

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СВОЙСТВА МОНОСЛОЙНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdTe/ZnTe

М.Б.Шарибаев – кандидат физико-математических наук
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Ш.К.Каландарова – докторант

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажиязия

Таянч сўзлар: квант нуқта, монокатлам, кристалл панжара, фотолюминесценция, фотоқўзғалиш.

Ключевые слова: квантовая точка, монослой, кристаллическая решетка, фотолюминесценция, фотовозбуждение.

Key words: quantum dot, monolayer, crystal lattice, photoluminescence, photoexcitation.

Введение. Поскольку фотолюминесцентные свойства однослойных квантовых точек CdTe / ZnTe недостаточно изучены, мы попытались изучить это более подробно в этой статье. В последнее время наблюдается большой интерес к изучению свойств слоев полупроводниковых материалов с несовпадением параметров решетки. В таких слоях создаются благоприятные условия для образования самоорганизующихся квантовых точек.

Литература и метод. Система CdTe/ZnTe с широкой запрещенной зоной представляет собой объект текущего интереса из-за ее потенциального применения в коротковолновых оптоэлектронных устройствах, но большое несовпадение решеток (6,4%) значительно затрудняет выращивание высококачественной структуры CdTe/ZnTe (2 В большинстве экспериментов, о которых сообщалось до настоящего времени [1], изучались точки с размерами, превышающими радиус Бора экситона [3-5]. Например, типичный размер I-VI CdSe QD, где радиус Бора экситона равен 3 нм, варьируется от немного большего этого значения [3] до даже 15 нм в диаметре. В таких случаях утечка волновых функций экситонов в барьеры, как ожидается, не изменится значительно для распределений размеров квантовых точек в ансамбле. Следовательно, для больших квантовых точек не наблюдается зависимости взаимодействия экситонов с фононами от размера. Подробные измерения ФЛ, фотолюминесцентного возбуждения (ФЛВ) и резонансной ФЛ-спектроскопии на аналогичных системах приведены в литературе [1,5]. Для изучения процессов возбуждения носителей в CdTe/ZnTe SAQD использовались возбуждения с энергией ниже энергии запрещенной зоны ZnTe, чтобы определить основные механизмы возбуждения носителей в CdTe QD [5]. В наших более ранних работах мы использовали спектроскопию дальнего инфракрасного излучения [6], рамановскую спектроскопию [7] и резонансную рамановскую спектроскопию [8] для исследования структурных и фононных свойств CdTe/ZnTe SAQD. Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs, на которую был нанесен буферный слой CdTe.

Обсуждение. После нанесения слоя ZnTe толщиной 0,6 мкм было нанесено 3 или 12 монослоев CdTe для формирования случайного распределения квантовых точек. Высокое несовпадение параметров решетки CdTe (6,482 Å) и ZnTe (6,104 Å) провоцирует скопление

молекул CdTe и образование квантовых точек. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) были возбуждены несколькими линиями Ar-лазера (514,5 нм, 501,7 нм, 496,5 нм, 488 нм) и Kr-лазера (647,5 нм), измеренными с помощью монохроматора МДР- с использованием обычной системы фотоподсчета. Все линии Ar-лазера возбуждают экситоны над барьерным слоем ZnTe. В случае возбуждения аргоновым лазером спектры ФЛ демонстрировали два основных пика излучения. Типичные спектры ФЛ представлены на рисунках 1 и 2. Зарегистрированные полосы разделены, и не потребовалось дополнительного анализа для отслеживания температурной зависимости энергий, соответствующих максимальному излучению этих полос. Результаты всех измерений представлены на рисунке 4. Мы подчеркиваем положения пиков для температур в конце интервала измерения. В случае 3 монослоев мы имеем 2,26 эВ (E_1) и 1,84 эВ (E_2) при $T = 300$ К, а также 2346 эВ (E_1) и 2,17 эВ (E_2) при $T = 20$ К. Изменение энергии E_1 составляет около 85 мэВ, а изменение E_2 составляет около 330 мэВ. Красный сдвиг высокоэнергетического пика E_2 с увеличением температуры имеет тот же порядок, что и сдвиг, который можно было бы ожидать от вызванного температурой сужения запрещенной зоны ZnTe. Этот пик регистрируется даже при комнатной температуре. Красный сдвиг низкоэнергетического пика E_1 с увеличением температуры намного больше, чем сдвиг, который можно было бы ожидать от вызванного температурой сужения запрещенной зоны CdTe. В случае 12 монослоев мы имеем 2,307 эВ (E_1) и 2,11 эВ (E_2) при $T=200$ К, а также 2,337 эВ (E_1) и 2,13 эВ (E_2) при $T=20$ К. Изменение энергии E_1 составляет около 30 мэВ, а изменение E_2 составляет около 20 мэВ. Красное смещение обеих полос с увеличением температуры ниже значений, которые можно было бы ожидать от вызванного температурой сужения запрещенной зоны ZnTe и CdTe. Энергии полос изменяются почти линейно с температурой, как показано на рисунке 4. Пик высокой энергии, E_1 , связан с запрещенной зоной барьера ZnTe [9]. Низкочастотная полоса, E_2 , связана с рекомбинацией в квантовых точках CdTe [5].

