

# Гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками для инфракрасных фотоприемников диапазона 3–5 мкм

© А.В. Антонов, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская<sup>¶</sup>, А.В. Мурель, В.С. Туловчиков, В.И. Шашкин

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 16 июня 2004 г.)

Исследованы особенности формирования квантовых точек InAs методом металлорганической газофазной эпитаксии в зависимости от времени роста или эквивалентной толщины слоя InAs. Методами просвечивающей электронной микроскопии и фотолюминесценции показано, что увеличение времени роста квантовых точек в матрице GaAs приводит к изменению не только их размеров, но и формы — увеличивается отношение вертикальных и латеральных размеров. Изготовлены многослойные селективно-легированные структуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками, и проведено исследование инфракрасной фотопроводимости в продольной и вертикальной геометрии электронного транспорта. В режиме нормального падения излучения наблюдалась внутризонная фотопроводимость в среднем инфракрасном диапазоне (2.5–5 мкм) до температуры 110 К.

## 1. Введение

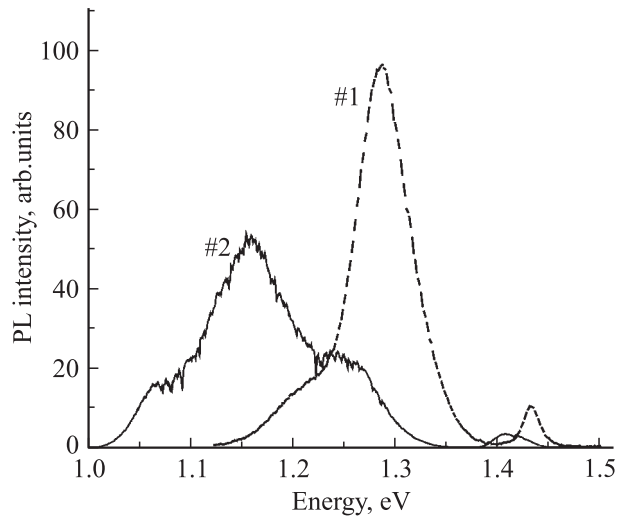
В последнее время значительный интерес вызывает использование гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми точками (КТ) в качестве детекторов излучения среднего и дальнего инфракрасных (ИК) диапазонов [1,2]. Благодаря нуль-мерному характеру размерного квантования ИК фотоприемники на КТ в отличие от структур с квантовыми ямами могут принимать излучение любой поляризации при нормальном падении. Кроме того, в системах с КТ может быть ослаблено рассеяние электронов на фононах, что значительно увеличивает время жизни фотовозбужденных электронов — один из основных параметров, определяющих чувствительность ИК фотоприемников — и позволяет рассчитывать на более высокие рабочие температуры. Для реализации потенциальных возможностей фотоприемников на КТ центральную роль играет прецизионное управление и контроль зонной структуры массивов КТ. Большое число работ посвящено ИК фотоприемникам диапазона 8–14 мкм, значительно меньше работ выполнено по фотоприемникам для окна прозрачности в среднем ИК диапазоне 3–5 мкм [3–7]. Дополнительный интерес вызывает создание широкополосных приемников для этого диапазона. Основным требованием для таких фотоприемников является смещение линий межзонных переходов в КТ в длинноволновую область, 1.3–1.5 мкм, что может повысить энергию переходов при внутризонном поглощении в зоне проводимости до 400–450 мэВ. Наиболее распространенным способом формирования таких КТ является молекулярно-пучковая эпитаксия, использующая заравивание сформированных КТ слоем InGaAs. В данной работе для изготовления фотоприемников диапазона 3–5 мкм используется метод металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ). Проведено исследование зонной структуры массивов

КТ методами фотолюминесценции (ФЛ) и межзонной фотопроводимости (ФП), сообщается о наблюдении нескольких линий продольной и вертикальной фотопроводимости в среднем ИК диапазоне.

