

Фото- и электролюминесценция вблизи 1.3 мкм структур с квантовыми точками на подложках GaAs

© А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, А.Ю. Егоров, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Б.В. Воловик, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Ю.М. Шерняков, А.В. Лунев, Ю.Г. Мусихин, Н.А. Берт, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров

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

(Получена 14 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Предложен и реализован метод, позволяющий значительно увеличить длину волны излучения в структурах, выращенных на подложках GaAs, с помощью помещения массива напряженных квантовых точек InAs во внешнюю квантовую яму InGaAs. Исследована зависимость положения линии люминесценции от конструкции активной области и сравниваются спектры фото- и электролюминесценции в области длин волн вблизи 1.3 мкм при комнатной температуре.

В настоящее время актуальной задачей является расширение оптического диапазона, достижимого в светоизлучающих приборах на подложках GaAs, вплоть до длины волны 1.3 мкм, отвечающей максимуму прозрачности оптического волокна. Существующий интерес обусловлен стремлением найти альтернативу лазерным диодам, изготавливаемым на основе гетероструктур InGaAsP, главным недостатком которых является довольно слабое ограничение электронов в активной области, приводящее к сильной температурной зависимости пороговой плотности тока [1]. Кроме того, создание излучателей на 1.3 мкм на подложках GaAs позволило бы интегрировать оптические приборы длинноволнового диапазона с транзисторами на основе GaAs, технология которых хорошо развита, а также избежать использования дорогих подложек InP.

Применение напряженных квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs не позволяет получить требуемый диапазон длин волн вследствие ограничений на ширину КЯ, налагаемых пределами псевдоморфного роста [2]. В [1] было показано, что добавление небольшого (порядка нескольких процентов) количества азота в слой InGaAs приводит к сильному уменьшению ширины запрещенной зоны и позволяет достичь длины волны 1.3 мкм.

Спонтанное формирование массивов квантовых точек (КТ) при осаждении сильно напряженного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \geq 0.5$) также приводит к заметному сдвигу линии люминесценции в длинноволновую сторону по сравнению с напряженными КЯ InGaAs [3]. В настоящей работе мы предлагаем и реализуем подход, альтернативный использованию азотсодержащих соединений, позволяющий значительно расширить диапазон излучения в структурах, выращенных на подложках GaAs. Предложенный метод основывается на понижении уровня размерного квантования в КТ при уменьшении ширины запрещенной зоны материала матрицы, что достигается с помощью помещения массива КТ во внешнюю КЯ InGaAs. Подобные структуры позволяют при комнатной температуре достичь длины волны люминесценции 1.3 мкм при оптической и инжекционной накачках. Наряду

с этим оптические приборы на основе КТ, возможно, позволят реализовать теоретически предсказанные преимущества систем с размерным квантованием в трех направлениях [4].

Исследуемые структуры, схематическое изображение которых дано на рис. 1, а, были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с твердотельным источником As_4 в установке Riber 32P на подложках GaAs (100). В середину слоя GaAs толщиной 0.12 мкм, ограниченного со стороны подложки и поверхности короткопериодными сверхрешетками AlAs (2 нм)–GaAs (2 нм), помещали исследуемую активную область, которая представляла собой массив квантовых точек InAs, помещенных во внешнюю квантовую яму $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Мольная доля InAs и ширина квантовой ямы варьировались в диапазонах $0.1 \div 0.3$ и $10 \div 4$ нм соответственно таким образом, чтобы суммарное напряжение, обусловленное как массивом КТ, так и ямой InGaAs, не превысило критическую величину для образования дислокаций несоответствия. Рост проводили в условиях обогащения мышьяком, температура подложки составляла 485°C при осаждении активной области и 600°C для остальной части структуры. Формирование массива КТ контролировали *in situ* по изменению в наблюдаемой картине дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение.

Фотолюминесценцию (ФЛ) исследовали при $15 \div 300$ К, возбуждали излучением Ar^+ -лазера (длина волны 514.5 нм) и регистрировали Ge-фотодиодом. Плотность мощности возбуждения составляла 100 Вт/см². Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были выполнены на электронном микроскопе Philips EM 420, работающем при ускоряющем напряжении $100 \div 120$ кВ. Образцы для ПЭМ были подготовлены в планарной геометрии с помощью химического травления в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (5:1:1).

