

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР ZnSe С СУБ-МОНОСЛОЯМИ CdSe

А. М. Капитонов

Белорусский государственный медицинский университет,
kapitonov_andrey@bsmu.by

Пространственное ограничение квазичастиц в малой области пространства, сравнимой с их дебройлевской длиной волны, вызывает отличия свойств наноструктур от соответствующих объемных полупроводников [1]. Спектр разрешенных состояний квазичастиц в наноструктуре квантуется, из непрерывного превращаясь в дискретный. Энергия переходов между квантованными состояниями зависит от степени пространственного ограничения, что позволяет направленно изменять свойства наноструктур, варьируя их размеры. Размерная зависимость характерна, в частности, для оптических свойств нановключений CdSe в матрице ZnSe [2, 3]. По числу измерений, в которых полупроводник остается физически неограниченным, различают квазидвумерные (2D) квантовые ямы (QW), квазиодномерные (1D) квантовые проволоки и квазинольмерные (0D) квантовые точки (QD). При эпитаксии нескольких монослоев CdSe на ZnSe имеет место агрегация атомов кадмия [2], образование островковых квантовых точек, находящихся в 2D квантовом слое твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$.

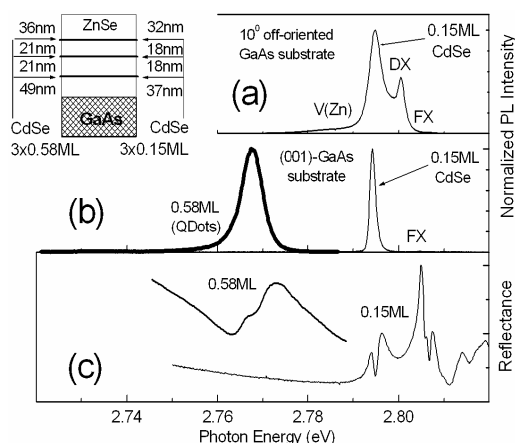


Рис. 1. Нормированные спектры фотолюминесценции (a), (b) и отражения (c) наноструктур CdSe/ZnSe, полученные при 4 К. На (b) показаны спектры образцов, выращенных на (001)-ориентированной GaAs подложке. На (a) – спектр структуры, выращенной на разориентированной на 10° подложке. На вставке в левом верхнем углу показана структура образцов. FX – линии свободных экситонов матрицы ZnSe, DX – экситонов, связанных с донорами матрицы, V(Zn) – люминесценция вакансий цинка в матрице

Локализация в 0D наноструктурах усиливает взаимодействие экситонов с акустическими фононами и ослабляет влияние фононов оптических [4]. При дальнейшем уменьшении наноструктуры, однако, квазичастицы могут частично делокализоваться за счет конечной высоты энергетического барьера. В этой работе представлены оптические свойства наноструктур CdSe/ZnSe с номинальной толщиной CdSe включений всего 0,58 и 0,15 монослоя, обсуждаются характеристики экситонов в таких наноструктурах, включая особенности пространственной локализации экситонов и их взаимодействие с фононами.

Строение исследованных образцов показано на вставке рисунка 1. На подложках GaAs выращены эпитаксиальные пленки селенида цинка толщиной от 100 до 130 нм. Включения кадмия произведены посредством миграционно-усиленной эпитаксии (MEE – migration enhanced epitaxy) [5], один цикл которой давал номинальную толщину CdSe, равную 0,15 монослоя (0,15ML), а три по-

следовательных цикла – 0,58 монослоя (0,58ML). Каждый образец содержит три одинаковых слоя включений, разделенных барьерными слоями селенида цинка. Эксперименты проведены при температуре, не превышающей 5К.

В спектрах люминесценции исследованных наноструктур (рис. 1) доминируют линии рекомбинации экситонов, локализованных на суб-монослойных включениях CdSe. У образцов 0,15ML эти линии расположены в интервале от 2,79 эВ до 2,8 эВ, а у образцов 0,58ML – в интервале 2,76–2,77 эВ. В спектрах отражения (рис. 1с) кроме экситонов, связанных с суб-монослойными включениями CdSe, проявляются и свободные экситоны (FX) матрицы ZnSe. Последние расщеплены на состояния с тяжелыми (hh) и легкими (lh) дырками благодаря двухосному напряжению, возникающему в выращенных на подложке GaAs пленках ZnSe из-за несоответствия кристаллических решеток этих материалов [6]. Слабые линии люминесценции свободных экситонов видны также в спектрах люминесценции на рисунке 2b.

Разориентация GaAs-подложки ухудшает структурные качества пленки ZnSe. Микрофотолюминесценция обнаруживает у таких образцов повышенную концентрацию дислокаций несоответствия и глубоких ловушек в ZnSe [7], а в спектре краевой люминесценции (рис. 1а) усиливаются полосы рекомбинации экситонов, связанных с донорами (DX) и вакансиями (V(Zn)) цинка в матрице.

