

## Оптические свойства вертикально связанных квантовых точек InGaAs в матрице GaAs

© 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. Алфёров, J. Böhrer\*, D. Bimberg\*

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

\*Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 22 августа 1996 г. Принята к печати 10 сентября 1996 г.)

Показано, что при  $N$ -кратном осаждении  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}(12 \text{ \AA})/\text{GaAs}(50 \text{ \AA})$  эффекты самоорганизации приводят к формированию упорядоченных массивов вертикально связанных квантовых точек. Исследованы оптические свойства в зависимости от числа циклов осаждения ( $N = 1-10$ ). Показано, что в случае инжекционных гетеролазеров с активной областью на основе ВСКТ увеличение циклов осаждения  $N$  от 1 до 10 позволяет снизить пороговую плотность тока при 300 К от 950 до 97  $\text{A}/\text{cm}^2$  и реализовать непрерывный режим генерации при комнатной температуре с выходной мощностью 160 мВт с зеркала.

В последнее время в мире наблюдается особенно резкий рост интереса к исследованию гетероструктур с пространственным ограничением носителей в двух и трех измерениях — квантовым проволокам и квантовым точкам [1]. Такие структуры представляют значительный интерес с точки зрения их фундаментальных свойств, а также являются весьма перспективными для применения в микро- и оптоэлектронных приборах. Инжекционные гетеролазеры с активной областью на основе квантовых точек (In,Ga)As/GaAs продемонстрировали сверхвысокую температурную стабильность пороговой плотности тока ( $J_{th}$ ) с характеристической температурой ( $T_0$ ) порядка 350–400 К в широком температурном диапазоне (80–150 К) [2]. При более высоких температурах вследствие теплового выброса носителей из квантовых точек  $J_{th}$  увеличивалась,  $T_0$  уменьшалась ( $T_0 = 60 \text{ K}$ ), а длина волны лазерной генерации сдвигалась в коротковолновую сторону (т.е. в область энергий, близких к энергии оптического перехода в двумерном смачивающем слое) [2]. Использование массивов вертикально связанных квантовых точек (ВСКТ) InAs в матрице GaAs позволило существенно улучшить рабочие характеристики лазеров и реализовать генерацию через основное состояние при 300 К (длина волны 1.03 мкм) [3–5]. В то же время пороговая плотность тока оставалась достаточно высокой — 700  $\text{A}/\text{cm}^2$  при 300 К.

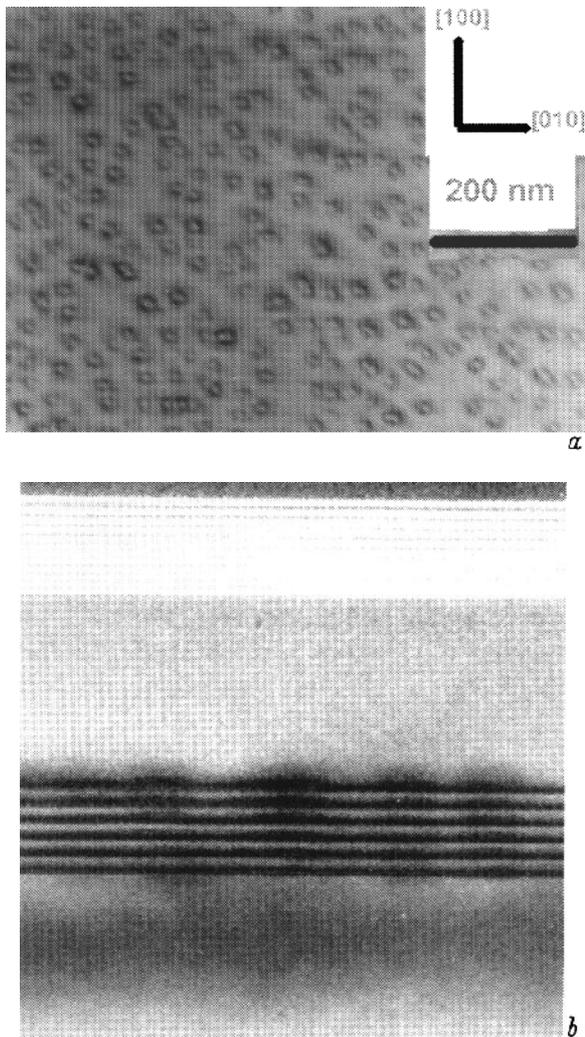
В настоящей работе при помощи фотолюминесценции (ФЛ), калориметрического поглощения и электролюминесценции нами исследованы оптические и лазерные свойства вертикально связанных квантовых точек (ВСКТ) с различным числом ( $N$ ) слоев InGaAs. Информация о структурном совершенстве и геометрии ВСКТ была получена при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Структуры выращивались на подложке GaAs (100). Активная область, представляющая собой массив ВСКТ, была помещена в середину слоя GaAs толщиной 0.2 мкм, ограниченного с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками AlAs(20 Å)/GaAs(20 Å) × 10. Мас-