Длина волны ФЛ массива КТ, выращенного на подложке GaAs, чувствительна к изменению ширины запрещенной зоны матрицы. В работе [5] было показа-

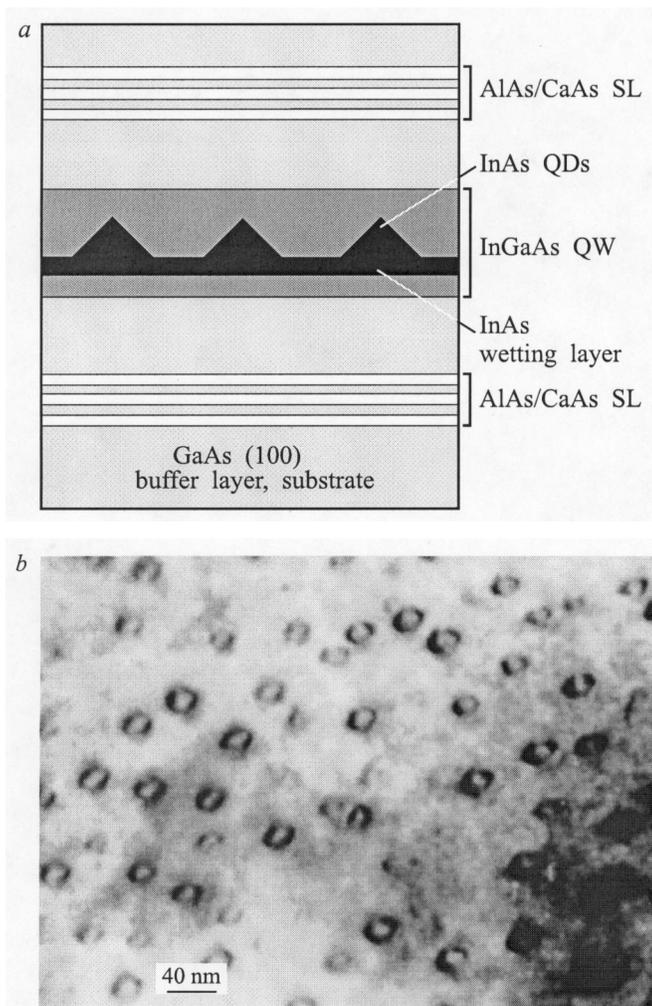


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых структур, содержащих массив квантовых точек (QD) InAs во внешней квантовой яме (QW) InGaAs, с двумя ограничительными сверхрешетками (SL), выращенных на подложках GaAs (100) (a) и электронно-микроскопическое изображение, полученное в режиме светлого поля вдоль оси [100], структуры с массивом КТ в КЯ $In_{0.12}Ga_{0.88}As$ шириной 10 нм (b).

но, что замена матрицы GaAs на более широкозонное трехкомпонентное соединение AlGaAs приводит к сильному коротковолновому сдвигу линии ФЛ массива КТ. Предлагаемый в настоящей работе метод увеличения длины волны излучения в структурах, выращенных на подложках GaAs, основывается на понижении уровня размерного квантования в КТ при уменьшении ширины запрещенной зоны материала матрицы. В качестве материала, окружающего массив КТ, предлагается использовать узкозонную напряженную квантовую яму InGaAs.

ПЭМ микрофотография (планарное изображение) образца, содержащего массив КТ, помещенный в КЯ $In_{0.12}Ga_{0.88}As$ шириной 10 нм, приведена на рис. 1, b. Поскольку материал как КТ, так и КЯ на подложке GaAs оказывается напряженным, существует риск

возникновения дислокаций несоответствия, снимающих напряжение рассогласования. Анализ данных ПЭМ позволяет сделать вывод, что в исследуемых образцах не происходило формирования дислокаций несоответствия, что является результатом тщательного выбора ширины КЯ для данного количества InAs, формирующего массив КТ, и данной мольной доли InAs в окружающей КЯ.

