

Механизм передачи электронного возбуждения в органических светоизлучающих устройствах на основе полупроводниковых квантовых точек

© А.Г. Витухновский^{†¶}, А.А. Ващенко⁺, В.С. Лебедев^{+*}, Р.Б. Васильев[‡], П.Н. Брунков^{•#}, Д.Н. Бычковский[#]

⁺ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

^{*} Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Московская область, Россия

[‡] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

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

[#] ЗАО „Оптоган-ОСР“, 198205 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 сентября 2012 г. Принята к печати 24 сентября 2012 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования образцов органических светодиодов с люминесцентными слоями, изготовленными на основе двух типов полупроводниковых квантовых точек CdSe/CdS, со средним диаметром ядра CdSe 3, 5 нм и характерной толщиной оболочки CdS 0.5 нм. Определены зависимости эффективности светодиодов от концентрации квантовых точек. По экспериментальным данным был определен механизм передачи электронного возбуждения от органической матрицы к полупроводниковым квантовым точкам, и на основании этого высказаны предложения о способах оптимизации конструкции светодиодов для повышения их эффективности.

1. Введение

Источники света на неорганических (полупроводниковых) светоизлучающих диодах достигают эффективности 90 лм/Вт [1] при сравнительно большом сроке эксплуатации.

В светодиоде в отличие от лампы накаливания или люминесцентной лампы электрический ток преобразуется непосредственно в световое излучение, а не в тепло, и теоретически это можно сделать почти без потерь. Такой прибор механически прочен и исключительно надежен, его срок службы достигает 100 тысяч часов, что почти в 100 раз больше, чем лампочки накаливания, и в 5–10 раз больше, чем люминесцентной лампы. Изобретение в 1987 г. органического светоизлучающего диода (organic light emitting diode, OLED), несомненно, является важным этапом развития светотехники [2,3]. Обладая низкой энергией потребления, он обеспечивает отличную цветопередачу при низкой цене и эффективности до 100 лм/Вт с использованием фосфоресцентных органических материалов.

В настоящий момент поиски эффективного материала для эмиссионного слоя OLED привели к использованию коллоидных полупроводниковых нанокристаллов — квантовых точек (quantum dots, QDs); такая технология была названа QD-OLED. Основным элементом такого рода устройств является коллоидный нанокристалл (квантовая точка) с размерами от 2–7 нм. Как правило, используются так называемые нанокристаллы ядро-оболочка (core-shell в англоязычной литературе).

Примеры нанокристаллов, полученных методами коллоидной химии [4], и поведение их уровней энергии E приведены на рис. 1.

На рис. 1, *a* показаны квантовая точка CdS и функции распределения электронов (e) и дырок (h) в зависимости от расстояния от ее центра. Квантовая точка CdSe/CdS, приведенная на рис. 1, *b*, соответствует наногетероструктуре так называемого типа I, когда оба возбужденных носителя заряда находятся в ядре. Иная функция распределения электронов и дырок наблюдается в квантовой

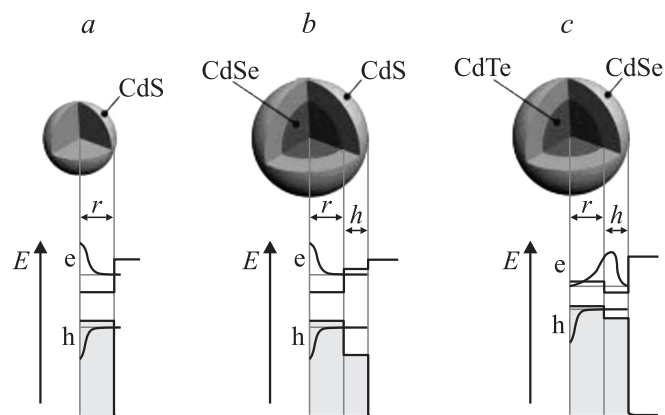


Рис. 1. Структура энергетических уровней коллоидных квантовых точек на основе халькогенидов кадмия. r — радиус ядра квантовой точки, h — толщина оболочки квантовой точки. *a* — безоболочечная квантовая точка типа „ядро“; *b* — квантовая точка „ядро-оболочка“ типа I; *c* — квантовая точка „ядро-оболочка“ типа II.

[¶] E-mail: alexei@sci.lebedev.ru

точке CdTe/CdSe (рис. 1, c). Эта гетероструктура относится к типу II, и в ней электрон преимущественно находится на оболочке, в то время как дырка локализована в ядре наночастицы. О классификации гетероструктур см., например, [5].

На рис. 2 показано изменение энергетической структуры материала при переходе от объемного полупроводника (рис. 2, a), где E_g — ширина запрещенной зоны, к наноразмерному (рис. 2, b), где уже E_g — энергия самого низкоэнергетического перехода. Во втором случае эта величина определяется формулой $\Delta E = \hbar/2md^2$, где d — диаметр квантовой точки, m — эффективная масса электрона в квантовой точке [6].

Помещая полупроводниковые квантовые точки между двумя слоями органических полупроводников n - и p -типа проводимости и прикладывая напряжение на внешние электроды, можно возбудить в квантовых точках электронно-дырочные пары, которые в результате рекомбинации испускают квант света [7]. Простейшая схема QD-OLED приведена на рис. 3.

