

## Влияние разориентации подложки на распределение квантовых точек по размерам в системе InAs/GaAs

© Д.Г. Васильев, В.П. Евтихийев, В.Е. Токранов, И.В. Кудряшов, В.П. Кочерешко

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

Исследованы эффекты влияния разориентации подложки (001) GaAs в направлении [010] на распределение квантовых точек InAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием эффектов самоорганизации, по размерам и положению в матрице GaAs. Обнаружено температурное сужение линии экситонной фотолюминесценции массива квантовых точек, вызванное перераспределением фотовозбужденных носителей между точками разного размера.

В условиях быстрого развития микроэлектроники в последнее время интересы исследователей смещаются в область все более малых нанобъектов, от изучения полупроводниковых квантовых ям к изучению квантовых нитей и квантовых точек (QD). Одной из главных задач технологии получения QD является задача создания максимально однородных массивов точек. Для использования QD в гетеролазерах необходимо также иметь возможность контролируемым способом получать массивы QD с заданной плотностью точек. Решение этих задач достигается при использовании самоорганизации [1]. При этом удается достигнуть высокой однородности распределения точек по размерам с разбросом  $\pm 10\%$  [2]. Однако при повышении плотности точек на идеальных подложках с ориентацией (001) наблюдаются эффекты коалесценции, когда соседние точки сливаются. Эффективность фотолюминесценции (ФЛ) таких точек падает из-за развития в них дислокаций. Это существенно ограничивает максимальную плотность люминесцирующих QD в системе InAs/GaAs.

Недавно была разработана методика выращивания однородных массивов QD InAs/GaAs с использованием разориентированных в направлении [010] подложек [3]. На таких поверхностях возникают ступени с направлениями [110] и  $[-110]$ . Пересечение этих ступеней может создавать сеть изолированных фрагментов террас, состоящих из последовательных уширений и сужений, ограниченных ступенями со всех сторон, причем QD, выращенные на таких поверхностях, располагаются преимущественно в уширениях террас (рис. 1). Это делает процесс формирования точек контролируемым и позволяет получать массивы QD с достаточно большой плотностью и однородностью.

В данной работе использовались образцы квантовых точек, выращенные методом МПЭ в системе InAs/GaAs с использованием эффектов самоорганизации на разориентированных подложках GaAs с углом разориентации в  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ . С целью достижения максимальной плотности точек эффективная толщина InAs выбиралась равной 2.3 монослоя.

Увеличение угла разориентации приводит к увеличению плотности террас и, соответственно, к уменьшению их размера. Ширина террас, измеренная методом атомно-силовой микроскопии на аналогичных структурах, составляла: для  $1^\circ$  —  $500 \text{ \AA}$ ,  $2^\circ$  —  $360 \text{ \AA}$ ,  $4^\circ$  —  $300 \text{ \AA}$ ,

$6^\circ$  —  $250 \text{ \AA}$  [5]. Точкам энергетически выгодно вырастать в углах уширенных фрагментов террас, однако они образуются и в других местах террас. В работе исследованы спектры фотолюминесценции (ФЛ) ансамбля QD в зависимости от угла разориентации подложки в температурном интервале от 6 до 200 К. Спектры возбуждались HeNe-лазером с интенсивностью  $1 \text{ W/cm}^2$ .

На рис. 2, а представлены спектры ФЛ, снятые при температуре 6 К от структуры с QD с разориентацией подложки  $1^\circ$ . В спектре выделяются два неоднородно уширенных контура ФЛ. Каждый из этих контуров имеет гауссову форму с шириной  $\propto 80 \text{ meV}$ . Максимумы этих контуров смещены друг относительно друга на величину  $\propto 100 \text{ meV}$ . Неоднородное уширение каждого из наблюдаемых пиков ФЛ связано с разбросом QD по размерам. Простая оценка этого разброса  $\frac{\delta E}{E} \approx 2 \frac{\delta R}{R}$  (где  $E$  — энергия размерного квантования,  $R$  — размер точки) показывает высокую однородность полученных массивов QD с разбросом  $\frac{\delta R}{R} \approx \pm 8\%$ .

