

# Фотолюминесценция гетероструктур CdTe/CdMnTe и CdTe/CdMgTe с квантовыми ямами, разделенными широкими барьерами

© Н.Г. Философов<sup>1</sup>, Г.В. Будкин<sup>2</sup>, В.Ф. Агекян<sup>1</sup>, G. Karczewski<sup>3</sup>, А.Ю. Серов<sup>1</sup>, С.Ю. Вербин<sup>1</sup>, И.В. Штром<sup>1</sup>, А.Н. Резницкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
194034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Institute of Physics Polish Academy of Sciences,  
PL-02-668 Warsaw, Poland

E-mail: n.filosofov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Исследованы низкотемпературные спектры фотолюминесценции и возбуждения фотолюминесценции двух систем квантовых ям CdTe, разделенных барьерами CdMnTe и CdMgTe шириной 20 нм. Экспериментальные спектры фотолюминесценции сравниваются с расчетами, где учтены экситонный эффект и влияние внутренних деформаций. Разброс наших данных не превышает ожидаемого для монослойных флуктуаций ширины квантовой ямы. В спектрах возбуждения фотолюминесценции широкой квантовой ямы обнаружены полосы, соответствующие усилению ее излучения при возбуждении экситонных состояний соседней более узкой квантовой ямы. Обсуждается механизм переноса энергии между квантовыми ямами, разделенными широкими барьерами.

**Ключевые слова:** CdTe, квантовые ямы, фотолюминесценция, возбуждение фотолюминесценции.

DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56789.4949C

## 1. Введение

Важной характеристикой полупроводниковых наноструктур является степень связанности их отдельных элементов. Транспортные свойства наноструктур зависят от протекания по ним электронов, дырок и экситонов, в этом случае важную роль играет туннелирование частиц сквозь потенциальные барьеры. В целом ряде работ показано, что туннелирование эффективно между квантовыми ямами (КЯ), разделенными узким, обычно < 10 нм барьером (см., например, [1,2]). В исследуемых нами структурах ширина барьера составляет 20 нм, это позволяет сделать вывод, что мы имеем дело с иным механизмом переноса энергии между КЯ. Кроме туннелирования, перенос может осуществляться через механизм диполь-дипольного взаимодействия (ДДВ) фёрстеровского типа. Роль ДДВ в переносе энергии в твердотельных наноструктурах различного типа активно изучается [3–5]. В этом плане представляется актуальным исследование механизма взаимодействия между КЯ, разделенными толстыми барьерами.

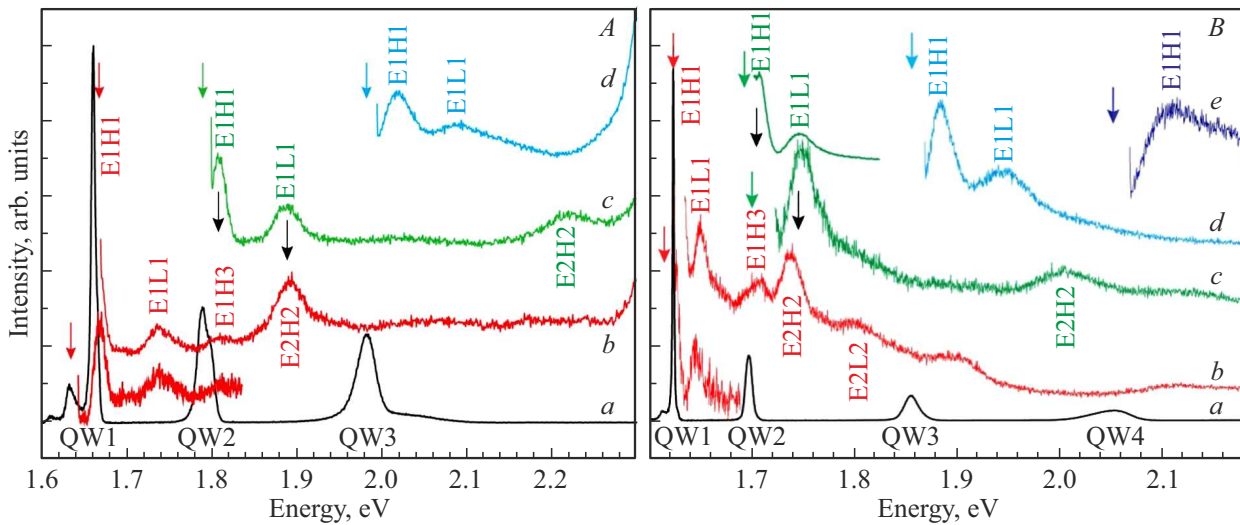
Температурная зависимость вероятности переноса энергии определяется активационной энергией, равной высоте барьера. Можно ожидать, что КЯ, разделенные широким барьером, будут независимы при низкой температуре, так как передача энергии за счет теплового возбуждения в этом случае неэффективна. Однако в ряде работ представлены результаты по фотолюминесценции (ФЛ) КЯ, которые свидетельствуют об эффективном