сив ВСКТ был сформирован в результате  $N$ -кратного осаждения слоев InGaAs толщиной 12 Å, разделенных 50 Å прослойками GaAs. Каждый их  $N$  слоев InGaAs выращивался в субмонослойном режиме: (1 Å GaAs+1 Å InAs+10 с остановка) × 6 [6]. При осаждении активного слоя и покрывающего слоя GaAs толщиной 100 Å температура подложки была равна 485 °С, при росте всей остальной структуры — 600 °С. Лазерные структуры выращивались в стандартной геометрии двойной гетероструктуры с отдельным ограничением носителей (РО ДГС лазера) с градиентным волноводом. Геометрия лазерной структуры аналогична описанной в [3]. Активная область представляла собой массив ВСКТ. Температура подложки составила 485 °С при росте активной области и 100 Å покрывающего слоя GaAs, 630 °С для волноводов и 600 °С для остальной части структуры.

Для исследования образцов методом ФЛ верхний контактный слой у лазерных структур удалялся при помощи химического травления. ФЛ возбуждалась  $\text{Ag}^+$ -лазером, для детектирования использовался охлаждаемый германиевый фотодетектор. Спектры калориметрического поглощения (CAS) снимались при 500 мК. Минимальная детектируемая величина  $\alpha d$  составляла  $10^{-5}$  [7]. Для минимизации потерь на выход и достижения минимальной плотности порогового тока для электролюминесцентных исследований были выбраны лазеры с четырьмя сколотыми гранями. Измерение рабочих характеристик проводилось при импульсной накачке (длительность импульсов 100 нс, частота повторения 5 кГц), в температурном диапазоне 80–300 К. Для измерения ватт-амперных характеристик в непрерывном режиме использовались полосковые лазерные диоды. Лазеры припаивались индием полоском вниз на медный теплоотвод. Отражающие и просветляющие покрытия на резонаторные грани не наносились.

На рис. 1 представлены микрофотографии образца с 6 слоями InGaAs ВСКТ, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии.