Наличие двух пиков ФЛ указывает на существование в образце двух массивов QD с разным средним размером. Средний размер точек в этих массивах отличается на  $\propto 15\%$  [2]. Один из массивов QD мы связываем

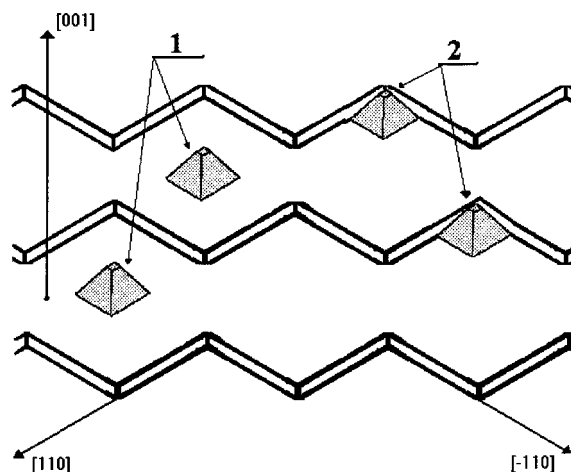
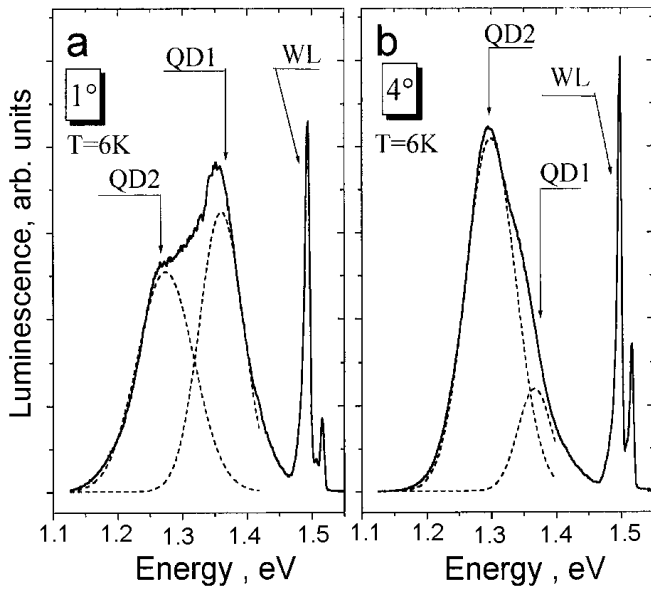


Рис. 1. Схематическое изображение структуры с квантовыми точками (темные пирамидки) в системе InAs/GaAs. Позиции 1 и 2 указывают два возможных расположения точек на террасах разориентированной подложки.



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции исследуемых структур при  $T = 6\text{ K}$ . *a* — спектр от образца с разориентацией  $1^\circ$ , *b* — от образца с разориентацией  $4^\circ$ . QD1 и QD2 — два гауссовых распределения (штриховые линии), которыми аппроксимировались линии фотолуминесценции квантовых точек. Пик WL (“wetting layer”) соответствует излучению смачивающего слоя.

с точками, выросшими в углах уширенных фрагментов террас (позиция 2 на рис. 1). Такие точки должны иметь больший средний размер (по сравнению с точками, выросшими в центрах террас) из-за частичной релаксации напряжения в InAs точках на границе с другой террасой. Другой массив QD связан с точками, которые спонтанно образовались на плоских участках террас (положение 1 на рис. 1). Такие точки должны иметь в среднем меньший размер по сравнению с точками в позиции 2. Соответственно максимум ФЛ первой группы точек расположен в области больших длин волн по сравнению с максимумом второй группы. При увеличении угла разориентации подложки плотность террас возрастает, средний размер террасы падает и, следовательно, относительное число QD первой группы должно возрастать. На рис. 2, *b* представлен спектр ФЛ при  $T = 6\text{ K}$  от структуры с QD с углом разориентации подложки  $4^\circ$ . Перераспределение интенсивности ФЛ двух групп QD указывает на относительное увеличение числа QD, выросших в углах террас.

Сильные изменения спектров ФЛ системы QD наблюдались при повышении температуры (рис. 3). Повышение температуры приводит к длинноволновому сдвигу спектра ФЛ QD, заметно превосходящему температурный сдвиг зон InAs и GaAs (рис. 3). Помимо сдвига спектра ФЛ с ростом температуры наблюдается сужение линий ФЛ. При  $T = 200\text{ K}$  во всех исследованных образцах спектр ФЛ оказывался похожим, с одним максимумом в районе  $\approx 1.2\text{ eV}$  и шириной  $\approx 70\text{ meV}$ .