переносе энергии при низкой температуре между ямами, разделенными широким (10–30 нм) барьером. В этих работах высказано предположение, что важную роль в переносе энергии в таких условиях играет диполь-дипольное взаимодействие, которое не требует перекрытия волновых функций или тепловой активации носителей [6–9]. Этот механизм был предложен Фёрстером [10], который показал, что скорость переноса между точечными диполями спадает как  $R^{-6}$ , где  $R$  — расстояние между диполями. Обобщение модели Фёрстера на перенос возбуждения в системах типа диполь-слой или слой-слой в молекулярных структурах и на перенос между КЯ, разделенными широкими барьерами, в полупроводниковых структурах приводит к степенным зависимостям с показателем от  $-4$  до  $-2$  или даже к еще более слабой логарифмической зависимости от ширины барьера [6–8].

В настоящей работе рассматривается перенос энергии между КЯ, разделенными широкими барьерами, в структурах CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te ( $x = 0.45$ ) и CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>Te ( $x = 0.35$ ) и обсуждается механизм этого процесса.

## 2. Образцы и детали эксперимента

В работе исследованы спектры ФЛ и возбуждения ФЛ образцов А и В, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке GaAs (100) с буферным слоем CdMgTe. Образец А состоит из



*a* — спектры ФЛ образцов А и В при надбарьерном возбуждении в область 2.805 эВ; *b* — спектры возбуждения ФЛ QW1 образцов А и В; *c* — спектры возбуждения ФЛ QW2 образцов А и В; *d* — спектры возбуждения ФЛ QW3 образцов А и В; *e* — спектр возбуждения ФЛ QW4 образца В. Вертикальные черные стрелки указывают области резонансов в спектрах возбуждения ФЛ QW1 и QW2. Энергии регистрации спектров возбуждения ФЛ показаны цветными стрелками.  $T = 5$  К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

трех КЯ CdTe QW1–QW3 шириной 16, 8 и 4 монослоя (ML) (1 ML CdTe = 0.32 нм), разделенных барьерами Cd<sub>0.55</sub>Mn<sub>0.45</sub>Te шириной 20 нм. Образец В состоит из четырех КЯ CdTe QW1–QW4 шириной 32, 16, 8 и 4 ML, разделенных барьерами Cd<sub>0.65</sub>Mg<sub>0.35</sub>Te такой же ширины. Образцы помещались в оптический криостат замкнутого цикла, ФЛ возбуждалась линией 456 нм твердотельного лазера. Для получения спектров возбуждения ФЛ использовалось излучение галогеновой лампы, прошедшее через монохроматор.

### 3. Экспериментальные результаты

На рисунке, *a* приведен низкотемпературный спектр ФЛ образца А, полученный при возбуждении в зону барьерного слоя. При температуре 5 К спектр состоит из трех полос с полуширинами (FWHM) 6, 20 и 33 мэВ. Эти полосы соответствуют рекомбинации экситонов в КЯ QW1–QW3. Тонкая структура полос ФЛ, отчетливо проявляющаяся в спектрах излучения QW1 и QW2, обусловлена вкладом свободных экситонов и экситонов, локализованных на уширениях КЯ. На рисунке, *a* приведены также спектры возбуждения ФЛ, полученные при регистрации в точках, указанных стрелками, и дана интерпретация особенностей спектров на основе описанной далее модели. Видно, что в спектре возбуждения ФЛ QW1 широкой КЯ в дополнение к пикам, соответствующим возбуждению тяжелых и легких экситонов (E1H1 и E1L1 соответственно), присутствует сильная полоса с энергией 1.89 эВ, совпадающая с полосой E1L1 в спектре возбуждения ФЛ QW2. Этот результат указывает на перенос энергии между QW2 и QW1. Аналогичные

свидетельства переноса энергии наблюдаются также в спектрах возбуждения ФЛ QW2 и QW1 образца В (см. рисунок, *b*).

