

06

## **Фотопроводимость гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками при комнатной температуре в диапазоне 1–2.6 $\mu\text{m}$**

© М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Л.Д. Молдавская, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

E-mail: lmd@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2007 г.

Изучена фотопроводимость гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками в диапазоне 1–2.6  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре. Особенностью структур является увеличение количества InAs при формировании слоя квантовых точек и использование чередования низко- и высокотемпературного режимов для их зарощивания барьерным слоем GaAs. Впервые методом металлоорганической газофазной эпитаксии изготовлены многослойные гетероструктуры с квантовыми точками InAs/GaAs, демонстрирующие при комнатной температуре фотолюминесценцию до 1.6  $\mu\text{m}$  и интенсивную фотопроводимость до 2.6  $\mu\text{m}$ . Вольт-ваттная чувствительность при комнатной температуре составила  $3 \cdot 10^3 \text{ V/W}$  в полосе пропускания Si фильтра, удельная обнаружительная способность  $9 \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ .

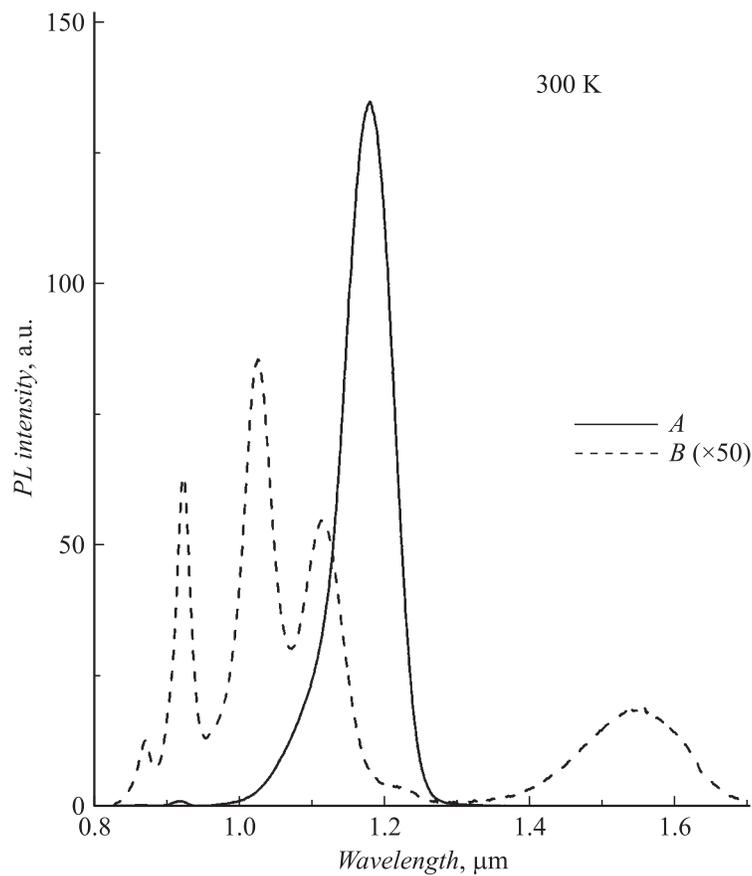
PACS: 78.67.Hc, 73.61.Ey, 81.15.Gh

В последнее время значительный интерес вызывает исследование внутризонной фотопроводимости (ФП) в гетероструктурах (ГС) с квантовыми точками (КТ). Вследствие нуль-мерного характера электронного спектра в КТ происходит снижение рассеяния фотовозбужденных носителей на фонах кристаллической решетки, возрастает их

время жизни и снижается тепловой шум [1]. Это повышает квантовую эффективность и дает возможность увеличить рабочие температуры в сравнении с детекторами на квантовых ямах [2]. Для структур InGaAs/GaAs с КТ разных размеров была показана возможность детектирования излучения в диапазоне 3–17  $\mu\text{m}$  при нормальном падении излучения [1–3], основанная на эффекте внутризонной фотопроводимости. В данной работе мы хотим сообщить о наблюдении межзонной ФП в ГС InAs/GaAs с КТ в диапазоне 1–2.6  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре. В работе [4] мы исследовали особенности ИК-фотопроводимости ГС с увеличенной эквивалентной толщиной слоя КТ InAs ( $d^*$ ). При 77 К мы наблюдали две линии внутризонной ФП — вблизи 3 и 4.5  $\mu\text{m}$  и две линии межзонной ФП — 1.25 и 1.6  $\mu\text{m}$ . Эти результаты свидетельствовали о формировании в этих структурах крупных КТ с длиной волны основного перехода 1.6  $\mu\text{m}$ . В данной работе изготовлена серия многослойных ГС с КТ с повышенными значениями  $d^*$  и исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) и ИК-фотопроводимости. Проведена абсолютная калибровка фоточувствительности таких структур при комнатной температуре.