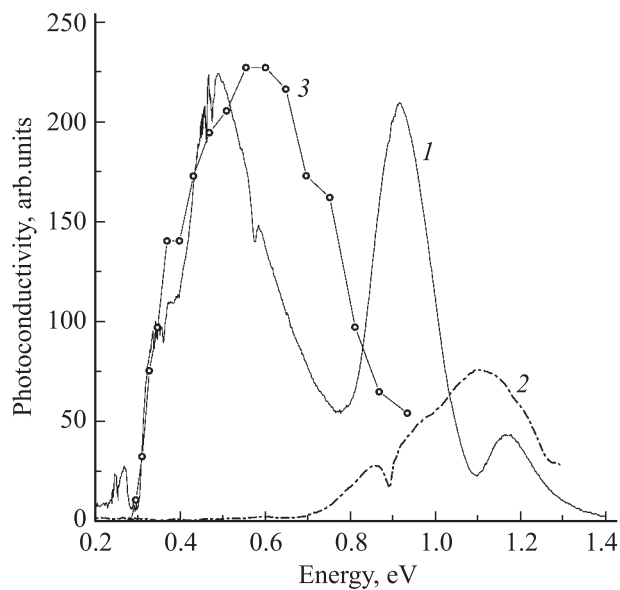
## 2. Эксперимент

Многослойные гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками выращивались на подложках GaAs(100) методом МОГФЭ пониженного давления на установке EPIQUIP VP-502RP. Для измерений фотопроводимости в продольной геометрии электронного транспорта структуры выращивались на изолирующих подложках, для вертикальной геометрии — на проводящих подложках  $n^+$ -GaAs. Структуры состояли из 10 слоев КТ InAs, разделенных барьерными слоями GaAs толщиной 90 нм, они селективно легировались  $\delta$ -слоями Si, расположенными на расстоянии 2.5 нм перед каждым слоем КТ. Рост КТ InAs проводился при пониженной температуре, 480°C, после чего следовала продувка реактора и заравивание КТ тонким слоем GaAs при той же температуре. После повторной продувки реактора температура поднималась до 600°C и проводился рост барьерных слоев GaAs. Наиболее критичным параметром здесь являлось время роста КТ, или эквивалентная толщина слоя InAs. Для измерения продольной фотопроводимости использовались образцы размером  $5 \times 3 \text{ мм}^2$ , на поверхности которых формировались омические контакты путем вжигания In. Для измерений фотопроводимости в вертикальной геометрии электронного транспорта методом фотолитографии были изготовлены мезаструктуры в форме квадрата размером  $300 \times 300 \text{ мкм}^2$ . Омические контакты AuGeNi наносились на поверхность меза-структуры в виде дорожек шириной 100 мкм по периметру квадрата. Размер входного окна для излучения составлял  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ , его площадь была в 1000 раз меньше, чем при измерении продольной ФП.

<sup>¶</sup> E-mail: lmd@ipm.sci-nnov.ru



**Рис. 1.** Спектры фотолуминесценции (PL) двух структур, отличающихся временем подачи InAs при росте КТ: структура 1 — 10 с, структура 2 — 8 с.



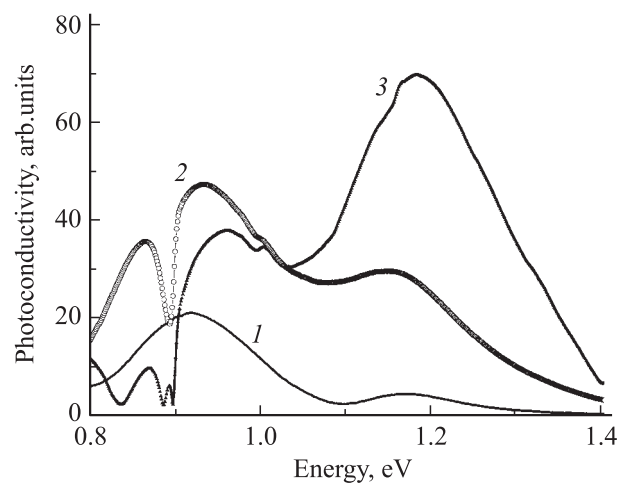
**Рис. 2.** Спектры фотопроводимости структуры 2: 1 — продольная ФП, 77 К; 2 — продольная ФП, 300 К; 3 — вертикальная ФП, 77 К.

Измерения фотолуминесценции проводились при температуре  $T = 77$  К, использовался лазер накачки с длиной волны 514 нм и охлаждаемый Ge-детектор. Продольная ИК фотопроводимость структур исследовалась на фурье-спектрометре WOMEM, измерения вертикальной ФП проводились на спектрометре ИКС-21. Данные просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были получены на электронном микроскопе JEM2000EXII.

На рис. 1 приведены спектры ФЛ двух структур с КТ, отличающихся временем подачи InAs при росте КТ: 10 с для структуры 1 и 8 с для структуры 2. В структуре 1 наблюдается пик ФЛ 1.21 эВ, соответ-

ствующий переходам между основными состояниями в КТ, и пик 1.29 эВ, обусловленный переходами между возбужденными состояниями. На подобной структуре мы наблюдали несколько линий продольной фотопроводимости в среднем и дальнем ИК диапазонах [8]. В структуре 2 происходит длинноволновый сдвиг линий ФЛ основного и первого возбужденного переходов, 1.07 и 1.16 эВ, и появляется дополнительная линия переходов между более высокими возбужденными уровнями, 1.25 эВ. Следует отметить, что в структуре 2 наряду со сдвигом линии перехода между основными состояниями в КТ происходит и увеличение расстояния между основным и первым возбужденным переходами. Согласно работам [9,10], это свидетельствует об изменении не только размеров, но и формы КТ: в структуре 2 происходит увеличение  $k$  — отношения вертикальных и латеральных размеров (aspect ratio). Этот вывод подтверждается данными ПЭМ:  $k \approx 0.15$  в структуре 1,  $k \approx 0.3$  в структуре 2.