Для оценки эффективности переноса энергии между узкой и широкой КЯ можно использовать отношение интенсивности ФЛ широкой КЯ при возбуждении в область энергий, показанных вертикальными стрелками на панелях А и В (см. рисунок), к интенсивности ФЛ при прямом возбуждении в область переходов E1H1. Как видно из рисунка, эффективности этого переноса в образцах А и В сопоставимы.

### 4. Обсуждение результатов

Как следует из рисунка, спектры возбуждения ФЛ для QW1 обоих образцов содержат не менее 4 пиков. Первые два пика можно отождествить с экситонными переходами E1L1 и E1H1, происхождение двух других пиков не столь однозначно. Для того чтобы убедиться в наличии резонанса между энергетическими уровнями QW1 и QW2, были проведены численные расчеты методом вариаций в рамках приближения самосогласованного поля [11]. При расчетах энергий экситонов необходимо использовать целый ряд параметров гетероструктур, значения которых, согласно литературным данным, имеют существенный разброс. Наш расчет имел целью показать, что энергиям некоторых пиков в спектрах возбуждения ФЛ широких КЯ соответствуют энергии экситонов более узких КЯ. Потенциал КЯ предполагался прямоугольным, эффективная масса частиц считалась постоянной в направлении роста структуры и не зависящей от ширины КЯ. В результате найден набор

Параметры, использованные при расчете

$E_g$ , мэВ	$Q$	$dQ_E$	$dQ_H$	$dQ_L$	$m_E$	$m_H$	$m_L$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\varepsilon$	ML, нм
Образец А											
2.348	0.7	0.005	0.005	0.012	0.12	0.8	0.12	5.35	1.73	10	0.32
Образец В											
2.372	0.8	0	0	0.005	0.09	0.8	0.12	5.35	1.73	10	0.32

параметров (см. таблицу), который позволяет идентифицировать все наблюдаемые пики в спектрах возбуждения ФЛ (см. рисунок), изменяя только ширину КЯ.

Ширина запрещенной зоны  $E_g$  определялась по энергии экситона барьера:  $Q$  — соотношение высоты барьеров для электрона и дырок,  $dQ$  (мэВ) — учет напряжений вызванных рассогласованием постоянных решеток материала барьера и КЯ (см. таблицу).

$$U_b = E_g - E_{gCdTe}, \quad U_E = Q \cdot U_b + dQ_E,$$

$$U_H = (1 - Q) \cdot U_b - dQ_H, \quad U_L = (1 - Q) \cdot U_b + dQ_L,$$

$U_b$  — суммарная высота барьеров для электрона и дырок, индексы E, H и L соответствуют электрону, тяжелой и легкой дыркам,  $\gamma_{1,2}$  — постоянные Латтинжера,  $m_{H,L} = 1/(\gamma_1 + \gamma_2)$ ,  $m_{L,H} = 1/(\gamma_1 - \gamma_2)$ ,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость, ML — ширина монослоя. Для каждой из КЯ проводились серии расчетов для номинальной ширины КЯ и ее сужений и расширений на один монослой.

Свидетельства эффективного возбуждения экситонов в широких КЯ при генерации экситонов в узких КЯ отмечались также в работе [12] для структуры CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te с КЯ CdTe шириной 4, 6 и 10 нм, разделенными барьерами шириной 50 нм. Авторами была предложена гипотеза дальнедействующего магнитного взаимодействия по длинным цепочкам спин-поляризованных ионов марганца, соединяющим КЯ. Результаты нашей работы показывают, что эффективный перенос возбуждения между КЯ наблюдается также в образце В, где в барьерах магнитные атомы марганца заменены немагнитными атомами магния. Это свидетельствует в пользу феррестеровского механизма переноса энергии в образцах, исследованных в нашей работе, а также в образце, исследованном в работе [12].