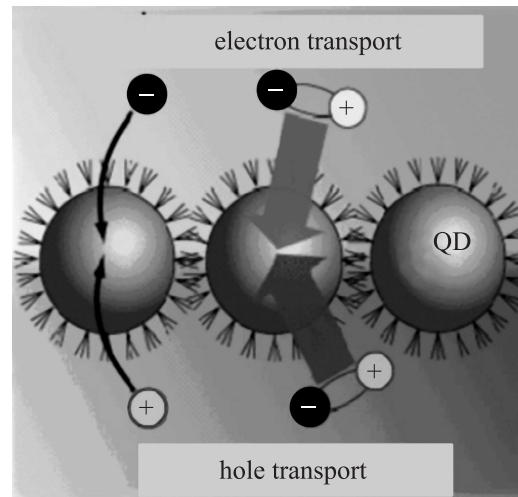


Рис. 4. Механизмы возбуждения полупроводниковых квантовых точек на границе органических слоев n -типа (транспорт электронов) и p -типа проводимости (транспорт дырок).

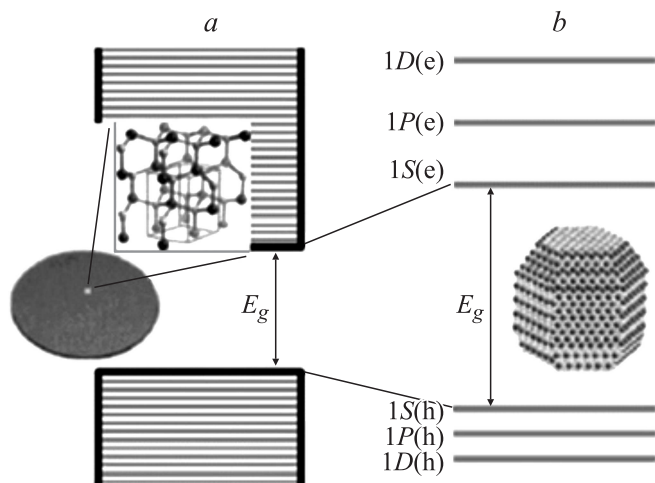


Рис. 2. Зонные диаграммы объемного полупроводника (a) и наноразмерного полупроводника (b).

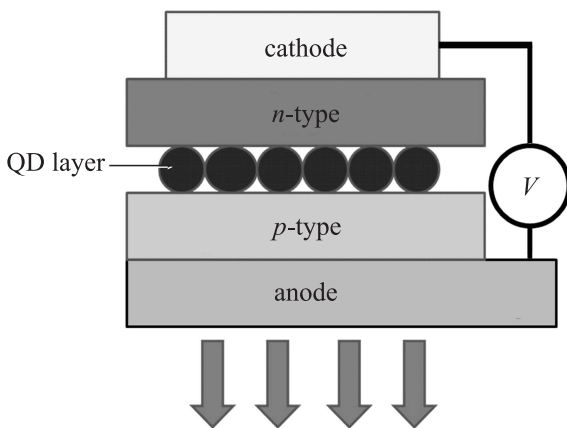


Рис. 3. Схема простейшего органического светоизлучающего диода с коллоидными полупроводниковыми квантовыми точками (QD-OLED).

Созданные на основе таких наноструктур органические светоизлучающие диоды (QD-OLED) [8–11] обладают рядом преимуществ перед обычными органическими светодиодами (OLED). Это связано с уникальными оптическими свойствами коллоидных квантовых точек — высоким внутренним квантовым выходом люминесценции и возможностью перестройки длины волны излучения в широком спектральном диапазоне. Большинство созданных в настоящее время QD-OLED функционирует на основе квантовых точек CdSe/ZnS [10] и кремния [12].

В настоящее время нет окончательного понимания механизмов возбуждения полупроводниковых квантовых точек в QD-OLED. Рассмотрим возможные схемы возбуждения квантовых точек, приведенные на рис. 4.

Возможна прямая рекомбинация электрона и дырки в квантовой точке, что приведет к испусканию фотона с соответствующей энергией. Однако возможен и другой сценарий: электронно-дырочная рекомбинация может произойти либо в органическом слое n -типа, либо в слое p -типа проводимости. В этих случаях происходит перенос энергии электронного возбуждения от возбужденной молекулы в органическом слое к квантовой точке. Такой перенос энергии происходит по механизму Ферстера [13]. Например, в работе [14] исследовали перенос энергии электронного возбуждения от излучающего в синей части спектра конъюгированного полимера {poly[9,9-dihexylfluorenyl-2,7-diyl]-alt-co(9,ethyl-3,6-carbazole)}} к коллоидной квантовой точке „ядро-оболочка“ CdSe/ZnS. Показано, что перенос энергии осуществляется по механизму Ферстера и полимер выступает в роли донора, а квантовая точка — в роли акцептора. Определен радиус Ферстера: $(80 + 15)$ Å. Исследование электронных процессов на границе „органический слой-квантовая точка“ необходимо для создания эффективного QD-OLED.