На рис. 2 приведены результаты измерения продольной ИК фотопроводимости структуры 2 при 77 К. Наблюдается несколько линий внутризонной фотопроводимости: 0.26, 0.35 и 0.49 эВ. Кроме того, особенностью является наличие линий межзонной ФП (0.92 и 1.18 эВ). Эти линии значительно более выражены при использовании другого источника света и делителя в фурье-спектрометре, специализированных для ближнего ИК диапазона, как это видно из рис. 3 (характерный провал 0.88 эВ на кривых 2 и 3 рис. 3 связан, очевидно, с особенностями используемой кварцевой лампы). Следует отметить, что линия 1.18 эВ в спектре ФП на рис. 2,3 совпадает с линией ФЛ рис. 1, обусловленной переходом между возбужденными состояниями в КТ. Эти состояния расположены достаточно глубоко от края зоны проводимости GaAs и смачивающего слоя, так что тепловой выброс или туннелирование фотовозбужден-



**Рис. 3.** Спектры фотопроводимости структуры 2 при 77 К, полученные при использовании различных делителей и источников света в фурье-спектрометре: 1 — делитель KBr, глобар; 2 — делитель KBr, кварцевая лампа; 3 — делитель кварц, кварцевая лампа.

ных носителей из КТ маловероятны. В такой ситуации линии межзонной фотопроводимости, как правило, не наблюдаются. Однако в работе [11] мы уже отмечали особенности продольной фотопроводимости в структурах с КТ, обусловленные изменением рассеивающих кулоновских полей, создаваемых заряженными КТ при фотовозбуждении носителей. Это дает возможность нового, не „концентрационного“, механизма фотопроводимости в структурах с КТ. Наличие линий межзонной фотопроводимости на рис. 2, 3 дополнительно подтверждает этот механизм.

Кроме того, в спектре ФП в ближнем ИК диапазоне наблюдается линия 0.92 эВ, отсутствующая в спектре ФЛ на рис. 1. На наш взгляд, это свидетельствует о наличии в структуре 2 бимодального характера распределения КТ с излучательными (тип 1) и безызлучательными (тип 2) переходами. Возможность формирования бимодальных распределений КТ методом МОГФЭ обсуждается в работах [12–14]. Ширина линии ФЛ составляет 0.095 эВ, линии ФП оказываются более широкими, 0.2 эВ, что свидетельствует о большем влиянии неоднородного уширения уровней в КТ на спектр межзонной ФП. Указанные переходы в спектре ФП в ближнем ИК объясняют наблюдаемый спектр внутризонной ФП в среднем ИК: линии 0.26 и 0.35 эВ связаны с первым типом КТ, линия 0.49 эВ — со вторым. Ширина линий внутризонной фотопроводимости составляет 0.15–0.18 эВ. ФП в среднем ИК диапазоне наблюдалась до  $T = 110$  К, максимальное значение достигается при 62 К. Межзонная фотопроводимость в ближнем ИК наблюдается вплоть до комнатной температуры (рис. 2, кривая 2).

Спектральная зависимость вертикальной ФП при напряжении +0.5 В приведена на рис. 2 (кривая 3). Смена знака поданного напряжения слабо влияла на результаты измерений. На длинноволновом крае вертикальная ФП практически совпадает с продольной ФП. Линия 0.26 эВ отсутствует, по-видимому, из-за меньшего отношения сигнала к шуму вследствие значительно меньшей площади фотопроектика. В то же время в коротковолновой области линии вертикальной ФП наблюдается голубой сдвиг  $\sim 70$  мэВ относительно продольной ФП. На наш взгляд, особенности вертикальной ФП могут быть связаны с существенным различием приложенных электрических полей: продольная ФП измеряется в электрическом поле меньше 10 В/см, вертикальная — в значительно более сильном электрическом поле,  $\sim 5$  кВ/см. Уширение линии вертикальной ФП структур InGaAs/GaAs с квантовыми точками с ростом приложенного напряжения отмечалось и ранее (например, в работе [5] сообщается о двукратном уширении), однако при этом более сильно выражен красный сдвиг края линии. Зависимость спектра вертикальной ФП от приложенного напряжения и возможность ее перестройки этим полем планируется исследовать в ближайшее время. Кроме того, особенности вертикальной ФП могут быть связаны и с различием спектральных характеристик аппаратных функций двух различных установок, используемых при измерении продольной и вертикальной ФП.