## 5. Заключение

В работе наблюдалась эффективная передача энергии при низкой температуре между экситонами в двух наборах, отличающихся по ширине КЯ CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te и CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>Te. В обоих наборах ширина барьеров, разделяющих КЯ CdTe, составляет 20 нм, что исключает возможность туннелирования носителей и экситонов. Анализ полученных данных свидетельствует в пользу того, что механизмом переноса энергии является резонансное диполь-дипольное взаимодействие.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 93020138 (Н.Г. Философов, В.Ф. Агемян, С.Ю. Вербин, А.Ю. Серов, И.В. Штром) и гранта УМО-2021/41/В/ST3/03651 (G. Karczewski).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] J. Shah, K. Leo, D.Y. Oberli, T.C. Damen. *Ultrashort Processes in Condensed Matter*, ed. by W.E. Bron (Plenum, N.Y., 1993).
- [2] D. Guzun, Yu.I. Mazur, V.G. Dorogan, M.E. Ware, E. Marega, jr., G.G. Tarasov, C. Lienau, G.J. Salamo. *J. Appl. Phys.*, **113**, 154304 (2013).
- [3] J.D. Cox, M.R. Singh, G. Gumbs, M.A. Anton, F. Carreno. *Phys. Rev. B*, **86**, 125452 (2012).
- [4] H. Kim, I. Kim, K. Kyhm, R.A. Taylor, J.S. Kim, J.D. Song, K.C. Je, L.S. Dang. *Nano Lett.*, **16**, 7755 (2016).
- [5] M.R. Singh, D. Schindel, A. Hatef. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 181106 (2011).
- [6] A. Tomita, J. Shah, R.S. Knox. *Phys. Rev. B*, **53**, 10793 (1996).
- [7] В.Я. Алешкин, Л.В. Гавриленко, Д.М. Гапонова, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, Д.И. Курицын, С.М. Сергеев, В.Г. Лысенко. *Письма ЖЭТФ*, **94**, 890 (2011).
- [8] S.K. Lyo. *Phys. Rev. B*, **61**, 13641 (2000).
- [9] A.N. Poddubny, A.V. Rodina. *ЖЭТФ*, **149**, 614 (2016).
- [10] Th. Förster. *Ann. Phys. (Leipzig)*, **2**, 55 (1948).
- [11] I.V. Ponomarev, L.I. Deych, V.A. Shuvayev, A.A. Lisyansky. *Physica E*, **25**, 539 (2005).
- [12] M. Godlewski, Z. Wilamowski, T. Wojtowicz, G. Karczewski, J. Kossut, P.O. Holtz, J.P. Bergman, B. Monemar. *J. Cryst. Growth*, **184/185**, 957 (1998).

Редактор А.Н. Смирнов

## Photoluminescence of CdTe/CdMnTe and CdTe/CdMgTe heterostructures with quantum wells separated by thick barriers

*N.G. Filosofov<sup>1</sup>, G.V. Budkin<sup>2</sup>, V.F. Agekyan<sup>1</sup>, G. Karczewski<sup>3</sup>, A.Yu. Serov<sup>1</sup>, S.Yu. Verbin<sup>1</sup>, I.V. Shtrom<sup>1</sup>, A.N. Reznitsky<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> St. Petersburg State University,  
194034 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Institute of Physics Polish Academy of Sciences,  
PL-02-668 Warsaw, Poland

**Abstract** The low-temperature photoluminescence and photoluminescence excitation spectra of two systems of CdTe quantum wells separated by CdMnTe and CdMgTe barriers 20 nm wide are studied. The experimental photoluminescence spectra are compared with calculations that take into account the exciton effect and the influence of internal strains. The scatter of our data does not exceed that expected for monolayer fluctuations of the quantum well width. In the photoluminescence excitation spectra of a wide quantum well, bands were found that correspond to the increase of photoluminescence from a wide quantum well upon excitation of a neighbor narrow quantum well. The mechanism of energy transfer between quantum wells separated by wide barriers is discussed.