

Оптика свёрнутых в виде свитков коллоидных квантоворазмерных наноструктур CdSe

Р.Б.Васильев, М.С.Соколикова, А.Г.Витухновский,
С.А.Амброзевич, А.С.Селюков, В.С.Лебедев

Приведены результаты исследования наноразмерных структур, представляющих собою свёрнутые в виде свитков коллоидные нанопластины CdSe толщиной 1.2 нм. Методами ТЕМ микроскопии изучена их морфология и определены основные геометрические параметры (диаметр свитка 29 нм, продольный размер 100–150 нм). Получены спектры поглощения и фотолюминесценции исследуемых объектов; изучена кинетика люминесценции. Показано, что оптические свойства наносвитков CdSe сильно отличаются от свойств квантовых точек CdSe и являются привлекательными для нанофотоники из-за больших сил осцилляторов перехода, а также малых ширин экситонных пиков и времён затухания люминесценции. Наносвитки могут найти применение при создании гибридных органико-неорганических светодиодов чистого цвета с высоким квантовым выходом люминесценции и низкими рабочими напряжениями.

Ключевые слова: нанофотоника, коллоидные полупроводниковые наноструктуры, наносвитки и нанопластины, спектры поглощения и фотолюминесценции, кинетика люминесценции.

1. Введение

Знание оптических свойств новых композитных наноструктур и наноматериалов, а также эффектов их взаимодействия со световыми полями необходимо для решения ряда фундаментальных и прикладных проблем нанофотоники, оптоэлектроники и субволновой оптики. Разнообразные гибридные наноструктуры и материалы интенсивно используются в настоящее время для создания солнечных батарей [1–3], нанолазеров [4–6], фотонных переключателей [7, 8], оптических пинцетов [9] и сенсоров [10–11]. Композитные материалы применяются в оптических нановолноводах с металлическим покрытием [12–15], в гибридных плазмонных волноводах [16, 17] и в сужающихся металлизированных оптических зондах ближнего поля с диэлектрической [18–22] и полупроводниковой [23–26] сердцевиной, позволяющих создавать локализованные на нанометровых масштабах световые поля.

Исследование оптических свойств гибридных наноструктур, содержащих органическую и неорганическую компоненты (см. обзорную статью [27]), представляет со-

бой самостоятельное направление в нанофотонике и оптоэлектронике. Значительное число экспериментальных и теоретических работ посвящено здесь изучению спектральных характеристик и эффектов взаимодействия оптического излучения с двухслойными и трёхслойными металлоорганическими наноструктурами различной формы и размеров, состоящими из металлического ядра и внешней оболочки упорядоченных молекулярных J-агрегатов цианиновых красителей [28–35]. Другой интенсивно исследуемый в настоящее время тип органико-неорганических материалов и структур создан на основе органических транспортных слоёв и слоя коллоидных полупроводниковых нанокристаллов различной формы и размеров. В значительной мере исследования такого рода гибридных материалов и структур проводятся в связи с разработками эффективных органико-неорганических светоизлучающих устройств с целью их применения для создания экономичных и стабильных источников света, предназначенных для освещения, индикации и отображения информации.

Основой таких устройств являются композитные слои, состоящие из полупроводниковой органической матрицы с внедрёнными в неё неорганическими полупроводниковыми нанокристаллами (CdSe, CdS, CdSe/ZnS, CdSe/CdS, ZnSe/CdSe/ZnS и др.) различных форм и размеров. Варьируя форму и размеры таких нанокристаллов, можно изменять их люминесцентные свойства. При пропускании электрического тока через диодную структуру носители заряда, проходя через органические слои, взаимодействуют с нанокристаллами, которые при этом становятся центрами излучательной рекомбинации. Преимуществами использования полупроводниковых коллоидных наноструктур являются сравнительно узкие полосы их люминесценции и высокий квантовый выход, а также стабильность и долговечность создаваемых светоизлучающих устройств.

К настоящему времени уже созданы светоизлучающие диоды на основе органических материалов и сферических нанокристаллов, имеющих как простую структуру, сос-

Р.Б.Васильев, М.С.Соколикова. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьёвы горы

А.Г.Витухновский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vitukhovsky@mail.ru

С.А.Амброзевич, А.С.Селюков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

В.С.Лебедев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: vlebedev@sci.lebedev.ru

тоящую из одиночного ядра (например, CdZnSe), так и композитную структуру на основе ядра, покрытого одной или несколькими оболочками из других полупроводниковых материалов (CdSe/ZnS, CdSe/CdS, ZnSe/CdSe/ZnS и др.) [36–42]. Наряду с этим исследование электролюминесценции в гибридных органо-неорганических светодиодах проводилось также и для нанокристаллов CdSe/CdS в форме тетраподов [43].