На рис. 2, a приведена температурная зависимость ФЛ структуры, содержащей массив КТ InAs, помещенный в КЯ $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ шириной 4 нм. Изменение температуры

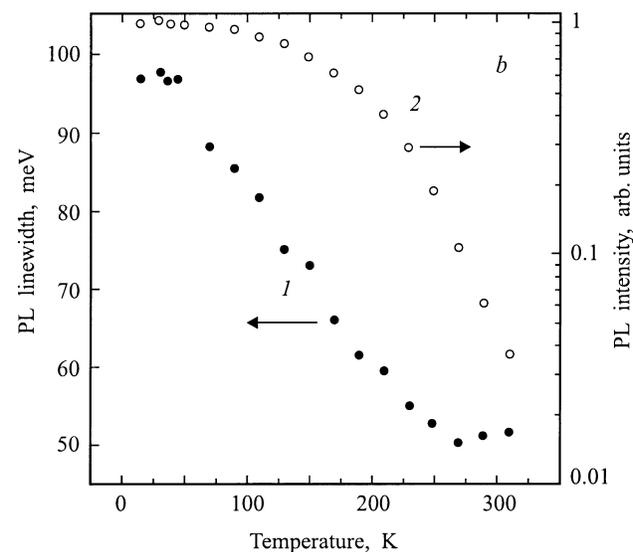
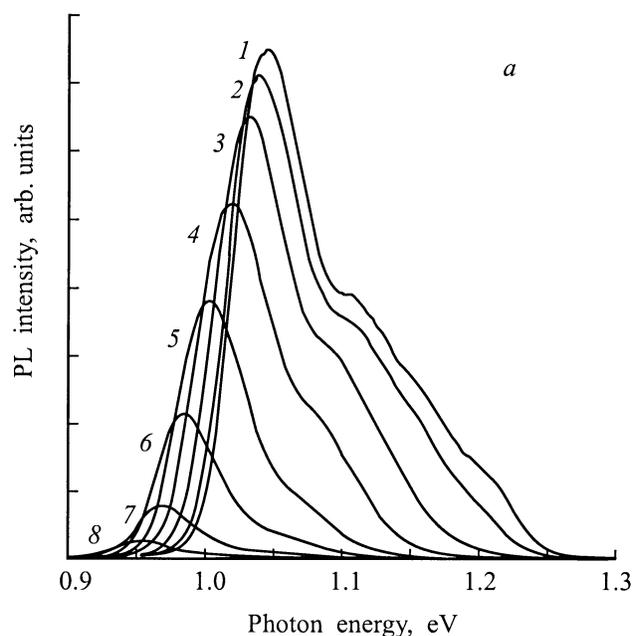


Рис. 2. a — спектры фотолюминесценции (PL) при температуре T , К: 1 — 30, 2 — 70, 3 — 110, 4 — 150, 5 — 190, 6 — 230, 7 — 270, 8 — 300. b — зависимости ширины линии (1) и интенсивности (2) фотолюминесценции (PL) от температуры для структуры, содержащей массив КТ в квантовой яме $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ шириной 4 нм.

от 30 до 310 К вызывает длинноволновый сдвиг линии ФЛ на 85 мЭВ, и при комнатной температуре положение максимума ФЛ достигает длины волны 1.3 мкм при ширине линии 50 мЭВ.

Зависимость ширины полосы ФЛ от температуры наблюдения, показанная на рис. 2, *b*, носит немонотонный характер: при увеличении температуры в диапазоне 15 ÷ 270 К ширина линии уменьшается, а в области больших температур наблюдается рост ширины линии. Такое поведение не характерно для люминесценции объемного материала или квантовых ям, где типично наблюдается закономерное увеличение ширины линии с увеличением температуры наблюдения вследствие заселения более высоко лежащих состояний.

Подобная аномальная зависимость ширины линии ФЛ от температуры наблюдалась ранее в структурах на основе КТ [5–7] и, как было показано в [7,8], может приводить к отрицательной характеристической температуре, т.е. уменьшению пороговой плотности тока с увеличением температуры, при использовании массива КТ в качестве активной области инжекционного лазера. Особенность результатов, представленных в настоящей работе, состоит в том, что впервые область уменьшения ширины линии ФЛ простирается до столь высокой температуры наблюдения. Это может быть обусловлено значительным увеличением энергии локализации основного состояния КТ по отношению к состояниям объемного GaAs вследствие помещения массива КТ во внешнюю КЯ InGaAs.