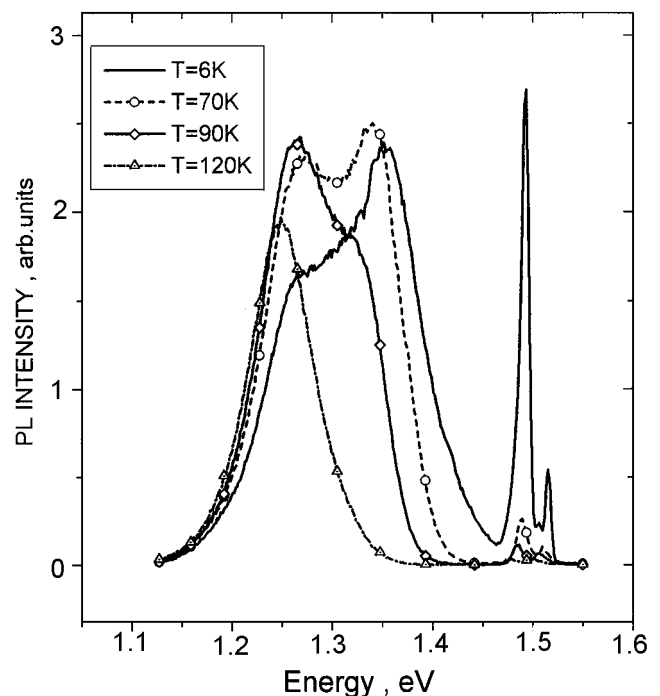
Такая модификация спектра ФЛ объясняется перераспределением фотовозбужденных носителей между

точками [4]. При низкой температуре нерезонансное фотовозбуждение заселяет все точки равномерно. Если время туннелирования носителей между точками больше времени излучательной рекомбинации электрона и дырки в точке, то в спектре будет наблюдаться излучение от точек всех размеров.

С повышением температуры растет вероятность туннелирования носителей между точками. В результате преимущественно заселяются все более глубокие точки, в которых и будет происходить излучательная рекомбинация. Линия ФЛ в этих условиях будет смещаться в длинноволновую сторону. Наличие такого температурного перераспределения фотовозбуждения указывает на высокую плотность квантовых точек, среднее расстояние между которыми не должно превосходить  $150\text{ \AA}$  (из расчетов длины туннелирования).

Ширина линии ФЛ определяется конкуренцией между вероятностью излучательной рекомбинации и вероятностью ухода носителей в более глубокую точку. Поскольку распределение точек по размерам ограничено, линия ФЛ с повышением температуры будет становиться уже.

Таким образом, в структурах с квантовыми точками в системе InAs/GaAs, выращенных на разориентированных подложках, в спектрах ФЛ при низких температурах наблюдались массивы точек двух характерных размеров, отличающихся на 15%. Разброс точек по размерам внутри каждого из массивов не превышал  $\pm 8\%$ . С повышением температуры обнаружено перераспределение фотовозбужденных носителей между точками в пользу точек в большем размере.



**Рис. 3.** Спектры фотолуминесценции структуры с разориентацией  $1^\circ$  при разных температурах.

Авторы благодарят А.В. Платонова за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 95-02-06038) и программы "Наноструктуры" Российского министерства науки.

## Список литературы

- [1] D. Leonard, K. Pond, P.M. Petroff. Phys. Rev. **B50**, 11 687 (1994).
- [2] J.-Y. Marzin, J.-M. Gerard, A. Izrael, D. Barrier, G. Bastard. Phys. Rev. Lett. **73**, 716 (1994).
- [3] A.B. Komissarov, V.P. Evtikhiev, A.K. Kryganovskii, A.N. Titkov, M. Ichida, A. Nakamura. Proc. 23rd Int. Conf. Compound Semiconductors (st. Petersburg, 1996). Inst. Phys. Conf. Ser. / Ed. M. Shur, R. Suris. (1996). N 155. Ch. 3. P. 351–354.
- [4] A. Patane, M. Grassi Alessi, F. Intonti, A. Polimeni, M. Capizzi, F. Martelli, M. Geddo, A. Bosacchi, S. Franchi. Proc OECS-5 / Ed. R.G. Ulbrich. Goettingen (1997).
- [5] А.В. Евтихийев, В.Е. Токранов, А.К. Крыжановский, А.М. Бойко, Р.А. Сурис, А.Н. Титков, А. Накамура, М. Ичида. ФТП, **5**, (1998).