Разница энергии экситонов, локализованных на суб-монослойных включениях в образцах 0,15ML, и энергии свободных экситонов матрицы и края запрещенной зоны ($E_g = 2,82$ эВ для ZnSe) составляет всего 12 мэВ и 26 мэВ, соответственно. У структур 0,58ML эти энергии примерно равны 41 мэВ и 56 мэВ. Продольные оптические колебания решетки ($E_{LO} = 31,8$ мэВ по спектрам рамановского рассеяния) создают эффективную связь между экситонами суб-монослойных включений и состояниями в матрице ZnSe. В спектрах возбуждения фотолюминесценции доминируют фоновые линии (рис. 2а, кривая 1), разделенные энергией E_{LO} , количество которых дохо-

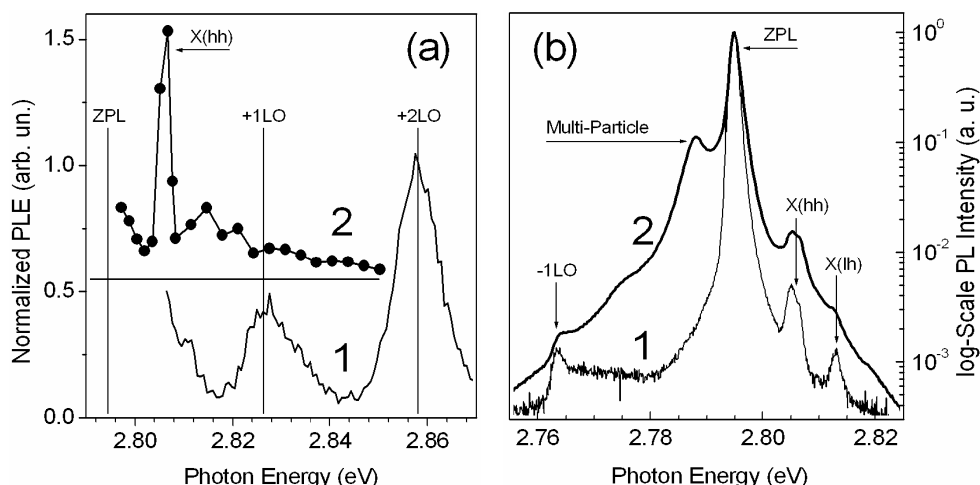


Рис. 2. Нормированные спектры возбуждения фотолюминесценции (а) и спектры фотолюминесценции (b) наноструктуры CdSe/ZnSe с номинальным содержанием CdSe 0,15 монослоя. Линии (1) соответствуют низкому, а линии (2) – высокому уровню возбуждения. ZPL – бесфоновая линия в спектре фотолюминесценции.

Линии X(hh) и X(lh) соответствуют свободным экситонам матрицы ZnSe с тяжелыми и легкими дырками

дит до 15 [3, 7]. Подобные фоновые линии наблюдаются и в спектрах двухфотонного возбуждения люминесценции.

Рисунок 2 показывает влияние высокого уровня возбуждения на фотолюминесценцию эпитаксиальных наноструктур ZnSe с суб-монослойными включениями CdSe. Увеличение концентрации экситонов ведет к быстрому, сверхлинейному росту темпа экситон-экситонных столкновений. Этот механизм перераспределения энергии и дефазировки становится более эффективным, чем взаимодействие экситонов с колебаниями кристаллической решетки. Минимумы в спектре возбуждения (1) фотолюминесценции (рис. 2а) заполняются, фоновые повторения экситонной линии в спектре возбуждения (2) не проявляются. Спектр фотолюминесценции (b) уширяется, в нем появляется новая линия, отстоящая от бесфононной экситонной линии на величину, равную разнице энергии свободных экситонов с легкими и с тяжелыми дырками. Предполагается [3, 8], что часть локализованных на включениях CdSe экситонов в процессе рекомбинации взаимодействует со свободными экситонами матрицы ZnSe и передает им энергию, достаточную для перехода из состояния с тяжелой дыркой в состояние с легкой дыркой.

Степень локализации экситонов на суб-монослойных включениях можно оценить по их рекомбинационным спектрам (рис. 1 и рис. 3). Известно [2], что 0D состояния появляются в эпитаксиальных пленках CdSe/ZnSe при номинальном содержании CdSe не менее 0,5 монослоя. Образование квантовых точек в образцах 0,58ML подтверждается неоднородным уширением спектров люминесценции этих наноструктур, немонотонной температурной зависимостью энергии экситонной полосы [3] вследствие теплового и резонансного [9] перераспределения заселенности экситонных состояний. Уменьшение номинального содержания CdSe до 0,15 монослоя ослабляет локализацию экситонов и уменьшает их энергию связи (см. рис. 1). Экситоны фактически расположены в матрице ZnSe, где их размер ($2a_B = 8,8$ нм) в разы превышает толщину слоя, содержащего кадмий (~1 нм). Рекомбинация экситонов в квантовых точках описывается моделью Хуанга-Риса, пуассоновским распределением интенсивности фоновых линий (см. рис. 3b). А в случае экситона, свободно пе-