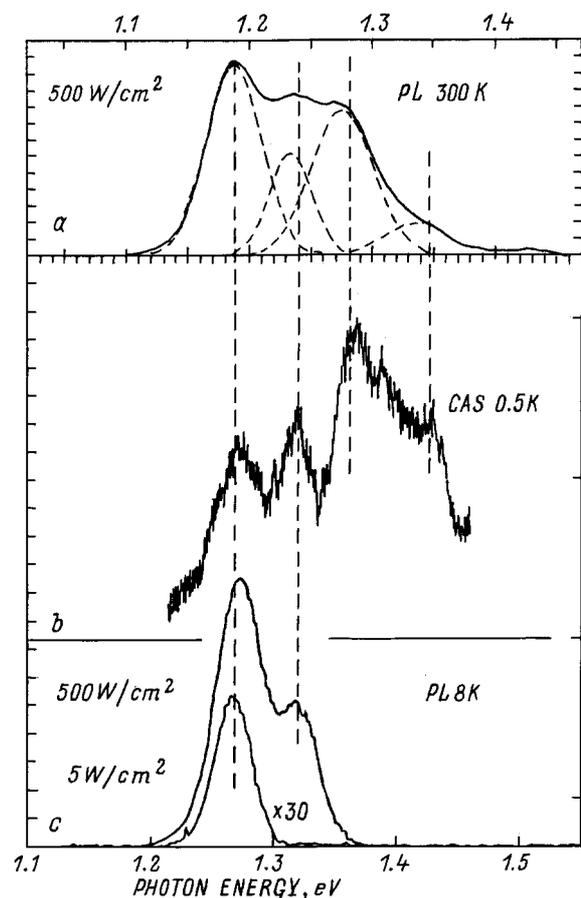


**Рис. 1.** Микрофотография образца с 6 слоями InGaAs КТ полученные методом просвечивающей электронной микроскопии: *a* — вид сверху, *b* — поперечное сечение.

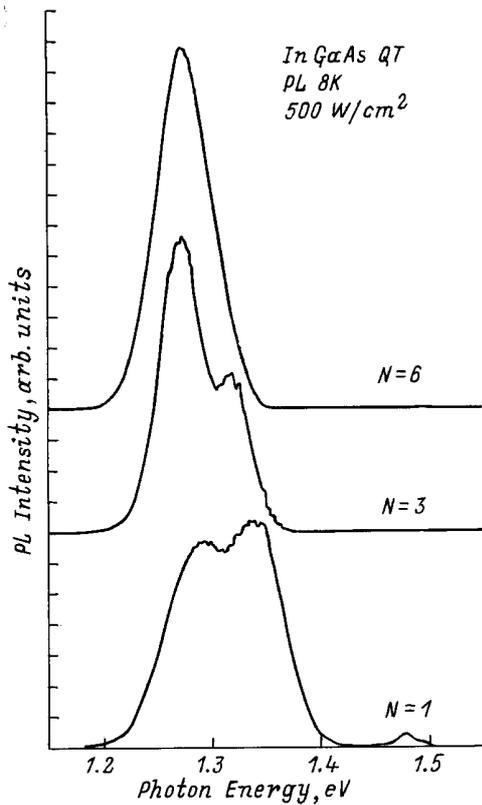
Образование InAs–GaAs ВСКТ было исследовано нами в [8]. Мы показали, что ВСКТ формируются благодаря эффекту самоорганизации, включающему в себя перенос In(Ga,As) от нижних точек к верхним и заменой его на GaAs [8]. Как видно из рис. 1, латеральный размер нижнего островка в InGaAs ВСКТ составляет примерно 140 Å. Латеральные размеры островков каждого последующего ряда постепенно увеличиваются, достигая 260 Å для верхнего островка. Плотность точек составляет примерно  $(5-6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Точки локально упорядочены в латеральной плоскости вдоль направлений [001] и [0 $\bar{1}$ 1] (рис. 1, *a*). Как видно из рис. 1, *b*, каждая вертикально связанная квантовая точка состоит из 6 островков InGaAs, разделенных узкими прослойками GaAs. Таким образом, волновые функции верхних и нижних островков существенно перекрываются, т.е. с точки зрения электронных свойств ВСКТ представляют собой единый объект [8].

На рис. 2 представлены спектры ФЛ и калориметрического поглощения структуры с  $N = 3$ . При низких плотностях возбуждения в спектре наблюдается интенсивная линия, обусловленная основным экситонным состоянием ВСКТ. При больших плотностях возбуждения в спектре появляется дополнительный пик, обусловленный возбужденным состоянием экситона в квантовой точке [9]. При высоких температурах наблюдения удается также выделить линию ФЛ от смачивающего слоя. С ростом температуры данные линии сдвигаются в длинноволновую сторону в соответствии с температурным сдвигом ширины запрещенной зоны GaAs. Пики от основного и возбужденных состояний в спектре ФЛ совпадают с аналогичными пиками в спектре калориметрического поглощения, что говорит о наличии высокой плотности хорошо сформированных однородных по размеру квантовых точек, в согласии с данными электронной микроскопии.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ структур с различным  $N$  при высокой плотности возбуждения. Из рисунка видно, что для образца с  $N = 1$  при таких плотностях возбуждения происходит значительное насыщение лю-



