

Латеральное объединение вертикально связанных квантовых точек

© А.Ф. Цацульников, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Б.В. Воловик, А.А. Суворова, Н.А. Берт, П.С. Копьев

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

(Получена 20 ноября 1996 г. Принята к печати 25 ноября 1996 г.)

Исследована модификация структурных и оптических свойств вертикально связанных квантовых точек $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ в матрице GaAs, связанная с увеличением количества осажденных слоев квантовых точек. Было показано, что осаждение последовательности плоскостей $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ квантовых точек, разделенных узкими (порядка высоты квантовых точек) прослойками GaAs, приводит к появлению взаимодействия между соседними вертикально связанными квантовыми точками. Это взаимодействие вызывает смещение линии фотолюминесценции, связанной с рекомбинацией неравновесных носителей через состояния квантовых точек, в область меньших энергий фотонов.

В последнее время большой интерес связан с объектами, имеющими ограничение по трем пространственным направлениям, — квантовыми точками (КТ). Это обусловлено развитием метода получения КТ, основанного на эффекте спонтанной трансформации на островки тонкого слоя одного материала, осажденного на поверхность другого материала с отличающейся постоянной решетки [1,2]. Наиболее широко исследуются КТ, формирующиеся при осаждении слоя $(\text{In}, \text{Ga})\text{As}$ на поверхность GaAs(100). Эти КТ характеризуются отсутствием дислокаций несоответствия и высокой эффективностью фотолюминесценции (ФЛ). На основе массива КТ $(\text{In}, \text{Ga})\text{As}$ были созданы инжекционные полупроводниковые лазеры, обладающие высокой характеристической температурой и низкой пороговой плотностью тока [3,4].

Значительно улучшить рабочие характеристики лазеров можно путем использования в качестве активной области массива вертикально связанных КТ (ВСКТ), т.е. последовательности плоскостей КТ, разделенных узкими прослойками широкозонного материала. Как было показано в работах [5,6], при этом образование КТ каждого последующего ряда происходит над КТ предыдущего ряда. Взаимодействие электронных уровней КТ соседних рядов обуславливает увеличение энергии локализации и, соответственно, уменьшение вероятности теплового выброса носителей из основного состояния КТ в более высоко лежащие состояния. Кроме того, мультиплицирование КТ приводит к возрастанию перекрытия световой волны с активной областью и, следовательно, к увеличению усиления при инверсии заселенности. Использование массива вертикально связанных КТ в качестве активной области позволило увеличить температурную стабильность инжекционных лазеров (достичь характеристической температуры $T_0 \approx 400$ К в диапазоне температур $80 \div 170$ К) и понизить пороговую плотность тока ($J_{th} \approx 100$ А/см² при 300 К) [7].

Как было показано в работе [8], при вертикальном совмещении нескольких слоев КТ, разделенных узкими (порядка высоты КТ) прослойками GaAs, происходит возрастание латеральных размеров КТ верхних рядов и, следовательно, уменьшение расстояния между отдельными КТ в плоскости структуры. Это в конечном счете

может вызвать латеральное взаимодействие соседних ВСКТ и, следовательно, увеличить энергию локализации носителей. Как отмечалось выше, увеличение энергии локализации является одним из способов улучшить характеристики полупроводниковых лазеров и, кроме того, дает возможность сместить длину волны генерации в спектральную область вблизи ~ 1.3 мкм, важную с точки зрения практического применения. В данной работе мы исследуем изменение структурных и оптических свойств вертикально связанных КТ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ в матрице GaAs, связанное с увеличением количества осажденных слоев КТ.

Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber-32 на подложках GaAs(100). Эффективная толщина слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ в каждом цикле осаждения составляла 12 Å, ширина прослоек GaAs равнялась 50 Å. Формирование КТ контролировалось по картине дифракции быстрых электронов. Количество повторяющихся слоев $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ варьировалось от образца к образцу в пределах $N = 1 \div 20$. ФЛ возбуждалась Ar⁺-лазером с энергией кванта ~ 2.54 эВ и плотностью возбуждения ~ 100 Вт/см² и регистрировалась Ge-фотоприемником.