Результаты. Резонансные процессы МР регистрируются при температуре ниже 200 К. Этот процесс доминирует для QD с высокой энергией излучения, то есть, предположительно, с меньшим размером [5]. Энергии полос изменяются почти линейно с температурой, как показано на рисунке 1.

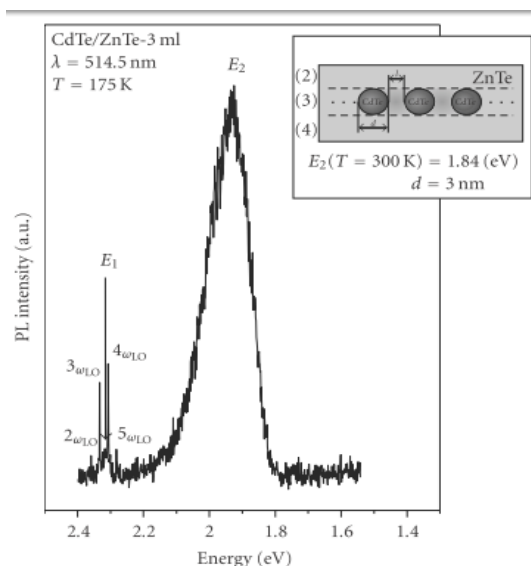


Рис.1 Типичные спектры фотолуминесценции образца с 3 мс CdTe в завершающем слое; спектры фотолуминесценции возбуждаются линией Ar-лазера $\lambda = 514,5$ нм и регистрируются при 175 К. Вставка: схематическое представление структуры SAQD.

Пик высокой энергии, E_1 , связан с запрещенной зоной барьера ZnTe [9]. Низкочастотная полоса, E_2 , связана с рекомбинацией в квантовых точках CdTe [5]. Резонансные процессы МР регистрируются при температуре ниже 200 К. Этот процесс доминирует для QD с высокой энергией излучения, то есть, предположительно, с меньшим размером [5]. Энергии зон изменяются почти линейно с температурой, как показано на рисунке 3. Пик высокой энергии, E_1 , связан с шириной запрещенной зоны барьера ZnTe [9]. Низкочастотная полоса, E , связана с рекомбинацией в квантовых точках CdTe [5]. Резонансные процессы МР регистрируются при температуре ниже 200 К. Этот процесс доминирует для QD с высокой энергией излучения, то есть, предположительно, с меньшим размером [5]. Энергии локализованных состояний в QD, экспериментально зарегистрированные по характеристикам PL-излучения QD, могут быть достаточно хорошо описаны приближением эффективной массы (EMA) с параболическими энергетическими полосами. Расчет электронных переходов выполняется в EMA [10]. Параметры CdTe и ZnTe, эффективные массы, а также смещения проводимости и валентности взяты из литературы [11]. Если предположить сферическую симметрию частицы, то есть, что одна сфера CdTe окружена ZnTe, рассчитанное значение диаметра QD составляет 3 нм в случае 3 монослоев, что соответствует экспериментальному значению E_2 . При добавлении большого количества CdTe между двумя слоями ZnTe ожидается обнаружение более крупных QD. В результате энергия E_2 будет ниже. Это ожидание не оправдалось для образца объемом 12 монослоев; см. рисунок 3. Для объяснения экспериментальных результатов в случае 12 мл мы используем модель наноструктур типа «ядро/оболочка», где QD имеет градиентный состав. Ядро CdTe радиусом r_c окружено концентрическими сферическими слоями, каждый из которых имеет состав $\text{CdZn}_{1-x}\text{Te}$ (x пропорционально расстоянию слоя от центра) и, наконец, от радиуса r_s по $\text{Cd}_{0.1}\text{Zn}_{0.9}\text{Te}$. Мы предполагаем, что электроны и дырки из QD находятся в сферической ступенчатой энергетической яме. Концентрация Cd в окружающем $\text{CdZn}_{1-x}\text{Te}$ постепенно уменьшается до 10% ($x = 0,1$),

шаг за шагом. Мы предположили, что эффективные массы и смещения проводимости и валентности изменяются пропорционально x . Наличие этих промежуточных слоев, как модель градиентного состава, быстро влияет на спектры электронов, дырок и экситонов. Для измеренного E_2 диаметр ядра составляет 1,55 нм, а диаметр внешней сферы — 6,48 нм.