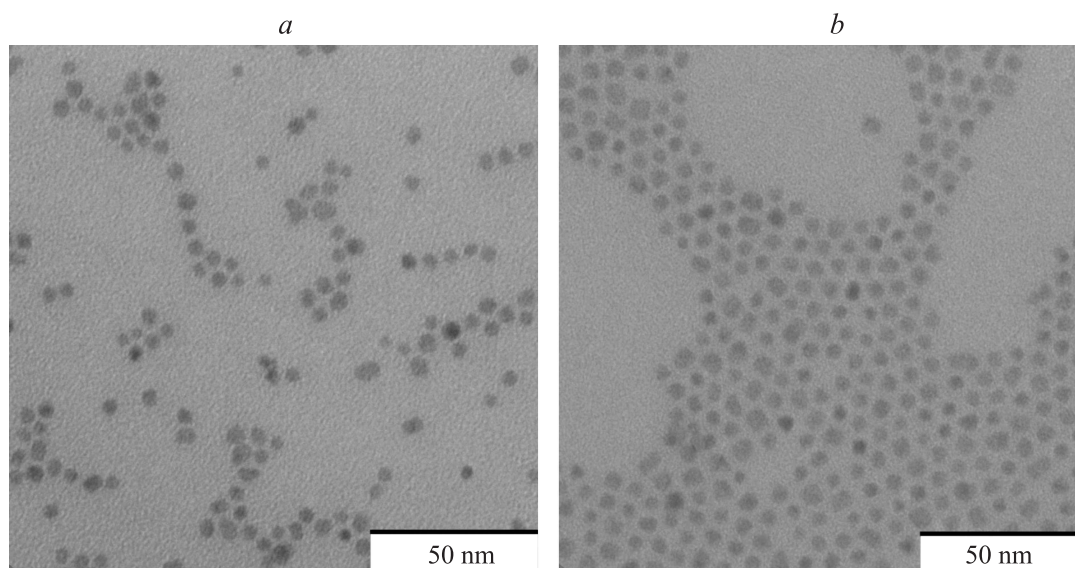


Рис. 5. ПЭМ-фотография образцов квантовых точек: *a* — квантовые точки CdSe диаметром 5 нм; *b* — квантовые точки CdSe/CdS.

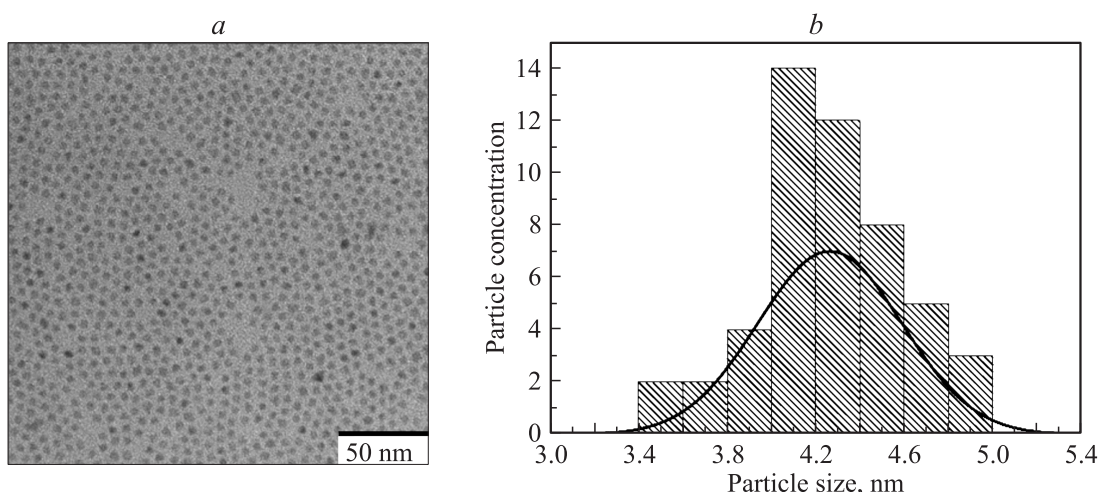


Рис. 6. Микрофотография квантовых точек CdSe/CdS на основе ядер CdSe диаметром 3 нм (*a*) и их распределение по размерам (*b*).

В настоящей работе разработан и создан органический светоизлучающий диод, использующий в качестве активного излучающего элемента слой коллоидных квантовых точек CdSe/CdS. Используемые квантовые точки имеют высокий квантовый выход люминесценции и обнаруживают значительную фотостабильность [15]. Одна из основных целей работы состояла в изучении влияния радиуса ядра (r) и толщины оболочки (h) квантовой точки CdS на люминесцентные и электрические характеристики светодиода, а также скорости передачи энергии экситонного возбуждения от органических молекул доноров активному слою квантовых точек (акцепторов). В качестве молекул доноров используются молекулы Alq_3 , Tris(8-hydroxyquinolato)aluminium-Al1(C_0H_6NO) $_3$, и TPD, N,N'-bis(3-methylphenyl)-N,N'-bis(phenyl)-benzidine- $C_{38}H_{32}N_2$, составляющие соответственно электронный и дырочный транспортные слои диода.

2. Экспериментальная часть

Квантовые точки — ядра CdSe — были синтезированы раствором методом с использованием олеиновой кислоты в качестве стабилизатора по адаптированному методу, исходно взятому из работ [16,17]. Более подробно методика синтеза описана в [18]. После выделения и очистки на квантовых точках CdSe наращивали оболочку CdS с использованием олеата кадмия и раствора серы в триоктилфосфине в качестве катионного и анионного прекурсоров соответственно. Рост оболочки проводили в октадецене при $240^\circ C$. Были приготовлены два образца с максимумами спектров люминесценции при 585 и 625 нм.