На рис. 1 показаны изображения КТ в структуре с $N = 20$ плоскостями КТ InGaAs, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Латеральные размеры КТ составляют ~ 300 Å и, как видно, происходит образование вытянутых конгломератов перекрывающихся КТ, которые мы называем латеральным объединением ВСКТ. Кроме того, как видно из изображения поперечного сечения (рис. 1, с), начиная с $N = 10$ взаимодействие между ближайшими КТ приводит к тому, что наблюдаются отклонения от строго вертикального совмещения для КТ, расположенных в верхних слоях. Обе эти причины приводят к уменьшению расстояния между ближайшими ВСКТ и к перекрытию соседних ВСКТ.

Спектры ФЛ при $T = 77$ К структур, содержащих разное число плоскостей КТ InGaAs, приведены на рис. 2. В спектрах образцов, содержащих один, три и шесть слоев КТ, видна одна линия (QD), обусловленная рекомбинацией неравновесных носителей через основное состояние

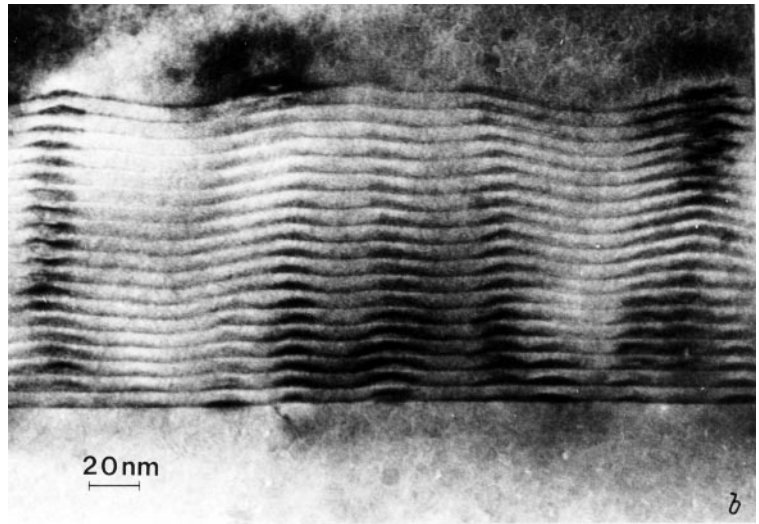
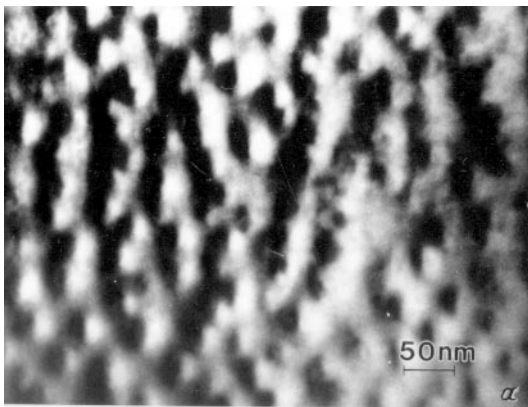


Рис. 1. Темнопольное изображение структуры с 20 слоями КТ в планарной геометрии (а) и светлопольное изображение (b) в поперечном сечении ($g = 200$).

ВСКТ. Увеличение циклов осаждения до 10 приводит к появлению в спектре новой полосы ФЛ (CQD), сдвинутой относительно линии QD в длинноволновую сторону (рис. 3), что свидетельствует об увеличении характеристического размера ВСКТ. Дальнейшее увеличение числа плоскостей КТ до 20 вызывает относительное падение интенсивности полосы QD и доминирование в спектре ФЛ линии CQD.

Такое поведение ФЛ согласуется с данными просвечивающей электронной микроскопии, также свидетельствующей, что увеличение циклов осаждения слоев $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ приводит к латеральному перекрытию ближайших ВСКТ. Совместный эффект уменьшения высоты и ширины потенциального барьера между соседними ВСКТ обуславливает уменьшение энергии размерного квантования и смещает энергию оптического перехода в сторону меньших значений (рис. 4). Рекомбинация через состояния взаимодействующих КТ и вызывает появление в спектре ФЛ линии CQD.