Гетероструктуры InAs/GaAs с квантовыми точками выращивались методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) при пониженном давлении в условиях, описанных в [4]. Структуры состояли из 10 слоев селективно-легированных КТ, разделенных барьерными слоями GaAs толщиной около 90 nm. Рост КТ InAs проводился при пониженной температуре 480°C, после чего следовала продувка реактора водородом в присутствии арсина и зарращивание КТ тонким слоем GaAs. В режиме прерывания роста температура поднималась до 600°C и проводилась эпитаксия барьерных слоев GaAs. Наиболее критичными параметрами были время роста КТ или эквивалентная толщина слоя InAs  $d^*$ , а также толщина низкотемпературного слоя GaAs, который служит для консервации КТ при подъеме температуры. В то же время данная процедура позволяла растворять крупные дефектные кластеры, как это обсуждалось в работах [5,6].

Для возбуждения фотолюминесценции использовался Ar-лазер с длиной волны 514.5 nm. ИК-фотопроводимость исследовалась с помощью монохроматора МДР-41, в качестве источника ИК-излучения использовался глобар с температурой 1000°C. Для абсолютной калибровки фоточувствительности использовался источник „абсолютно черное тело“ (АЧТ) с температурой 600°C.



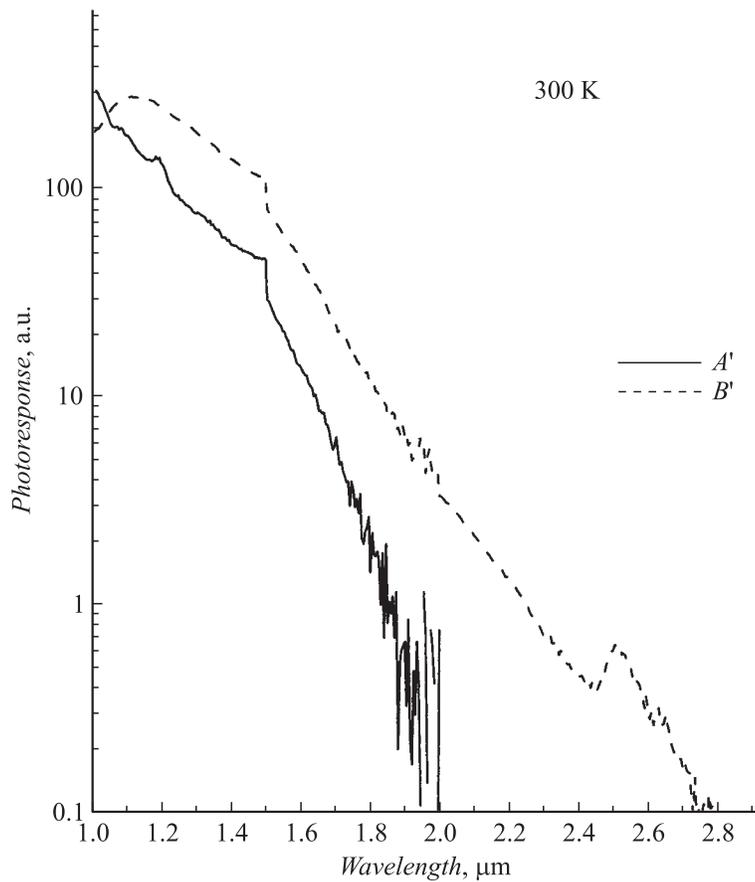
**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции структур *A* и *B*.