Полученные образцы характеризовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгеновской дифракции, оптической спектроскопии погло-

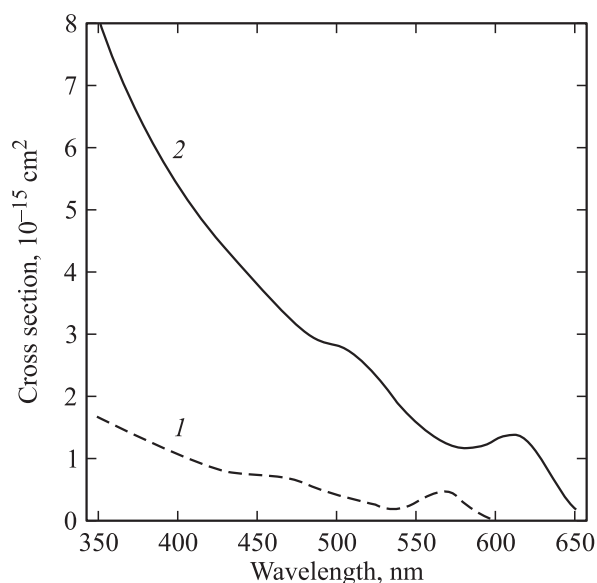


Рис. 7. Сечения поглощения света квантовыми точками CdSe/CdS с диаметром ядра $d = 3$ (1), 5 нм (2) и толщиной оболочки $h = 0.5$ нм.

щения и люминесценции. Размер ядер квантовых точек CdSe по данным ПЭМ составил 3 и 5 нм (рис. 5) с дисперсией размеров $\sim (15-20)\%$, толщина оболочки для квантовых точек CdSe/CdS составила 0.5 нм.

Гистограмма распределения по размеру квантовых точек CdSe/CdS на основе ядер CdSe диаметром 3 нм представлена на рис. 6. Средний внешний размер квантовых точек CdSe/CdS составляет ~ 4.3 нм.

По данным рентгеновской дифракции, как для исходных квантовых точек CdSe, так и для гетероструктур ядро-оболочка CdSe/CdS установлена модификация сфалерита. Для определения коэффициента экстинкции в

ходе роста оболочки из реакционной смеси отбирались пробы равного объема, затем пробы разбавлялись гексаном. На рис. 7 показаны сечения поглощения образцов CdSe/CdS при различных значениях диаметра ядра квантовой точки, зарегистрированных на спектрофотометре Varian Cary 50. Видно, что даже при небольшом увеличении внешнего радиуса частицы, от 2 до 3 нм, происходит сильное увеличение сечения поглощения и существенный сдвиг положения экситонного максимума в сторону больших длин волн. Данные для коэффициента экстинкции нижнего по энергии экситонного максимума квантовых точек CdSe взяты из работы [19], при дальнейшем пересчете принималось, что изменение коэффициента экстинкции связано с ростом оболочки и изменения числа частиц не происходит. Для исходного образца CdSe с размером 3 нм коэффициент экстинкции в экситонном максимуме при 545 нм составил $9.6 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, после наращивания оболочки экситонный максимум сместился на 570 нм и коэффициент экстинкции увеличился до $13.3 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Для получения опытных образцов использовались две технологии: „мокрая“ (wet) — использование центрифугирования (spin-coating) и „сухая“ (dry) — термическое напыление. В качестве подложек были использованы стекла с напыленным анодом — оксидом индия и олова (ITO) производства Kintec, Тайвань. Схема образцов приведена на рис. 8.

На подложки ITO методом центрифугирования наносился слой полимера PEDOT-PSS, Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonic acid). Подложки затем высушивались при 110°C в течение 20 мин в сухой атмосфере азота. Нанесение квантовых точек производили совместно с TPD (органическим полупроводником p -типа проводимости) из раствора в толуоле. Нанесение последующих слоев (органического полупроводника n -типа Alq₃ и катода Al) проводили термическим

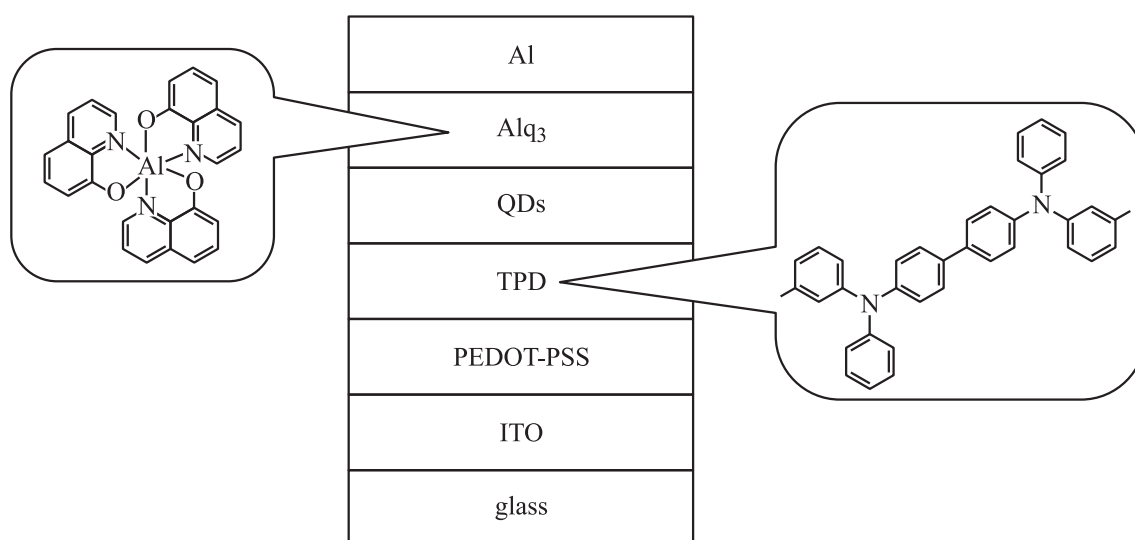


Рис. 8. Схема опытного образца QD-OLED.