Смещение полосы QD с увеличением числа плоскостей $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ можно описать в рамках теории возмущений, предполагая, что взаимодействие между носителями, локализованными в совмещенных КТ, является слабым [9,10]. Предполагая, что существует только взаимодействие между энергетическими состояниями соседних слоев КТ, смещение максимума линии ФЛ в образце с N плоскостями КТ (E_n) по отношению к положению максимума линии в спектре структуры с одним слоем КТ (E_1) $\Delta E_{max}(N) = (E_1 - E_N)$ может быть получено из равенства нулю следующего определителя:

$$\begin{vmatrix} E_1 - E_n & \Delta & 0 & 0 \\ \Delta & E_1 - E_N & \Delta & 0 \\ 0 & \Delta & E_1 - E_N & \Delta \\ 0 & 0 & \Delta & E_1 - E_N \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} = 0,$$

где $\Delta = \Delta_c + \Delta_h$; $\Delta_c(\Delta_h)$ — матричный элемент, описывающий взаимодействие электронов (дырок), локализованных в соседних совмещенных КТ. Аппроксимация экспериментальной зависимости $E_{max}(N)$, расчетной при $\Delta = 45$ мэВ, показана на рис. 3. При $N > 10$ наблюдается расхождение экспериментальной и теоретической зависимостей, что, по-видимому, обусловлено возникновением латерального перекрытия соседних ВСКТ.

На рис. 5 приведены спектры ФЛ, снятые при различных температурах, для структуры с 20 плоскостями КТ. При $T \approx 10$ К доминирующей в спектре явля-

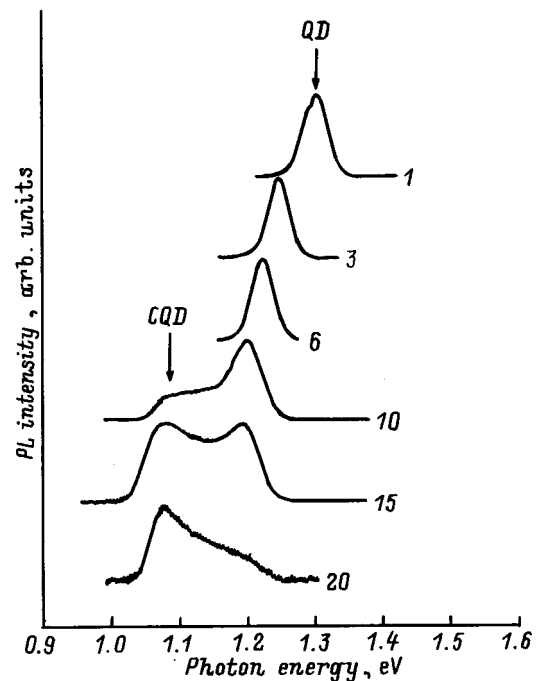


Рис. 2. Спектры ФЛ исследованных структур при $T = 77$ К. Цифры у кривых — число плоскостей КТ в структуре.

ется линия *QD*. Увеличение температуры приводит к уменьшению интенсивности этой линии и практическому ее исчезновению при температуре выше ~ 80 К. На рис. 6, *a* показаны зависимости отношения интегральных интенсивностей линий *QD* и *CQD* от температуры для образцов с разным числом плоскостей КТ. Как видно из этого рисунка, если для структуры с 10 слоями КТ доминирующей в области низких температур ($T < \sim 170$ К) является полоса *QD*, то в спектре образца с 20 слоями КТ преобладающей во всем температурном диапазоне становится линия *CQD*. Увеличение температуры приводит к сильному падению интенсивности линии *QD* относительно интенсивности полосы *CQD*. Эти факты свидетельствуют о том, что увеличение числа циклов

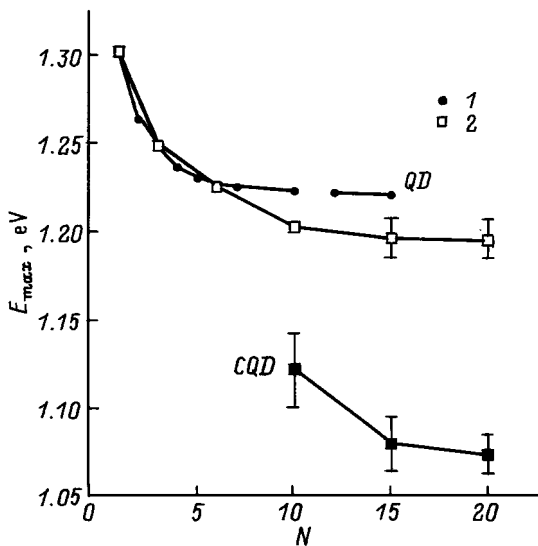


Рис. 3. Зависимость положения максимума линий *QD* и *CQD* от количества осажденных плоскостей КТ. 1 — теория, 2 — эксперимент.