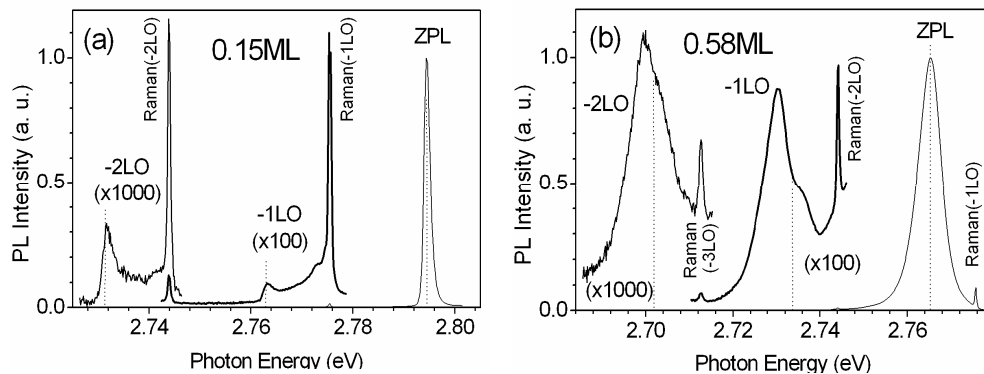


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции наноструктур ZnSe с включениями CdSe номинальной толщины 0,15 монослоя (a) и 0,58 монослоя (b). Участки спектров, содержащие 1 – фоновые линии, увеличены в 100 раз, а 2 – фоновые линии – в 1000 раз. Вертикальной чертой обозначены центры бесфононных линий (ZPL) и энергии, отстоящие от них на целое число $E_{LO}(\text{ZnSe})$. Raman – рамановские реплики излучения лазера (441,6 нм), возбуждающего фотолюминесценцию

ремещающегося по объемному кристаллу, рекомбинация с испусканием единственного оптического фонона запрещена в дипольном приближении [10]. Слабая одно-фононная линия в спектре (а) на рисунке 3 подтверждает меньшую степень локализации экситонов в структурах с 0,15ML включениями CdSe.

Оптические свойства субмонослойных наноструктур CdSe/ZnSe свидетельствуют, что по мере уменьшения номинальной толщины включений CdSe от 0,58ML до 0,15ML квантоворазмерные эффекты ослабляются, а экситоны, ассоциированные с этими включениями, по своим характеристикам приближаются к экситонам, связанным с мелкими дефектами, и к свободным экситонам матрицы ZnSe.

ЛИТЕРАТУРА

1. Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures / ed. by C. Lamberti. Elsevier. 2008.
2. Krestnikov, I.L. Arrays of Two-Dimensional Islands Formed by Submonolayer Insertions: Growth, Properties, Devices / L. I. Krestnikov, N. N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg // *Physica Status Solidi (A)*. 2001. V. 183. P. 207.
3. Kapitonov, A.M. Optical properties of epitaxially grown submonolayer CdSe/ZnSe nanostructures / A. M. Kapitonov [et al.] // *Physical Review B*. 2004. V. 70. P. 195304.
4. Schmitt-Rink, S. Theory of the linear and nonlinear optical properties of semiconductor microcrystallites / S. Schmitt-Rink, D. A. B. Miller, D. S. Chemla // *Physical Review B*. 1987. V. 35. P. 8113.
5. Passow T. Growth of (Zn)CdSe quantum structures on vicinal GaAs (001) substrates: step flow growth versus strain effects / T. Passow [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. 2000. V. 214/215. P. 606.
6. Gutowski, J. Optical Properties of ZnSe Epilayers and Films / J. Gutowski, N. Pressler, G. Kudelek. *Physica Status Solidi (A)*. 1990. V. 120. P. 11.
7. Kapitonov, A.M. Exciton-phonon interaction in epitaxial CdSe/ZnSe nanostructures / A. M. Kapitonov [et al.] // *Physica Status Solidi (B)*. 2003. V. 238. P. 317.
8. Kapitonov, A.M. Luminescence of epitaxial sub-monolayer CdSe nanostructures in ZnSe / A. M. Kapitonov [et al.] // *Journal of Luminescence*. 2005. V. 112. P. 177.
9. Kruchinin, S.Yu. Resonant energy transfer in quantum dots: Frequency-domain luminescent spectroscopy / *Physical Review B*. 2008. V. 78. P. 125311.
10. Ансельм, А. И. Длина свободного пробега не локализованного экситона в полярном кристалле / А. И. Ансельм, Ю. А. Фирсов // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1956. Т. 30. С. 719.