Развитие методик коллоидного синтеза в последние несколько лет привело к созданию нового класса полупроводниковых нанокристаллов – нанопластин CdSe, CdS, CdTe, а также планарных гетероструктур CdSe/CdS, CdSe/CdZnS, выращенных на их основе [44–47]. Толщину этих пластин удаётся контролировать с точностью до одного атомного слоя. Для этих планарных наноструктур характерен квантоворазмерный эффект, аналогичный наблюдаемому в эпитаксиальных полупроводниковых квантовых ямах. Преимуществами коллоидных нанопластин являются большие скорости излучательной рекомбинации, а также узкие полосы люминесценции из-за гигантской силы осциллятора радиационного перехода [48] и вследствие высокой однородности толщины нанопластин. При этом для однокомпонентных нанопластин (CdSe, CdS, CdTe) и для нанопластин, состоящих из ядра и оболочки (например, CdSe/CdZnS), ширины полос на полувысоте (FWHM) $\Delta\lambda$ составляют 5–10 и 20 нм при $T = 300$ К [44, 45] соответственно.

Возможность применения нанопластин в качестве активного излучающего элемента в органическом светодиоде была недавно продемонстрирована в наших работах [49–51], где представлен гибридный светоизлучающий диод на основе однокомпонентных нанопластин CdSe в качестве эмиттера на длине волны $\lambda = 515$ нм. Светодиод на основе двухкомпонентных нанопластин CdSe/CdZnS с длиной волны излучения $\lambda = 650$ нм был создан в работе [52].

В настоящей работе предложен и реализован оригинальный способ изготовления коллоидных наноструктур, представляющих собою наносвитки, т. е. свёрнутые полупроводниковые коллоидные нанопластины CdSe толщиной в несколько атомных слоёв. В наших экспериментах сворачивание пластин в свитки происходит тогда, когда латеральные размеры пластин превышают 100 нм. Большой интерес представляет исследование геометрических и физических свойств такого рода квантоворазмерных структур. Нами изучена морфология и определены размеры синтезированных наносвитков CdSe (рис.1). Получены их спектры и изучена кинетика фотолюминесценции при комнатных температурах.

Ожидается, что использование подобных наносвитков CdSe в качестве плоского неорганического слоя (эмиттера) позволит в перспективе разработать светоизлучающие устройства чистого цвета, функционирующие в коротковолновой части видимого спектра при низких рабочих напряжениях. Полученные наносвитки CdSe обладают ещё и тем достоинством, что потенциально они могут использоваться для хранения органических молекул, кластеров и квантовых точек (подобно тому, как нанотрубки углерода и нитрида бора меньшего размера предлагалось использовать для хранения молекул водорода, метана и углекислого газа [53, 54], в том числе и для задач водородной энергетики). При этом коллоидные полупроводниковые наносвитки могут стать серьёзной альтернативой другим возможным винтовым и трубчатым структурам,

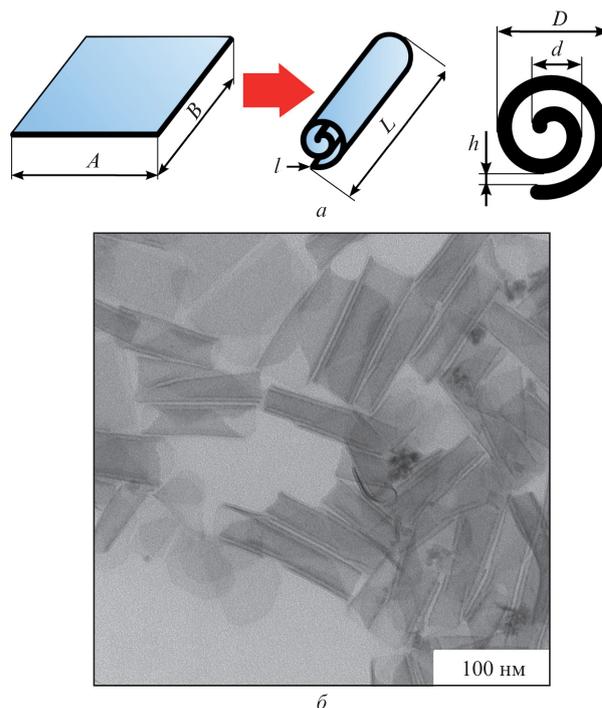


Рис.1. Схематическое изображение механизма сворачивания нанопластин в наносвитки и их геометрические параметры ($A, B = 100\text{--}150$ нм, $L = 100$ нм, $l = 1.2$ нм, $D = 29$ нм, $d = 23$ нм, $h = 3$ нм) (а), а также ТЕМ-изображения синтезированных наносвитков CdSe (б).

поскольку их синтез является достаточно простым и дешёвым.

2. Структура и размеры наносвитков

Коллоидные наносвитки CdSe были получены с использованием модернизированной методики, описанной в [49, 50]. Различие заключалось в том, что в качестве селенового прекурсора выступал не 0.1 М раствор селена в октадецане (Se-ODE), а 1 М раствор селена в триоктилфосфине (TOP-Se). Замена селенового прекурсора при синтезе квазидвумерных наноструктур CdSe приводит к существенному увеличению их продольных размеров (до 150 нм, в отличие от синтезированных ранее нанопластин с продольным размером 50 нм, см. [49, 50]). Для тонких (несколько атомных слоёв) планарных структур со столь большими продольными размерами оказывается энергетически более выгодным сворачиваться в трубки, в результате чего и формируются наносвитки CdSe.