### 3. Заключение

Методом МОГФЭ изготовлены многослойные селективно-легированные структуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками. Показано, что вариация условий роста КТ приводит к длинноволновому сдвигу линий фотолуминесценции при одновременном увеличении расстояния между основным и первым возбужденным уровнями. В сочетании в данными ПЭМ исследование ФЛ доказывает изменение не только размеров, но и формы КТ — возрастает отношение вертикальных и латеральных размеров КТ. В этих структурах вплоть до 300 К наблюдается продольная фотопроводимость в ближнем ИК диапазоне (0.8–1.2 эВ, 1–1.5 мкм), связанная с межзонными переходами в КТ. В диапазоне температур до 110 К наблюдается несколько линий продольной внутризонной фотопроводимости в среднем ИК диапазоне (0.25–0.49 эВ, 2.5–5 мкм) при нормальном падении излучения, максимальное значение ФП достигается при 62 К. Вертикальная ФП в среднем ИК диапазоне (линии 0.36 и 0.55 эВ) наблюдалась на меза-структурах с входным окном для излучения  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>, что сопоставимо с геометрическими размерами элементов в матричных фотоприемниках.

Работа поддержана РФФИ, гранты № 03-02-16780, 03-02-17404, 04-02-17180 и программами Министерства промышленности, науки и технологий.

### Список литературы

- [1] J. Phillips. *J. Appl. Phys.*, **91** (7), 4590 (2002).
- [2] H.C. Li, J.-Y. Duboz, R. Dudek, Z.R. Wasilewski, S. Fafard, P. Finnie. *Physica E*, **17**, 631 (2003).
- [3] S.-Y. Tang Lin, S.-C. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **78** (17), 2428 (2001).
- [4] A.D. Stiff, S. Krishna, P. Bhattacharya, S. Kennerly. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (3), 421 (2001).
- [5] A.D. Stiff, S. Krishna, P. Bhattacharya, S. Kennerly. *IEEE J. Quant. Electron.*, **37** (11), 1412 (2001).
- [6] S.-Y. Lin, Y.-J. Tsai, S.-C. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (4), 752 (2003).
- [7] B. Aslan, H.C. Liu, M. Korkusinski, S.-J. Cheng, P. Hawrylak. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (4), 630 (2003).
- [8] L.D. Moldavskaya, V.I. Shashkin, M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, V.M. Daniltsev, A.V. Murel, B.A. Andreev, A.N. Yablonsky, S.A. Gusev, D.M. Gaponova, O.I. Khrykin, A.Yu. Luk'yanov, E.N. Sadova. *Physica E*, **17**, 634 (2003).
- [9] J.S. Kim, J.H. Lee, S.U. Hong, W.S. Han, H.-S. Kwack, C.W. Lee, D.K. Oh. *J. Appl. Phys.*, **94** (10), 6603 (2003).
- [10] U.H. Lee, Y.D. Jang, H. Lee, D. Lee, J.S. Kim, J.Y. Leem, S.K. Noh. *Physica E*, **17**, 129 (2003).
- [11] В.И. Шашкин, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская, А.В. Мурель, А.В. Германенко, Г.М. Миньков. *Тез. докл. VI Росс. конф. по физике полупроводников* (Санкт-Петербург, 2003) с. 403.
- [12] G. Saint-Girons, G. Patriarche, A. Mereuta, I. Sagnes. *J. Appl. Phys.*, **91** (6), 3859 (2002).

- [13] G. Saint-Girons, I. Sagnes. J. Appl. Phys., **91** (12), 10 115 (2002).
- [14] L.D. Moldavskaya, V.I. Shashkin, M.N. Drozdov, V.M. Daniltsev, A.V. Antonov, A.N. Yablonsky. Acta Phys. Polon. A, **103** (6), 579 (2003).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **The 3–5 $\mu\text{m}$ photoconductivity of InGaAs/GaAs quantum dot heterostructures**

*A.V. Antonov, D.M. Gaponova, V.M. Daniltsev, M.N. Drozdov, L.D. Moldavskaya, A.V. Murel, V.I. Shashkin*

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Selectively doped multilayer InGaAs/GaAs structures with quantum dots (QD) were grown by the low-pressure metalorganic chemical vapor deposition. We have observed the long wavelength photoluminescence shift when the In supply was varied during the QD formation. Photoluminescence and transmission electron microscopy measurements showed the change of QD shape with increasing aspect ratio. The spectral lines of normal-incidence intersubband photoconductivity in the mid-infrared range (from 2.5 to 5  $\mu\text{m}$ ) have been observed up to 110 K at lateral and vertical geometry of electron transport.