997).

Редактор В.В. Чалдышев

## Device performance of low-threshold quantum dot laser emitting at $1.9 \text{ }\mu\text{m}$

A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, V.I. Kopchatov, A.V. Lunev, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** InAs quantum dots in an InGaAs matrix grown lattice matched to InP substrate by molecular beam epitaxy were used as an active region of an injection laser. Laser action via quantum dot states was observed in temperature range of  $77 \div 200 \text{ K}$ . Lasing wavelength of  $1.894 \text{ }\mu\text{m}$  ( $77 \text{ K}$ ) was achieved at the lowest threshold current density of  $11 \text{ A/cm}^2$ .

e-mail: zhukov@beam.ioffe.rssi.ru