На рис. 1 приведены спектры ФЛ двух структур *A* и *B*, отличающихся толщиной слоя КТ InAs  $d^*$ . В структуре *A* значение  $d^*$  немного превышает критическую толщину образования КТ. При 300 К в структуре *A* наблюдается интенсивная ФЛ с длиной волны основного перехода 1.18  $\mu\text{m}$ . В структуре *B* значение  $d^*$  увеличено на 50% при сохранении других параметров. В этой структуре спектр ФЛ существенно изменился. Появляется дополнительная линия ФЛ вблизи

1.55  $\mu\text{m}$ , свидетельствующая о наличии более крупных КТ, при этом интенсивность ФЛ на 1.18  $\mu\text{m}$  резко снижается. Отметим, что линия 1.55  $\mu\text{m}$  сохраняется при химическом травлении верхней части структуры (при этом удаляются два верхних слоя КТ). Это доказывает, что ФЛ связана с внутренними слоями КТ, а не с поверхностными, как это наблюдалось в работах [7,8]. Длинноволновая ФЛ на 1.55  $\mu\text{m}$  ранее наблюдалась в многослойных гетеросистемах InGaAs/GaAs с КТ, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [9–11]. Насколько нам известно, методом МОГФЭ такие структуры ранее не были получены. Кроме длинноволновых линий в спектрах ФЛ на рис. 1 наблюдаются и более коротковолновые линии от КТ (1–1.1  $\mu\text{m}$ ) и линии смачивающего слоя — 0.92  $\mu\text{m}$  и GaAs — 0.87  $\mu\text{m}$ . Дополнительные линии ФЛ мы связываем с несколькими группами КТ разных размеров. Более детальные исследования спектров ФЛ, а также данные атомно-силовой микроскопии и рентгено-дифракционных измерений структур будут приведены в отдельной публикации.

Для измерения фотопроводимости в продольной геометрии электронного транспорта были изготовлены структуры  $A'$  и  $B'$ , аналогичные соответственно структурам  $A$  и  $B$ . На рис. 2 приведены спектры фотопроводимости при 300 К. В структуре  $A'$  с меньшим количеством InAs ФП падает более резко и при 2  $\mu\text{m}$  пропадает. Особенности при 1.07 и 1.18  $\mu\text{m}$  соответствуют резонансным переходам мелких КТ. Резкое падение интенсивности на рис. 2 при 1.5  $\mu\text{m}$  вызвано переключением фильтров в монохроматоре. Особенностью структуры  $B'$  с крупными КТ является сохранение интенсивности ФП при увеличении длины волны до 1.7  $\mu\text{m}$ . Кроме того, в области 2.5  $\mu\text{m}$  (0.5 eV) в структуре  $B'$  наблюдается узкая резонансная линия. Для структур InGaAs/GaAs эта область длин волн соответствует внутризонной ФП. Подобные зависимости наблюдались и в случае вертикальной фотопроводимости. Фоточувствительность структуры  $B'$  была прокалибрована с помощью АЧТ в качестве источника излучения. С дополнительным фильтром на основе пластины кремния вольт-ваттная чувствительность при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1.2–1.7  $\mu\text{m}$  составила  $3 \cdot 10^3 \text{ V/W}$ , удельная обнаружительная способность —  $9 \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ . Нам неизвестны другие работы по наблюдению фотопроводимости при комнатной температуре в структурах InGaAs/GaAs с КТ в этой области спектра.

Использованный метод роста КТ с увеличенной толщиной  $d^*$  исследовался ранее другими группами. В рамках [8,12–14] прослежена



**Рис. 2.** Спектры фотопроводимости структур  $A'$  и  $B'$ .

эволюция спектров ФЛ массивов КТ при повышении  $d^*$  и показано, что при увеличении  $d^*$  одновременно с ростом плотности КТ возрастает разброс размеров КТ и число крупных дефектных релаксированных кластеров InAs. Это приводит к уширению линии фотолуминесценции КТ и значительному снижению ее интенсивности. Поэтому такой подход был признан бесперспективным для формирования лазерных структур. В отличие от этих работ, при росте структур мы ввели в процесс

дополнительную стадию отжига крупных дефектных кластеров, что приводит к растворению крупных релаксированных кластеров InAs и формированию вторичного смачивающего слоя InGaAs из материала этих кластеров [15]. Благодаря процессу отжига дефектных кластеров оптическое качество таких структур остается высоким даже при существенном повышении значений  $d^*$ . Кроме того, при заращивании не использовались дополнительные слои InGaAs, часто применяемые для длинноволнового сдвига линий ФЛ КТ. Это снижает упругие напряжения в структурах и количество дислокаций.