**Рис. 2.** Спектры ФЛ структуры с InGaAs ВСКТ ( $N = 3$ ) при 300 (*a*) и 8 К (*c*) (на рис. 2, *a* ось энергий для наглядности сдвинута на величину температурного сдвига ширины запрещенной зоны GaAs); спектр калориметрического поглощения той же структуры при 500 мК (*b*).

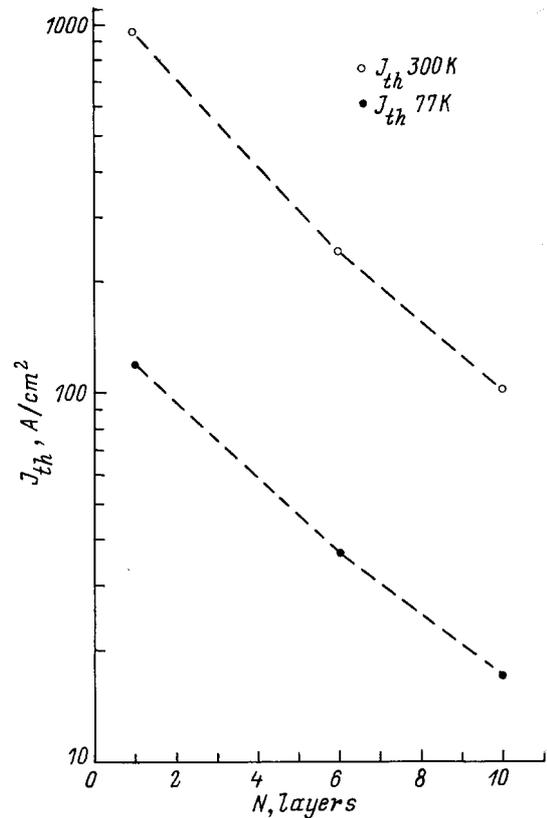


**Рис. 3.** Спектры ФЛ структур с InGaAs ВСКТ при различных значениях числа периодов осаждения  $N$  (высокая плотность накачки).

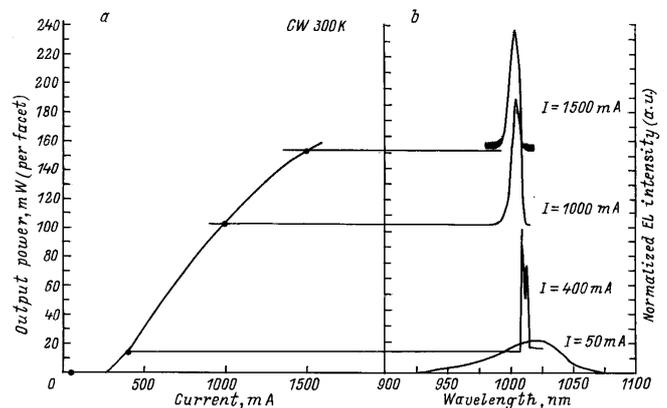
минесценции, связанной с основным переходом в ВСКТ, и в спектре присутствует интенсивная линия, связанная с переходами с участием дырок в основном состоянии в точке, и электронов, локализованных в смачивающем слое. На коротковолновом краю линии ФЛ квантовых точек наблюдается излучение смачивающего слоя. Для образца с  $N = 3$  эффект насыщения люминесценции основного состояния выражен в меньшей степени, и, наконец, в случае  $N = 6$  насыщения практически не наблюдается. Данный факт согласуется с уменьшением излучательного времени жизни для InAs/GaAs ВСКТ с ростом  $N$  [8].

