

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° , 2° , 4° , 6° . 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° — 500 \AA , 2° — 360 \AA , 4° — 300 \AA ,

6° — 250 \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 W/cm^2 .

На рис. 2, а представлены спектры ФЛ, снятые при температуре 6 К от структуры с QD с разориентацией подложки 1° . 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

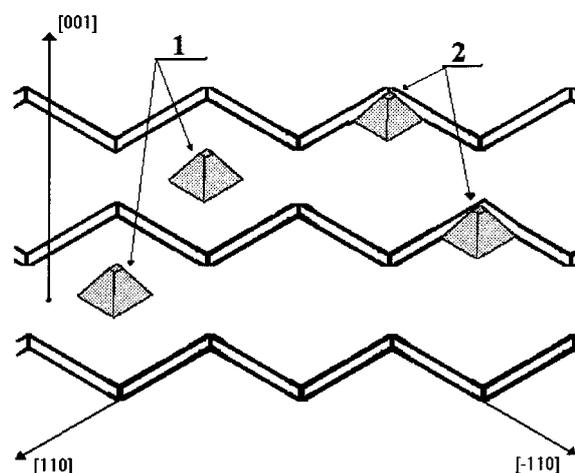


Рис. 1. Схематическое изображение структуры с квантовыми точками (темные пирамидки) в системе InAs/GaAs. Позиции 1 и 2 указывают два возможных расположения точек на террасах разориентированной подложки.

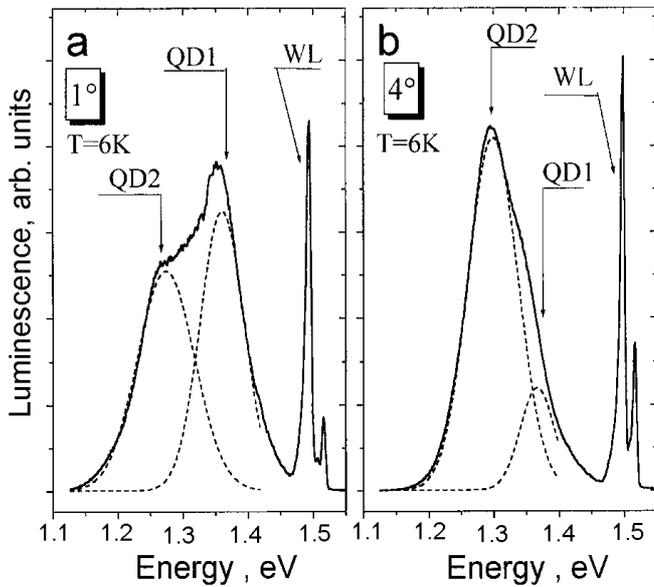


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции исследуемых структур при $T = 6\text{ K}$. *a* — спектр от образца с разориентацией 1° , *b* — от образца с разориентацией 4° . QD1 и QD2 — два гауссовых распределения (штриховые линии), которыми аппроксимировались линии фотолуминесценции квантовых точек. Пик WL (“wetting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

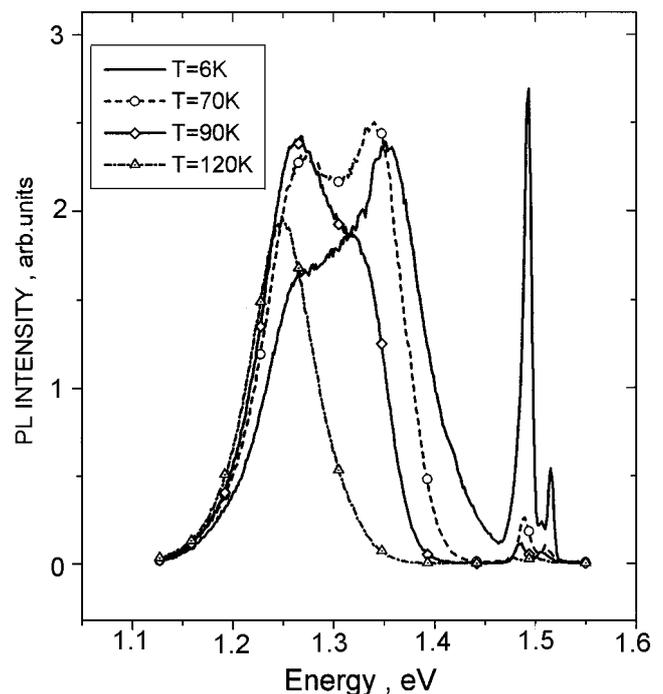


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции структуры с разориентацией 1° при разных температурах.

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).