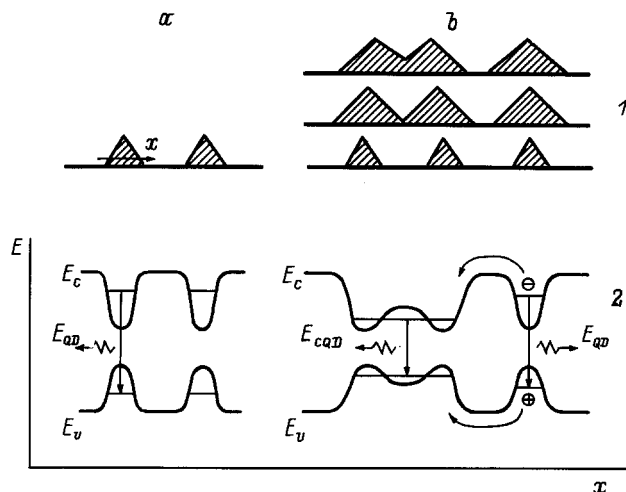


Рис. 4. Схематическое изображение поперечного сечения (1) и зонной диаграммы (2) структур с неперекрывающимися (а) и перекрывающимися (b) ВСКТ.

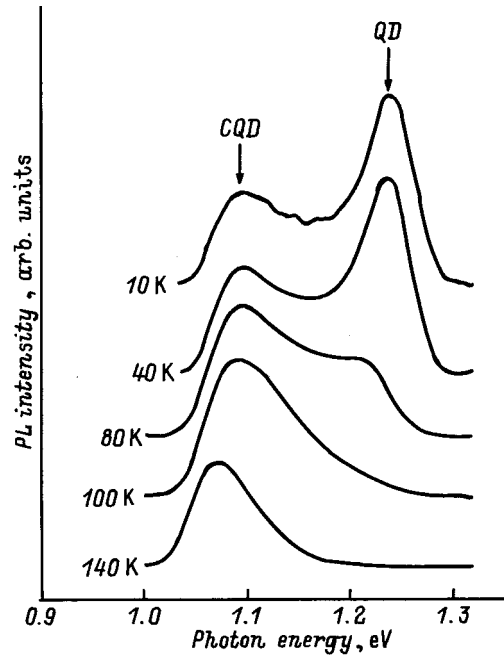


Рис. 5. Спектры ФЛ структуры с 20 слоями КТ при разных температурах.

осаждения $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ приводит к возрастанию числа перекрывающихся ВСКТ (рис. 4, *b*). При низкой температуре переходы электронов и дырок между ВСКТ затруднены и форма полосы ФЛ определяется формой распределения по энергии плотности состояний массива ВСКТ. С увеличением температуры возрастает вероятность транспорта и релаксации носителей в состоянии с большей энергией локализации. Это вызывает значительное по сравнению с изменением ширины запрещенной зоны смещение максимума линии *CQD* в длинноволновую сторону и уменьшение ее ширины с ростом температуры (рис. 6, *b, c*).

Увеличение количества осажденных слоев КТ приводит к тому, что падение интенсивности полосы *QD* начинается при меньших значениях температуры (рис. 6, *d*). Это свидетельствует о том, что энергия активации процесса, обуславливающего падение интенсивности полосы *QD* с ростом температуры, уменьшается с увеличением числа циклов осаждения $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. В то же время энергия локализации носителей в состоянии, с которым связана линия ФЛ *QD*, увеличивается с возрастанием числа осажденных слоев КТ, как следует из длинноволнового сдвига полосы *QD* при увеличении числа *N*. Это подтверждает сделанное выше предположение о возрастании вероятности транспорта неравновесных носителей между КТ и релаксации их в состоянии с меньшей энергией размерного квантования, обусловленные латеральным объединением ВСКТ. Из полученных экспериментальных зависимостей (рис. 6, *d*) можно оценить энергию активации данного процесса, которая составляет 13 ± 5 , 17 ± 5 и 20 ± 5 мэВ для структур с $N = 20$, 15 и 10 соответственно.