напылением при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ мбар. Перемещение образца происходило в специальном боксе с инертным газом (Ar) без контакта с окружающей средой. Так же в инертной атмосфере проводилась капсуляция образцов и первичные электрооптические испытания. Спектры электролюминесценции образцов сравнены с соответствующими спектрами фотолюминесценции квантовых точек в растворе толуола на рис. 9.

Проведено исследование вольт-амперных характеристик QD-OLED на квантовых точках CdSe/CdS при различных плотностях заполнения ими плоского слоя в светоизлучающем диоде. Полученные при этом экспериментальные данные (см. рис. 10) указывают на то, что с ростом поверхностной плотности QDs в транспортном *p*-слое светодиода (TPD, см. рис. 8) проводимость образцов, определяемая традиционным механизмом транспорта, ограниченного ловушками зарядов [20], постепенно уменьшается.

Такое поведение объясняется тем, что при повышении плотности квантовых точек CdSe/CdS происходит

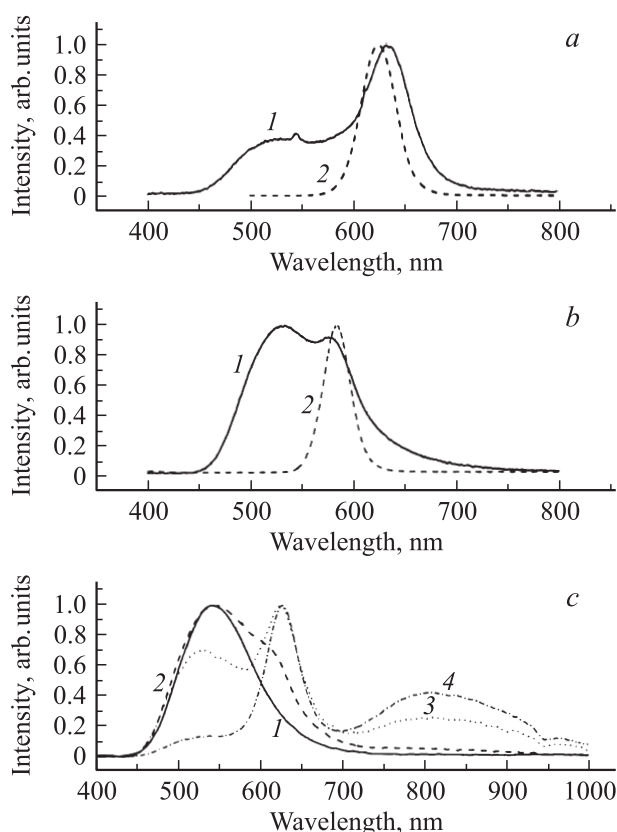


Рис. 9. *a, b* — спектры электролюминесценции (1) и фотолюминесценции (2) квантовых точек CdSe/CdS с толщиной оболочки CdS $h = 0.5$ нм при значении внешнего радиуса квантовой точки $a_{qd} = 3$ (а) и 2 нм (б). *c* — спектры электролюминесценции диодов при различной плотности заполнения квантовыми точками с $a_{qd} = 3$ нм плоского слоя QD-OLED: 1 — без квантовых точек, 2 — заполнение квантовыми точками промежутка между *p*- и *n*-слоями 50%, 3 — один монослой квантовых точек, 4 — два монослоя квантовых точек.

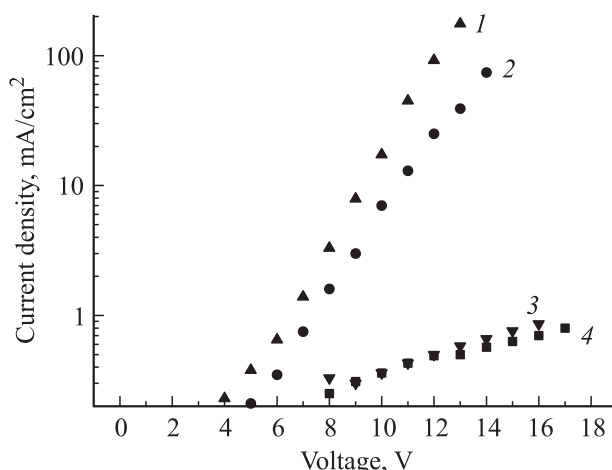


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики QD-OLED, полученных при различных плотностях слоя квантовых точек CdSe/CdS: 1 — без квантовых точек, 2 — заполнение квантовыми точками промежутка между *p*- и *n*-слоями 50%, 3 — один монослой квантовых точек, 4 — два монослоя квантовых точек.

увеличение числа ловушек зарядов, что приводит к снижению проводимости и изменению наклона вольт-амперных характеристик на рис. 10.