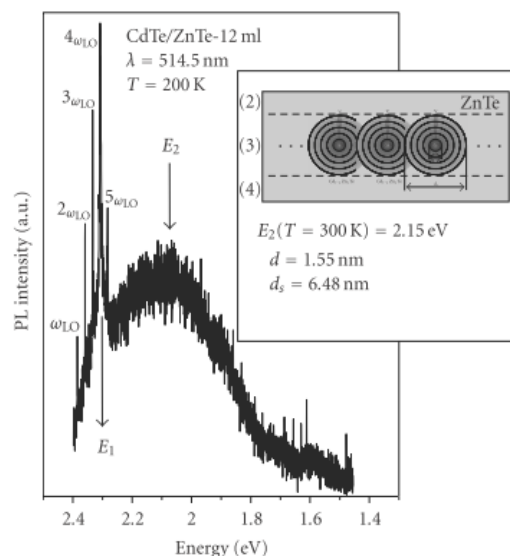


Рис.2. Типичные спектры фотолуминесценции образца с 12 монослой CdTe в завершающем слое; спектры фотолуминесценции возбуждаются линией Ar-лазера $\lambda = 514,5$ нм и регистрируются при 200 К. Вставка: схематическое представление структуры SAQD.

В случае 3 монослоев наблюдается красное смещение низкоэнергетического пика (E_2) с увеличением температуры, которое намного больше, чем смещение, которое можно было бы ожидать от вызванного температурой сужения запрещенной зоны CdTe. По нашему мнению, даже в случае 3 монослоев из-за интердиффузии наблюдаются колебания химического состава QD и распределения размеров QD. Таким образом, мы имеем дело с ансамблем QD различной глубины соответствующих потенциалов. Термически индуцированное перераспределение носителей внутри ансамбля точек вызывает наблюдаемое смещение энергии фотолуминесценции. В отличие от этого, в образце CdTe объемом 12 монослоев все переходы сохраняются благодаря относительно однородной толщине слоя.

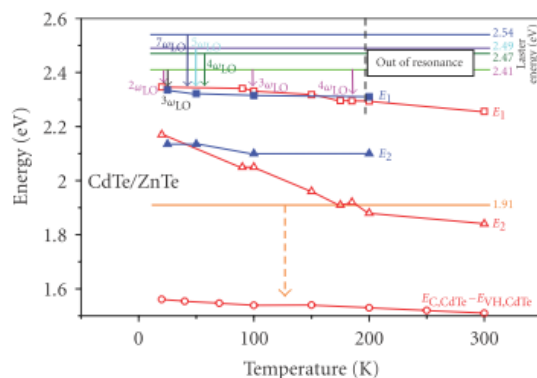


Рис.3. Зависимость пиков свечения ФЛ от температуры и схематическое представление мультифононного (МФ) резонанса. Результаты для образца объемом 3 монослоев представлены открытыми символами, а для образца объемом 12 монослоев — сплошными символами.

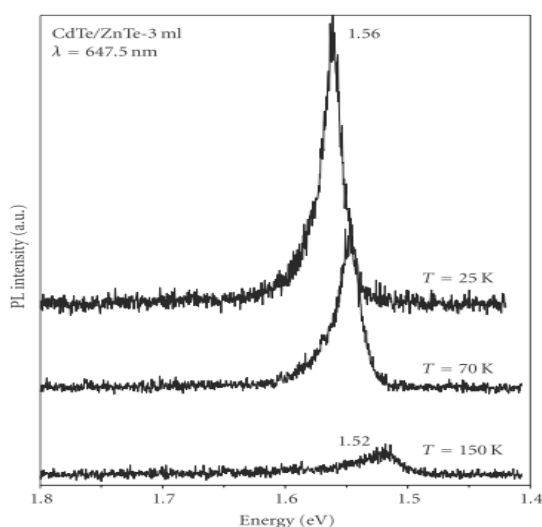


Рис. 4. Типичные спектры фотолуминесценции образца с 3 монослой CdTe в завершающем слое; спектры фотолуминесценции возбуждаются линией Кг-лазера $\lambda=647,5$ нм и регистрируются при различной температуре.

Когда образец возбуждается линией Кг-лазера $\lambda = 647,5$ нм, ФЛ происходит только в буферном слое CdTe, что хорошо видно на рисунках 3 и 4. Температурные зависимости пиков светоизлучения и их интенсивности идентичны зависимостям, зарегистрированным для объемного кристалла CdTe. В принципе, зарегистрированный резонансный процесс MEF

(см. рисунки 2 и 3) может быть описан следующим уравнением: $E_j - K_{hw} = E$; in и E — энергия падающего фотона и энергия перехода электрона, соответственно [9], K_{iw} и E энергия фонона, когда K порядок МР. Излучение МР не регистрируется при $T = 300$ К. Процессы излучения МР регистрируются при температуре ниже $T = 200$ К (для энергии лазера 2,41 эВ, $K = 4$). Уравнение означает, что когда энергия рассеянного фотона приближается к энергии E_1 , линия Рамана становится сильно усиленной. Это схематически представлено стрелками в верхней части рисунка.