К настоящему времени в литературе уже имеются сообщения о достижении ФЛ на длине волны 1.3 мкм в структурах на основе массивов КТ InGaAs, выращенных как МПЭ [6], так и МОС-гидридной эпитаксией (газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений) [9] на подложках GaAs. В обоих этих случаях рост активной области осуществлялся с помощью попеременного осаждения атомов индия и галлия, в результате чего происходило формирование локальных областей (островков) с повышенным содержанием In. Процесс формирования этих островков, а значит, и длина волны ФЛ чувствительны к таким кинетическим параметрам, как давление мышьяка, скорость роста и температура осаждения, которые обычно трудно надежно контролировать в процессе выращивания.

Отличие предлагаемого подхода заключается в том, что, как будет показано далее, имеется возможность надежно управлять длиной волны излучения в широких пределах с помощью выбора эффективной ширины запрещенной зоны матрицы на основе КЯ InGaAs. Кроме того, падение интенсивности ФЛ (как интегральной, так и в максимуме) при увеличении температуры от 77 до 300 К составляет всего 10 ÷ 30 раз (рис. 2, *b*), что на порядок меньше значения, приведенного в [6].

Спектры ФЛ образцов, содержащих массив КТ InAs и отличающихся друг от друга содержанием In в КЯ, представлены на рис. 3, *a*. Для сравнения также приведен

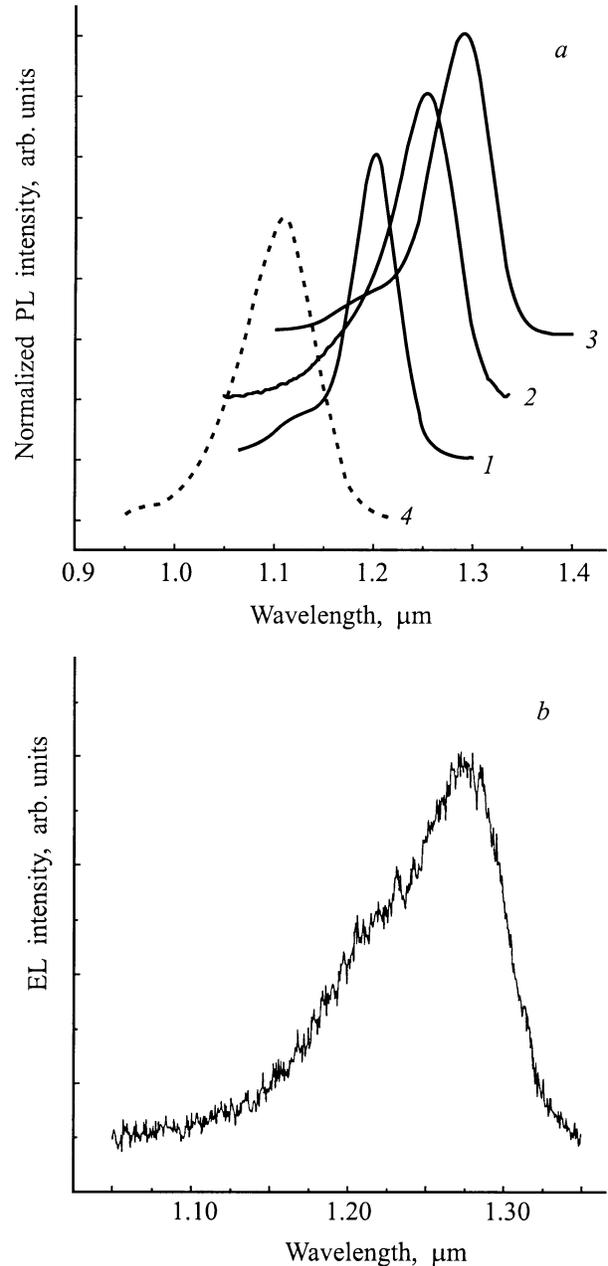


Рис. 3. *a* — спектры фотолюминесценции (PL) при 300 К образцов, содержащих массив КТ InAs с содержанием In в КЯ $x = 0.12$ (1), 0.2 (2), 0.3 (3); 4 — спектр фотолюминесценции массива КТ в матрице GaAs (КЯ отсутствует). *b* — спектр электролюминесценции (EL) при комнатной температуре образца, содержащего массив КТ InAs в КЯ InGaAs, помещенный в середину $p-i-n$ -области.