3. Обсуждение

В случае QD-OLED, как отмечено выше, обсуждаются два механизма возбуждения квантовых точек [9,10]. В первом случае экситоны генерируются в органических молекулах, окружающих квантовые точки, а затем происходит перенос энергии экситонного возбуждения от молекул доноров к акцепторам (QD). Второй механизм связан с образованием экситона в квантовой точке в результате прямого инжектирования носителей зарядов от органических транспортных слоев TPD (*p*-слой) и Alq₃ (*n*-слой) диода (рис. 4 и 8). Этот механизм обычно оказывается менее эффективным для возбуждения экситонов в квантовых точках.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 11, позволяют нам провести расчеты скорости передачи экситонного возбуждения от молекул Alq₃ и TPD квантовым точкам CdSe/CdS и изучить их зависимости от радиуса ядра и толщины оболочки частицы.

Скорость W (c^{-1}) резонансной передачи энергии экситонного возбуждения от одной органической молекулы, находящейся на расстоянии l от слоя квантовых точек с поверхностной плотностью ρ , определяется выражением [21]

$$W = \frac{R_F^6}{\tau} \int_0^\infty \frac{2\pi\rho x dx}{(x^2 + l^2)^3} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{l_F}{l} \right)^4. \quad (1)$$

Здесь l — расстояние от молекулы донора до плоскости монослоя квантовых точек; x — переменная интегри-

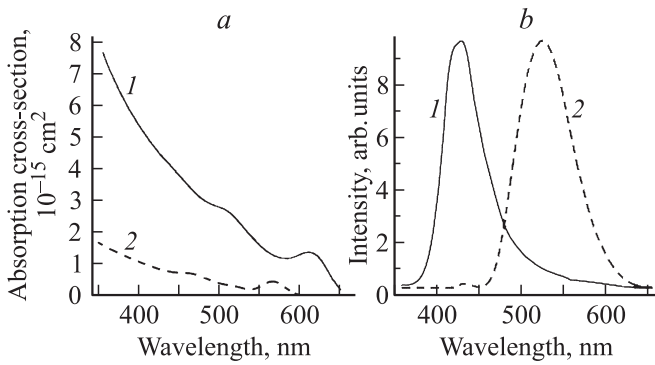


Рис. 11. *a* — сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ полупроводниковых квантовых точек CdSe/CdS, выращенных на основе ядер CdSe. Диаметр: 1 — 5 нм ($a_{qd} = 3 \text{ нм}$), 2 — 3 нм ($a_{qd} = 2 \text{ нм}$). *b* — спектры фотолуминесценции органических молекул доноров TPD (1) и Alq3 (2).

рования, обозначающая радиус кольца квантовых точек шириной dx , вклад которых в скорость передачи энергии вычисляется в подынтегральном выражении; τ — время релаксации фотолуминесценции органических молекул ($\tau = 0.9 \text{ нс}$ для TPD и 18.2 нс для Alq3). Величина l_F , соответствующая расстоянию, при котором резонансный перенос энергии на акцепторы (т.е. квантовые точки) и спонтанная дезактивация органической молекулы (донора) равновероятны, определяет характерный размер эффективной передачи энергии экситонного возбуждения слою полупроводниковых квантовых точек. В случае плотноупакованного слоя $l_F = R_F^{3/2} / a_{qd}^{1/2}$, где a_{qd} — радиус квантовой точки ($a_{qd} = r + h$). Ферстеровский радиус R_F , характеризующий расстояние эффективной передачи энергии возбуждения от органической молекулы одной квантовой точке, вычисляется с использованием формулы [22]

$$W = \frac{3c}{32\pi^4 n^4} \int_0^\infty F_D(\lambda) \sigma_A(\lambda) \lambda^2 d\lambda. \quad (2)$$

Здесь c — скорость света, n — показатель преломления органической матрицы ($n = 1.7$), $\sigma_A(\lambda)$ — сечение поглощения света квантовой точкой (акцептором), $F_D(\lambda)$ — спектр фотолуминесценции органической молекулы (донора), нормированный условием

$$2\pi c \int_0^\infty F_D(\lambda) d\lambda / \lambda^2 = 1. \quad (3)$$

Приведенные выше формулы справедливы, когда $l \geq a_D, a_A$, где a_D и a_A — радиусы молекул донора и акцептора (квантовой точки) соответственно.

Скорость передачи энергии экситонного возбуждения от органической молекулы слою квантовых точек $W \propto R_F^6 / l^4$. Таким образом, из полученных нами экспериментальных данных и проведенных расчетов можно

сделать вывод о том, что скорости этих процессов сильно возрастают при увеличении внешнего радиуса a_{qd} квантовой точки.

Так, при одном и том же значении поверхностной плотности частиц CdSe/CdS в слое скорости W передачи им энергии возбуждения от молекул Alq3 в транспортном n -слое и от молекул TPD в транспортном p -слое увеличиваются соответственно в 6.4 и 5.2 раза даже при изменении радиуса a_{qd} гибридной частицы CdSe/CdS всего от 2 до 3 нм (их сечения поглощения приведены на рис. 10).

Отметим также, что абсолютные значения скоростей W передачи экситонного возбуждения от молекул TPD и Alq3 слою квантовых точек CdSe/CdS составляют соответственно $W = 1.1 \cdot 10^9$ и $5.5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ при критическом значении расстояния $l = l_F$ и заданных геометрических параметрах квантовой точки: диаметр ядра 3 нм и толщины оболочки CdS 0.5 нм.