Увеличение количества слоев при выращивании ВСКТ до  $N = 10$  позволяет резко уменьшить пороговую плотность тока ( $J_{th}$ ) при 300 К (от 950 А/см<sup>2</sup> для  $N = 1$  до 97 А/см<sup>2</sup> для  $N = 10$ ) вследствие увеличения коэффициента перекрытия световой волны с активной областью лазера (рис. 4). Резкое уменьшение пороговой плотности тока позволило реализовать непрерывный режим работы полоскового лазера на ВСКТ ( $N = 10$ ) при комнатной температуре. На рис. 5, *a* представлена ватт-амперная характеристика лазера с шириной полоска 60 мкм и длиной резонатора 1200 мкм при 300 К. Дифференциальная эффективность составила 23%. Максимальная мощность, полученная с каждого зеркала лазера, равнялась 160 мВт. Спектры излучения

в спонтанном режиме и в режиме генерации показаны на рис. 5, *b*. Как видно из рис. 5, *b*, увеличение тока накачки от 400 мА до максимального значения 1500 мА приводит лишь к слабому уширению спектра лазерной генерации и незначительному сдвигу его максимума в коротковолновую сторону. В спектре отсутствуют дополнительные линии, связанные с генерацией через состояния смачи-



**Рис. 4.** Зависимость пороговой плотности тока от числа периодов осаждения  $N$  в четырехсклотовых лазерных диодах с ВСКТ.



**Рис. 5.** Ватт-амперная характеристика лазера на InGaAs ВСКТ с  $N = 10$  (ширина полоска 60 мкм, длина резонатора 1200 мкм) при 300 К в непрерывном режиме (*a*); спектры электролюминесценции при различных токах накачки (*b*).

вающего слоя. Таким образом, вплоть до максимальных токов накачки, соответствующих выходной мощности 160 мВт с зеркала, лазерная генерация осуществляется через основное состояние квантовых точек и насыщения усиления не наблюдается.

Итак, в данной работе исследованы оптические свойства ВСКТ и показано, что использование ВСКТ в лазерных структурах позволяет реализовать генерацию через основное состояние квантовых точек при комнатной температуре в непрерывном режиме с выходной мощностью 160 мВт на зеркало.

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), фондом Volkswagen, фондом Сороса, грантом INTAS-94-1028.

### Список литературы

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 939 (1982).
- [2] N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, U. Richter, S.S. Ruvimov, P. Werner, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Electron. Lett.*, **30**, 1416 (1994).
- [3] Ф.И. Алфёров, Н.А. Берг, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоогов, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цапульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 351 (1996).
- [4] V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, N.N. Ledentsov, A.V. Lunev, M.V. Maximov, A.F. Tsatsulnikov, N.A. Bert, A.O. Kosogov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Proc. of the Material Research Society Full Meeting*, Non. 27–Dec. 1, 1995 (Boston, USA).
- [5] P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, I.V. Kochnev, N.A. Bert, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, V.V. Komin, A.O. Kosogov, I.L. Krestnikov, M.N.V. Maximov, S.S. Ruvimov, A.V. Sakhrov, Yu.M. Sherniakov, A.F. Tsatsul'nikov, S.V. Zaitsev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *Proc. of CLEO*, 1996 (Anahaim, USA).
- [6] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов. *ФТП*, **28**, 604 (1994).
- [7] D. Bimberg, T. Wolf, J. Böhrer. In: *Advances in Nonradiative Processes in Solids*, ed. by B. di Bartolo (Plenum, N.Y., 1991) p. 577.
- [8] M. Grundmann, N.N. Ledentsov, R. Heitz, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, A.O. Kosogov, P. Werner, J. Heydenreich, U. Gösele. *Proc. 8th Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials Schwabish-Gmund*, 1996 (Germany).
- [9] M. Grundmann, N.N. Ledentsov, O. Stier, D. Bimberg, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 979 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

### Optical properties of vertically coupled InGaAs quantum dots in a GaAs matrix

M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, A.V. Sakharov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, Zh.I. Alferov, J. Böhrer\*, D. Bimberg\*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\*Technische Universität Berlin,  
D-10623 Berlin, Germany