

Динамика локализованных экситонов в выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии сверхрешетке с субмонослоями CdSe

© А.А. Торопов, Т.В. Шубина, С.В. Иванов, С.В. Сорокин, А.В. Лебедев, П.С. Копьев, Г.Р. Позина*, П. Бергман*, Б. Монемар*

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

* University of Linköping, S-581 83 Linköping, Sweden

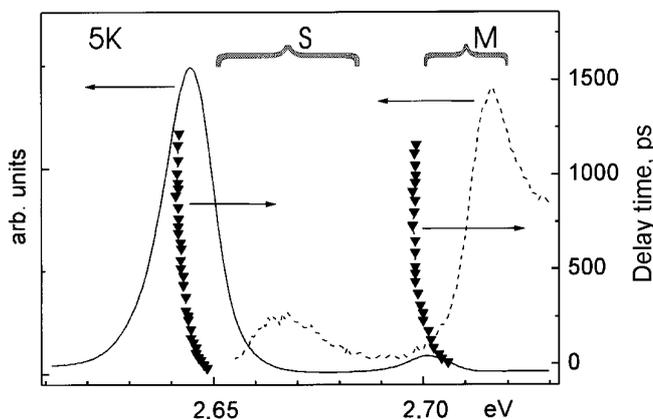
Спектр низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) и динамика рекомбинации локализованных экситонов исследовались в короткопериодной сверхрешетке субмонослоев CdSe/ZnSe. В отличие от структур с изолированными субмонослоями, демонстрирующими один узкий пик ФЛ, спектры ФЛ и возбуждения ФЛ сверхрешетки включают два пика, разнесенных на ~ 50 meV. Величина расщепления, а также временные характеристики затухания ФЛ интерпретированы в модели беспорядочной сверхрешетки протяженных островков, случайным образом расположенных в составляющих сверхрешетку субмонослоях.

Несмотря на значительное число публикаций, посвященных технологии изготовления и оптическим свойствам кванторазмерных гетероструктур в системе CdSe/ZnSe (см., например, ссылки в работе [1]), вопрос о структурных свойствах интерфейса CdSe/ZnSe до сих пор вызывает определенные разногласия. Узость линии ФЛ, наблюдаемой в структурах с напряженными тонкими слоями CdSe, и аномальная зависимость ширины линии от толщины слоя (ширина на полувысоте пика увеличивается от 5 до 40 meV при росте эффективной толщины слоя от 0.25 до 2 монослоев (МС)) позволили авторам работы [2] сделать вывод о формировании на интерфейсе пространственно однородного слоя твердого раствора ZnCdSe. Альтернативная точка зрения предполагает формирование в субмонослое двумерных (2D) островков CdSe [3]. Узость линии ФЛ в этом случае отражает однородность толщины различных островков (например, точно 1 МС) и относительно большие латеральные размеры (по сравнению с боровским радиусом экситона). В противном случае линия экситонной ФЛ была бы неоднородно уширена за счет флуктуаций, связанных как с размерным ограничением вдоль оси роста, так и с эффектом латерального ограничения в островках, представляющих собой трехмерные квантовые точки с определенным распределением по размерам и форме. Подобные эффекты неоднородного уширения наблюдались, например, в тонких слоях ZnS/ZnSe, обуславливая ширины линии экситонной ФЛ порядка 100 meV [4].

Представляется затруднительным надежно различить эти два возможных варианта устройства субмонослоя, исследуя оптические характеристики только структур с изолированными слоями. Действительно, оптические свойства как однородного слоя твердого раствора ZnCdSe, так и протяженных 2D островков определяются преимущественно эффектами размерного ограничения в направлении оси роста, тогда как эффекты латерального ограничения оказываются несущественными. Поэтому оптические спектры в обоих случаях будут похожими

друг на друга, представляя особенности, характерные для квантовых ям. Однако морфология интерфейса может оказаться решающим фактором, определяющим свойства короткопериодной сверхрешетки (СР), составленной из субмонослоев. Для однородных слоев твердого раствора взаимодействие электронов в соседних ямах приводит к формированию минизон и, как следствие, к длинноволновому сдвигу низкотемпературного экситонного пика, без существенного его уширения. В случае же формирования случайно расположенных плоских протяженных островков, беспорядок, определяемый случайным перекрытием островков в соседних слоях СР, может проявиться в неоднородном спектральном уширении и специфических эффектах локализации [5,6].