Таким образом, при одном и том же расстоянии l от молекулы донора до плоскости монослоя квантовых точек передача энергии экситонного возбуждения происходит эффективнее от молекул TPD, чем от молекул Alq3. Поскольку скорость передачи возбуждения от молекулы донора слою квантовых точек быстро ($\propto l^{-4}$) убывает с ростом l , можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительно помещать монослой квантовых точек в транспортный дырочный слой (TPD, см. рис. 8) на расстояниях от области p - n -перехода, не превышающих нескольких значений критической длины l_F . Рассчитанные здесь значения ферстеровского радиуса R_F и характерной длины l_F передачи возбуждения от молекул TPD и Alq3 плотноупакованному слою квантовых точек, необходимые для определения скорости W при произвольном значении l , для исследованных нами значений радиуса частицы приведены в таблице.

Используя приведенные выше формулы и используя полученные экспериментальные данные (рис. 10), мы провели расчеты скоростей W передачи экситонного возбуждения от молекул доноров Alq3 и TPD слою квантовых точек CdSe/CdS.

Плотности ρ квантовых точек в слое полагались при этом одинаковыми. Результаты расчетов показывают, что увеличение толщины оболочки квантовой точки (наращивание двух-трех внешних монослоев CdS) оказывает

Ферстеровский радиус R_F и характерная длина $l_F = R_F^{3/2} / a_{qd}^{1/2}$ передачи экситонного возбуждения от органических молекул TPD и Alq3 плотноупакованному слою квантовых точек CdSe/CdS с внешним радиусом a_{qd}

$D \rightarrow A$	TPD \rightarrow QD	TPD \rightarrow QD	Alq3 \rightarrow QD	Alq3 \rightarrow QD
a_{qd} , нм	2	3	2	3
R_F , нм	6.1	8.0	6.0	8.2
l_F , нм	10.7	13.2	10.4	13.5

Примечание. $a_{qd} = 2 \text{ нм}$ — квантовая точка с диаметром ядра 3 нм и оболочкой толщиной 0.5 нм; $a_{qd} = 3 \text{ нм}$ — квантовая точка с диаметром ядра 5 нм и оболочкой толщиной 0.5 нм.

существенное влияние на скорость процесса передачи возбуждения от молекул доноров слою квантовых точек CdSe/CdS.

Отношения скоростей передачи возбуждения от молекул TPD и Alq₃ к квантовым точкам CdSe/CdS составляют в этих условиях $W_{\text{TPD} \rightarrow \text{QD}}(l = 1.1 \text{ нм}) / W_{\text{TPD} \rightarrow \text{QD}}(l = 0.1 \text{ нм}) = 3.37$ и $W_{\text{Alq}_3 \rightarrow \text{QD}}(l = 1.1 \text{ нм}) / W_{\text{Alq}_3 \rightarrow \text{QD}}(l = 0.1 \text{ нм}) = 1.69$.

На рис. 9 приведены спектры фотолюминесценции полупроводниковых квантовых точек CdSe/CdS и электролюминесценции созданных на их основе светоизлучающих диодов при значениях диаметра ядра CdSe гибридной частицы $d = 5$ и 3 нм соответственно. Толщина оболочки CdS в обоих случаях составляла $h = 0.5$ нм. Рис. 9 показывает существенное влияние квантово-размерного эффекта на положение максимума λ_{max} пика фотолюминесценции: соответствующий сдвиг положения максимума в коротковолновую область составляет $\lambda_{\text{max}} = 25$ нм даже при небольшом (на 1 нм) уменьшении внешнего радиуса гибридной частицы CdSe/CdS. Характер спектров электролюминесценции диодов определяется вкладом излучения квантовых точек (длинноволновые максимумы на рис. 9) и молекул Alq₃ (слабо выраженные максимумы с центром при $\lambda \approx 530$ нм, соответствующие спектру, показанному на рис. 11). Как следует из результатов работы, отношение интенсивностей этих двух пиков существенно зависит от размеров и плотности расположения квантовых точек в слое. Из рис. 9 видно также, что для светодиода на основе квантовых точек с диаметром ядра 5 нм пик в спектре электролюминесценции, обусловленный вкладом излучения квантовых точек, оказывается существенно более интенсивным, чем для диода на квантовых точках с диаметром ядра 3 нм. Максимально достигнутый в условиях наших экспериментов внешний квантовый выход (EQE) светодиода на квантовых точках CdSe/CdS составил 0.3 – 0.5% . Это сопоставимо с имеющимися результатами для QD-OLED [9,10,12] на квантовых точках CdSe/ZnS и нанокристаллах Si.

Из полученных в работе экспериментальных данных (рис. 9, с) следует, что с ростом концентрации квантовых точек их вклад в электролюминесценцию возрастает, а вклад молекул Alq₃ снижается. При максимальной плотности заполнения квантовыми точками области p – n перехода (а также для CdSe/CdS = 200% — два монослоя) свечение Alq₃ практически полностью исчезает. Однако появляется более длинноволновая компонента излучения, которая, вероятно, связана с люминесценцией примесных поверхностных состояний квантовых точек. Такая же компонента появляется и в экспериментах с фотолюминесценцией квантовых точек в растворах [18].