В данной работе изготовлены многослойные гетероструктуры InAs/GaAs с крупными КТ, демонстрирующие длинноволновую ФЛ до  $1.6\ \mu\text{m}$  и интенсивную фотопроводимость в диапазоне  $1\text{--}2.6\ \mu\text{m}$  при комнатной температуре. Можно ожидать, что при 300 К характерные времена процессов релаксации фотовозбужденных носителей в структурах с КТ с большим числом возбужденных уровней будут существенно ниже 1 ns [16]. Поэтому структуры могут представлять интерес для быстрых фотоприемников ближнего ИК-диапазона, включая актуальный диапазон  $1.55\ \mu\text{m}$ .

Работа поддерживалась РФФИ, проекты № 06-02-16519 и 07-02-00163.

## Список литературы

- [1] Finkman E., Maimon S., Immer V., Bahir G., Schacham S.E., Fossard F., Julien F.H., Brault J., Gedry M. // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 045323.
- [2] Maimon S., Finkman E., Bahir G., Schacham S.E., Garsia J.M., Petroff P.M. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2003.
- [3] Krishna S., Raghavan S., von Winckl G., Stintz A., Ariyawansa G., Matsik S.G., Perera A.G.U. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 2745.
- [4] Moldavskaya L.D., Daniltsev V.M., Drozdov M.N., Zakamov V.R., Shashkin V.I. // Narrow Gap Semiconductors. 2005. Eds Kono & Léotin. Institute of Physics Conference Series. N 187. Published by Taylor & Franics. P. 360–364.
- [5] Сизов Д.С., Максимов М.В., Цацульников А.Ф., Черкашин Н.А., Крыжановская Н.В., Жуков А.Б., Малеев Н.А., Михрин С.С., Васильев А.П., Селин Р., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Бимберг Д., Алфёров Ж.И. // ФТП. 2002. Т. 36. № 9. С. 1097.
- [6] Nuntawong N., Huang S., Jiang Y.B., Hains C.P., Huffaker D.L. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. N 11. P. 113105.

- [7] *Karpovich I.A., Baidus N.V., Zvonkov B.N., Morozov S.V., Filatov D.O., Zdoroveishev A.V.* // *Nanotechnology*. 2001. V. 12. P. 425.
- [8] *El-Emawy A.A., Birudavolu S., Wong P.S., Jiang Y.-B., Xu H., Huang S., Huffaker D.L.* // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. N 9. P. 3529.
- [9] *Maximov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Volovik B.V., Bedarev D.A., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Bert N.A., Ustinov V.M., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D., Soshnikov I.P., Werner P.* // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. N 11. P. 2347.
- [10] *Жуков А.Е., Воловик Б.В., Михрин С.С., Малеев Н.А., Цацульников А.Ф., Никитина Е.В., Каяндер И.Н., Устинов В.М., Леденцов Н.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 2001. Т. 27. В. 17. С. 51.
- [11] *Тонких А.А., Егоров В.А., Поляков Н.К., Цырлин Г.Э., Крыжановская Н.В., Сизов Д.С., Устинов В.М.* // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28. В. 10. С. 71.
- [12] *Fekete D., Dery H., Rudra A., Karon E.* // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. N 3. P. 034304.
- [13] *Chen J.F., Hsiao R.S., Chen Y.P., Wang J.S., Chi J.Y.* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. N 14. P. 141911.
- [14] *Устинов В.М.* // *ФТП*. 2004. Т. 38. В. 8. С. 963.
- [15] *Востоков Н.В., Гапонова Д.М., Данильцев В.М., Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Молдавская Л.Д., Пашкин В.И.* // XI Междунар. симпозиум „Нанофизика и нанoeлектроника“. Нижний Новгород, 10–14 марта 2007 г. Матер. симпозиума. Т. 2. С. 412.
- [16] *Norris T.B., Kim K., Urayama J., Wu Z.K., Singh J., Bhattacharya P.K.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. 2077.