В настоящей работе эффекты локализации экситонов исследуются в субмонослойной (СМ) СР CdSe/ZnSe методами спектроскопии непрерывной (сн) ФЛ и возбуждения ФЛ (ВФЛ), а также ФЛ с временным разрешением. Образец, выращенный методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке (100) GaAs, включал 20 субмонослоев CdSe с номинальной толщиной 0.65 МС, разделенных барьерами ZnSe толщиной 28 Å. Были также выращены образцы, включающие одиночные слои CdSe различных толщин. Детальное описание технологии роста и толщинных калибровок приведено в работах [7,8]. Спектры ФЛ с временным разрешением порядка 15 ps измерялись стрик-камерой после возбуждения импульсами удвоенного по частоте излучения Al_2O_3/Ti лазера, работающего в режиме синхронизации мод. На рисунке приведены спектры сн ФЛ (непрерывная линия) и ВФЛ (штриховая линия) в образце с СМ СР. В отличие от узкого одиночного пика ФЛ, наблюдаемого в спектрах одиночных слоев (не приведенных в этой работе), спектры ФЛ и ВФЛ субмонослойной СР демонстрируют два пика, разделенных промежутком ~ 50 meV. Общность природы этих пиков подтверждается близкой кинетикой затухания ФЛ после возбуждения коротким импульсом. Характерные времена затухания меняются по контурам



Спектры *sw* фотолюминесценции (непрерывная линия) и возбуждения фотолюминесценции (штриховая линия); треугольниками показаны положения максимумов в зависимости от времени задержки регистрации (шкала на правой вертикальной оси).

пиков от ~ 40 ps на коротковолновом крыле до ~ 350 ps в области длинноволновых хвостов, а энергии максимумов (треугольники на рисунке) демонстрируют длинноволновый сдвиг со временем задержки регистрации. Подобное поведение характерно для прыжковой релаксации локализованных экситонов, сопровождающейся испусканием акустических фононов [9,10].

Приведенные экспериментальные результаты не могут быть адекватно описаны в предположении формирования однородных слоев твердого раствора, однако, допускают естественное объяснение в рамках модели беспорядочной СР, образующейся в результате случайного относительно друг друга расположения протяженных плоских островков. Различные локальные конфигурации "связанных" квантовых ям реализуются в такой СР в направлении оси роста. Простая оценка в рамках приближения "оггибающих" функций, проведенная для островков CdSe с толщиной точно 1 МС в пренебрежении латеральным ограничением и разницей в энергии связи экситонов по разным конфигурациям, показывает, что разрешенные энергии экситонов распадаются на две зоны (*S*- и *M*-зоны, отмеченные фигурными скобками на рисунке), разделенные промежутком ~ 15 meV. Экситоны *S*-зоны соответствуют конфигурациям "сильно связанных" квантовых ям, разделенных одним барьером сверхрешетки, тогда как все остальные конфигурации, включающие практически изолированные друг от друга участки островков, дают вклад в зону *M*. Такое описание позволяет объяснить все приведенные выше экспериментальные наблюдения, включая расщепление экситонной зоны и характерные проявления прыжковой релаксации экситонов, локализованных в случайном потенциале локальных вертикальных конфигураций плоских протяженных островков.

Строго говоря, хорошее согласие предложенной модели с экспериментом подтверждает лишь наличие в исследуемом образце структурного конфигурационного

беспорядка, оставляя открытым вопрос о точных размерах островков и возможных корреляциях в расположении островков в соседних слоях сверхрешетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и программы Министерства науки РФ "Физика твердотельных наноструктур".

Список литературы

- [1] K.P. O'Donnell, U. Woggon. *Appl. Phys. Lett.* **70**, 2765 (1997).
- [2] Z. Zhu, H. Yoshihara, K. Takebayashi, T. Yao. *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1678 (1993).
- [3] I.L. Krestnikov, M.V. Maximov, S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, S.A. Permogorov, A.N. Reznitsky, A.V. Kornievsky, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, C.M. Sotomayor Torres. In: Proc. 23rd ICPS (Berlin, 1996). *The Physics of Semiconductors* / Ed. M. Scheffler and R. Zimmermann. World Scientific, Singapore (1996). P. 3187.
- [4] T. Yao, M. Fujimoto, S.K. Chang, H. Tanino. *J. Cryst. Growth* **111**, 823 (1991).
- [5] N. Magnea. *J. Cryst. Growth* **138**, 550 (1994).
- [6] A. Chomette, B. Deveaud, A. Regreny, G. Bastard. *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1464 (1986).
- [7] S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, P.S. Kop'ev, J.R. Kim, H.D. Jung, H.S. Park. *J. Cryst. Growth* **159**, 16 (1996).
- [8] S. Ivanov, S. Sorokin, I. Krestnikov, N. Faleev, B. Ber, I. Sedova, P. Kop'ev. In: Proc. 8th Int. Conf. II-VI Compounds (Grenoble, 1997). To be published in *J. Cryst. Growth*.
- [9] L.E. Golub, E.L. Ivchenko, A.A. Kiselev. *J. Opt. Soc. Am.* **B 13**, 1199 (1996).
- [10] U. Neukirch, D. Weckendrup, W. Faschinger, P. Juza, H. Sitter. *J. Cryst. Growth* **138**, 849 (1994).