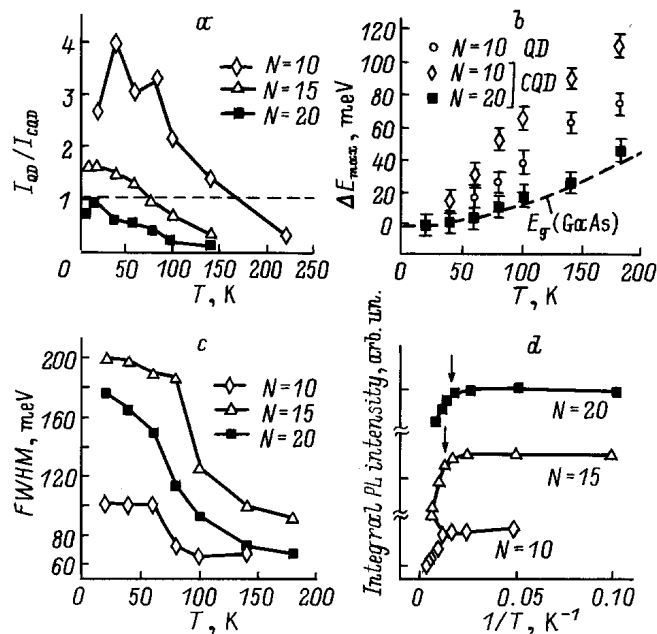


Рис. 6. Температурные зависимости: *a* — отношения интенсивностей линий QD и CQD; *b* — смещения положения максимума линий QD и CQD $\Delta E_{max}(T) = (E_{max}(T=0) - E_{max}(T))$; *c* — ширины на половине высоты полосы CQD; *d* — интегральной интенсивности линии QD.

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что осаждение последовательности плоскостей $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ КТ, разделенных узкими (порядка высоты КТ) прослойками GaAs, приводит к появлению взаимодействия между соседними ВСКТ. Это взаимодействие вызывает смещение линии ФЛ, связанной с рекомбинацией неравновесных носителей через состояний КТ, в область меньших энергий фотонов. Латеральное объединение ВСКТ дает дополнительную возможность управления электронным спектром и длиной волны излучения структур с КТ.

Работа в разных частях поддерживалась Российским Фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-17824), Фондом Volkswagen и грантом INTAS-94-1028.

Список литературы

- [1] L. Goldstein, F. Glass, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G.Le. Roux. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 1099 (1985).
- [2] P.M. Petroff, S.P. Den Baars. *Superlat. Microstruct.*, **15**, 15 (1994).
- [3] Ж.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. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 351 (1996).
- [4] Ж.И. Алфёров, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, И.В. Кочнев, В.В. Комин, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, С.С. Рувимов, А.В. Сахаров,

А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг. *ФТП*, **30**, 357 (1996).

- [5] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, N. Kobayashi. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 2542 (1995).
- [6] А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Н.А. Берг, А.О. Косоогов, Д. Бимберг, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **30**, 1682 (1996).
- [7] N.N. Ledentsov. *23rd Int. Conf. on the Physics of Semiconductors*, ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann (World Scientific, Singapore 1996) p. 19.
- [8] N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, O. Schmidt, R. Heitz, J. Bohrer, D. Bimberg, V.M. Ustinov, V.A. Shchukin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, A.O. Kosogov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich. *7th Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures*, Madrid, Spain 1995 [*Sol. St. Electron.*, **40**, 785 (1996)].
- [9] А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, В.М. Устинов, Б.В. Воловик, И.Л. Крестников, А.Р. Ковш, А.В. Сахаров, Н.А. Берг, П.С. Копьев, Д. Бимберг, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **30**, 1822 (1996).
- [10] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Квантовая механика* с. 167.

Редактор В.В. Чалдышев

Lateral association of vertically coupled quantum dots

A.F. Tsatsul'nikov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, A.A. Suvorova, N.A. Bert, P.S. Kop'ev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Modification of the structure and optical properties of vertically coupled $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ quantum dots in GaAs matrix, associated with the increase in the number of quantum dot layer deposition cycles, has been investigated. We have shown that depositing the series of the $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ quantum dot planes separated by thin (about the quantum dot height) GaAs spacers leads to an interaction between the nearest vertically coupled quantum dots. This effect induced shift of the photoluminescence line associated with the recombination of the nonequilibrium carries via the states of quantum dots to long wavelengths.