4. Заключение

Таким образом, в результате проведенных в работе исследований установлено, что изменение размеров ядра

и оболочки синтезированных квантовых точек CdSe/CdS позволяет существенно влиять на спектральные характеристики светодиода (QD-OLED) и значительно модифицировать скорости передачи экситонного возбуждения от органических молекул доноров квантовым точкам.

Показано, что в исследованном устройстве QD-OLED на основе CdSe/CdS возбуждение квантовых точек происходит в основном в результате переноса энергии электронного возбуждения от молекул p -слоя (TPD).

Наряду с изменением плотности расположения квантовых точек в активном слое диода это дает возможность сильно влиять на его электрофизические характеристики и на эффективность функционирования устройства. Проведены оценки характерных расстояний между областью p – n -перехода, где происходит образование экситонов в органических молекулах на границе транспортных слоев диода, и областью, в которой должен быть размещен слой квантовых точек для наиболее эффективного функционирования устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00713-а, 12-03-00839-а), программ „Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее приложения“, „Фундаментальные аспекты физики и технологии полупроводниковых лазеров как основных элементов фотоники и квантовой электроники“ Отделения физических наук РАН, Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.516.11.6071, 16.552.11.7002) и ООО „Оптоган-ОСР“ с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Список литературы

- [1] N. Zheludev. Nature Photonics, **1**, 189 (2007).
- [2] C.W. Tang, S.A. Vanslyke. Appl. Phys. Lett., **51**, 913 (1987).
- [3] М.Н. Бочкарев, А.Г. Витухновский, М.А. Каткова. *Органические светоизлучающие диоды (OLED)* (Н.Новгород, ДЕКОМ, 2011).
- [4] C.V. Murray, D.J. Norris, M.G. Bawendi. J. Am. Chem. Soc., **115**, 8706 (1993).
- [5] Ж.И. Алфёров. ФТП **3**, 32 (1998).
- [6] А.В. Федоров, И.Д. Рухленко, А.В. Баранов, С.Ю. Кручинин. *Оптические свойства полупроводниковых квантовых точек* (СПб., Наука 2011).
- [7] S. Coe, W.-K. Woo, M. Bawendi, V. Bulovi. Nature, **420**, 800 (2002).
- [8] А.А. Ващенко, В.С. Лебедев, А.Г. Витухновский, Р.Б. Васильев, И.Г. Саматов. Письма ЖЭТФ, **96**, 118 (2012).
- [9] P.O. Anikeeva, J.E. Halpert, M.G. Bawendi, V. Bulovic. Nano Lett., **9**, 2532 (2009).
- [10] Y.Q. Zhang, X.A. Cao. Appl. Phys. Lett., **97**, 253 115 (2010).
- [11] S. Geyer, V.J. Porter, J.E. Halpert, T.S. Mentzel, M.A. Kastner, M.G. Bawendi. Phys. Rev. B, **82**, 155 201 (2010).
- [12] C.-C. Tu, L. Tang, J. Huang, A. Voutsas, L.Y. Lin. Appl. Phys. Lett., **98**, 213 102 (2011).
- [13] T. Förster. Discuss. Faraday Soc., **27**, 7 (1959).
- [14] M. Anni, L. Manna, R. Cingolani, D. Valerini, A. Creti, M. Lomascio. Appl. Phys. Lett., **85**, 4169 (2004).

- [15] P.B. Васильев, Д.Н. Дирин, А.М. Гаськов. Успехи химии, **80**, 1190 (2011).
- [16] L.H. Qu, Z.A. Peng, X.G. Peng. Nano Lett., **1**, 333 (2001).
- [17] W. Yu, X. Peng. Angew. Chem. Int. Ed., **41**, 2368 (2002).
- [18] R.B. Vasiliev, S.G. Dorofeev, D.N. Dirin, D.A. Belov, T.A. Kuznetsova. Mendeleev Commun., **14**, 169 (2004).
- [19] W.W. Yu, L. Qu, W. Guo, X. Peng. Chem. Mater., **15**, 2854 (2003).
- [20] Z. Shen, P.E. Burrows, V. Bulovic, D.M. McCarty, M.E. Thompson, S.R. Forrest. Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 401 (1996).
- [21] H. Kuhn. J. Chem. Phys., **53**, 101 (1970).
- [22] Th. Forster. Ann. Phys., **437**, 55 (1948).

Редактор Л.В. Шаронова

The mechanism of electronic excitation transfer in organic light emitting devices based on semiconductor quantum dots

A.G. Vitukhnovskii⁺, A.A. Vashchenko⁺,
V.S. Lebedev^{+*}, R.B. Vasiliev[‡], P.N. Brunkov^{•#},
D.N. Bychkovskii[#]

⁺ Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

^{*} Moscow Institute of Physics and Technology
(State University),
141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russia

[‡] Moscow State University
(Department of Materials Science),
119991 Moscow, Russia

[•] Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

[#] „Optogan-OLS“ LLC,
198205 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of experimental research of organic light-emitting diodes with semiconducting CdSe/CdS quantum dot layers are demonstrated. The quantum dots used had average core size of 3, 5 nm with the shell size of 0.5 nm. The dependence of efficiency of light-emitting diodes on quantum dot concentration was identified. Based on the experimental data, the mechanism of electronic excitation transfer from organic matrix to quantum dots was revealed. This allowed us to suggest the way to optimize light-emitting diode structures in order to increase diode efficiency.