Закключение. В данной работе исследуются структурные и оптические свойства самоорганизующихся квантовых точек (SAQD) CdTe/ZnTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Спектры фотолуминесценции состоят из двух основных пиков излучения: высокоэнергетической полосы, связанной с запрещенной зоной барьера, и низкоэнергетической полосы, связанной с рекомбинацией электронов и дырок в квантовых точках CdTe. В этой системе присутствуют два механизма релаксации: релаксация непосредственно в основное состояние экситона квантовой точки CdTe и дезэкситация с помощью оптических фононов. Похоже, что квантовые точки CdTe, встроенные в барьерные слои ZnTe, являются очень эффективными приемниками носителей. Неоднородность гетероструктур CdTe/Cd_xZn_{1-x}Te, моделируемая постепенным влиянием состава, резко влияет на базовую энергию перехода.

Литература

1. Mackowski S. CdTe/ZnTe quantum dots-growth and optical properties. // Thin Solid Films, vol. 412, № 1-2, 2002. – P. 96-106
2. Mackowski S., Karezewski G., Wojtowicz T. et al. Structural and optical evidence of island correlation in CdTe/ZnTe superlattices. // Applied Physics Letters, vol. 78, № 24, 2001. – P. 3884-3886,
3. Kim C.S., Kim M., Lee S. et al. Evidence for 2D precursors and interdiffusion in the evolution of self-assembled CdSe quantum dots on ZnSe. // Physical Review Letters, vol. 85, № 5, 2000. – P. 1124-1127.
4. Kirmse H., Schneider R., Rabe M., Neumann W., and Henneberger B. Transmission electron microscopy investigation of structural properties of self-assembled CdSe/ZnSe quantum dots. // Applied Physics Letters, vol. 72, № 11, 1998. – P. 1329-1331.
5. Nguyen T.A., Mackowski S., Jackson H.E. et al.. Resonant spectroscopy of 2-6 self-assembled quantum dots: excited states and exciton-longitudinal optical phonon coupling. // Physical Review B, vol. 70, № 12, Article ID 125306, 2004. – P.8.
6. Roméevie N., Roméevie M., Kostie R., et al. Far-infrared spectroscopy of CdTe/ZnTe self-assembled quantum dots. // Journal of Alloys and Compounds, vol. 481, № 1-2, 2009. – P. 6-9.
7. Roméevie N., Roméevie M., Kostig R., et al. Resonant Raman spectra of CdTe/ZnTe selfassembled quantum dots. // Acta Physica Polonica A, vol. 116, № 1, 2009. – P. 88-90.
8. Roméevie M., Roméevie M., Kostie R., Stojanovic D., Karczewski G., and Galazka R. Raman spectra of CaTe/ZnTe self-assembled quantum dots. // Microelectronics Journal, vol.40, № 4-5, 2009. – P. 830-831.
9. Zhang S.L., Hou Y.T., Shen M.Y., Li J. and Yuan S.X. Multiphonon Raman scattering resonant with two kinds of excitons in a (CdTe),(Znte),/ZnTe short-period-superlattice multiple quantum wel. // Physical Review B, vol. 47, № 19, 1993. – P. 12937-12940.
10. Шарибаев М., Исмаилов Қ., Каримов И. Оптическое исследование релаксации деформаций и интердиффузии в квантовых ямах ZnSe/ZnCdSe, модифицированных γ -облучением «Илмий хаборнома» Андижан давлат университети, №2, 2020. – С. 102-105.
11. Шарибаев М. Определение методом фотолуминесценции протяженных дефектов в эпитаксиальных пленках ZnTe/GaAs. // Журнал. Физика полупроводников и микроэлектроника. № 4, 2020. – С. 214-216.

РЕЗЮМЕ. Мақолада турли CdTe/ZnTe монокатламли квант нукталарининг фотолуминесанс хоссалари ўлчанганда, тузилмаларнинг экситон қатламлиги ўртасидаги энергия фарқи аниқланди. ФЛ фотолуминесанс спектрларида иккита асосий нурланиш чизиғи аниқланган.

РЕЗЮМЕ. В статье при измерении фотолуминесцентные свойства квантовых точек с разными монослоями CdTe/ZnTe, определены энергетические отличия экситонных областях структур. В спектрах фотолуминесценции ФЛ выявлены две основные полосы излучения.

SUMMARY. The photoluminescent properties of quantum dots with different CdTe/ZnTe monolayers were measured, and the energy differences between exciton regions of the structures were determined. Two main emission bands have been identified in the photoluminescence spectra of PL.