спектр ФЛ массива КТ в матрице GaAs (КЯ отсутствует). Видно, что уменьшение ширины запрещенной зоны материала матрицы, вызванное увеличением содержания In в КЯ, приводит к закономерному длинноволновому сдвигу линии ФЛ. Как отмечалось выше, положение максимума ФЛ достигает 1.3 мкм при использовании КЯ In_{0.3}Ga_{0.7}As шириной 4 нм.

До настоящего времени, насколько нам известно, в литературе не было сообщений о наблюдении лазерной генерации и даже электролюминесценции (ЭЛ) в диапазоне длин волн около 1.3 мкм от массивов КТ, выращенных на подложках GaAs. Мы полагаем, это обусловлено большей чувствительностью структур, использующих инжекционную накачку, к кристаллографическому совершенству как самой активной области на основе КТ, так и слоев последующего зарастивания.

Для исследования возможности создания лазеров на длину волны 1.3 мкм на основе предлагаемого в настоящей работе подхода нами была выращена структура на подложке n^+ -GaAs (100). Активная область, представляющая собой массив КТ InAs в КЯ InGaAs, помещена в середину $p-i-n$ -области, образованной легированными слоями $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ n - и p -типа проводимости и нелегированным слоем GaAs.

На рис. 3, *b* представлен спектр электролюминесценции этого образца, записанный при токе накачки 0.1 А (плотность тока 70 А/см²) при комнатной температуре. Максимум линии ЭЛ расположен на 1.276 мкм, что, насколько нам известно, является наибольшей длиной волны, достигнутой в структурах с КТ при использовании инжекционной накачки. Сдвиг максимума ЭЛ в коротковолновую сторону по отношению к линии ФЛ структуры, содержащей номинально идентичную активную область, но не имеющей толстых легированных слоев AlGaAs, составляет всего 24 нм. Это указывает на высокую стабильность формы, размеров и химического состава КТ, помещенных во внешнюю КЯ, по отношению к высокотемпературному отжигу [10], вызванному длительным зарастиванием активной области.

Таким образом, нами показано, что помещение массива квантовых точек InAs во внешнюю напряженную квантовую яму InGaAs позволяет значительно расширить длинноволновый предел излучения в структурах, выращенных на подложках GaAs. Длина волны фото- и электролюминесценции может управляемо изменяться в широком диапазоне с помощью изменения содержания In во внешней квантовой яме, достигая 1.3 мкм при комнатной температуре.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 96-02-17824) и фонда Фольксваген.

Список литературы

- [1] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, Y. Yazawa. *Japan. J. Appl. Phys.*, **35**, 1273 (1996).
- [2] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. *J. Cryst. Growth*, **27**, 118 (1974).
- [3] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ж.И. Алфёров, Д.Л. Федоров, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 1345 (1996).
- [4] Y. Arakawa, H. Sakaki. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 939 (1982).
- [5] 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. Алфёров. *ФТП*, **31**, 483 (1997).
- [6] R.P. Mirin, J.P. Ibbetson, K. Nishi, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3795 (1995).
- [7] D.I. Lubyshev, P.P. Gonzalez-Borrero, E. Marega, Jr., E. Petitprez, N. La Scala, Jr., P. Basmaji. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 205 (1996).
- [8] А.Е. Zhukov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Japan. J. Appl. Phys.*, **36**, 4216(1997).
- [9] K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara, S. Yamazaki. *Japan. J. Appl. Phys. Lett.*, **33**, L1710 (1994).
- [10] А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, Ж.И. Алфёров, Д. Бимберг. *ФТП*, **31**, 105 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Photo- and electroluminescence in 1.3 μm range from quantum dot structures on GaAs substrates

A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, Yu.M. Shernyakov, A.V. Lunev, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We have proposed and realized a method which allowed us to extend noticeably the emission wavelength from structures grown on GaAs substrates. The method is based on the insertion of a strained InAs quantum dot array into an external InGaAs quantum well. The dependence of the luminescence peak position on the active region design has been studied. Photo- and electroluminescence spectra in the 1.3 μm wavelength range at room temperature are compared.