Результаты исследования (см. рис.1,б) наносвитков при помощи просвечивающего электронного микроскопа Carl Zeiss LEO 912 AB Omega показали, что синтезированные в работе структуры имели следующие средние размеры: $D = 29$ нм и $d = 23$ нм – внешний и внутренний диаметры свитка, $L = 100$ нм – длина свитка, $h = 3$ нм – расстояние между его соседними слоями; $A = 100\text{--}150$ нм и $B = 100\text{--}150$ нм – продольные размеры пластин, образующих свиток; $l = 1.2$ нм – толщина пластины, образующей свиток. Анализ результатов показывает, что среднее число оборотов в свитке составляет 2.5.

3. Спектры поглощения и люминесценции

Спектры поглощения света для растворов нанопластин и наносвитков CdSe в гексане были зарегистриро-

ваны с использованием спектрофотометра PerkinElmer Lambda 45. Измерения проводились в кварцевой кювете с раствором при длине оптического пути 5 мм. При регистрации спектров фотолюминесценции нанопластин и наносвитков образец (стеклянная подложка с наноструктурами, высаженными на неё из раствора в гексане) возбуждался полупроводниковым импульсным лазером PicoQuant 800-B с длиной волны излучения 405 нм, частотой следования импульсов 40 МГц и длительностью импульса 75 пс. Детектором служил спектрометр Ocean Optics Maya Pro 2000. Кривые затухания люминесценции регистрировались при помощи ФЭУ PicoQuant PMA-C 192-N-M с монохроматором и системы счёта фотонов PicoQuant TimeHarp 100.

На рис.2 представлены спектры поглощения растворов в гексане синтезированных в работе наносвитков CdSe, полученных из нанопластин с большими продольными размерами, и плоских нанопластин CdSe с меньшим характерным латеральным размером. Для обеих наноструктур наблюдаются характерные экситонные пики с энергиями 2.85 эВ ($\lambda = 435$ нм) и 2.69 эВ ($\lambda = 462$ нм), соответствующие переходам из подзон лёгких (lh) и тяжёлых (hh) дырок в валентной зоне в зону проводимости. Следует отметить, что наблюдается небольшое (на $\sim 5.5\%$) уменьшение амплитуды lh-пики, а площадь под кривой для этого пика изменяется приблизительно на 10%. Это свидетельствует о небольшом уменьшении силы осциллятора соответствующего перехода при сворачивании нанопластин в наносвитки. Тем не менее сравнение кривых 1 и 2 на рис.2 показывает, что сворачивание нанопластин с большими продольными размерами (100–150 нм) в наносвитки не привело к существенным изменениям в их спектрах поглощения по сравнению со случаем нанопластин прямоугольной формы с характерным продольным размером 20–70 нм. Это объясняется тем, что наибольшее влияние на оптические свойства данных объектов оказывает эффект размерного квантования в направлении поперечного размера структуры (толщины пластины или одного слоя свитка), который практически одинаков для исследуемых наносвитков и нанопластин. На рис.2 приведен также спектр поглощения сферических кванто-

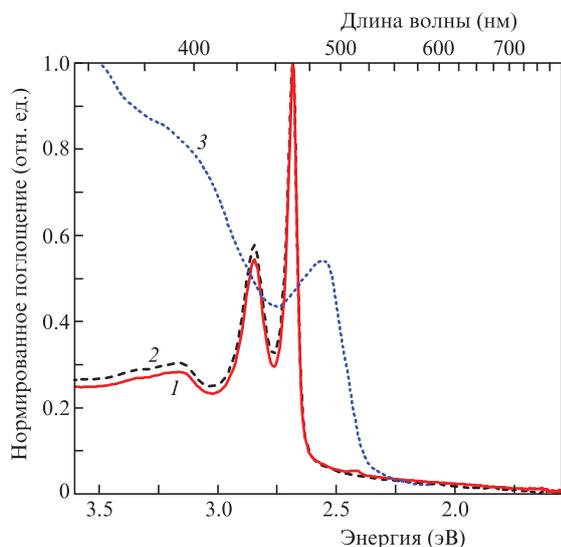


Рис.2. Спектры поглощения света раствором наносвитков CdSe (1) и нанопластин CdSe (2) в гексане, а также спектр поглощения КТ CdSe ($r = 2.1$ нм) по данным [55] (3).

вых точек (КТ) CdSe радиусом $r = 2.1$ нм (кривая 3), полученный в [55]. Сравнение показывает, что экситонные полосы поглощения наносвитков значительно уже, чем сферических нанокристаллов, которые в настоящее время активно используются для создания нанофотонных и оптоэлектронных устройств.

На рис.3 представлены спектры фотолюминесценции наносвитков CdSe и соответствующих им нанопластин при $T = 300$ К. Максимумы межзонной люминесценции соответствуют энергиям 2.601 эВ (477 нм) для наносвитков и 2.634 эВ (471 нм) для нанопластин. Оценка ширины полос люминесценции показывает, что $\Delta E \approx 140$ мэВ ($\Delta\lambda \approx 25$ нм) для наносвитков и ~ 110 мэВ (20 нм) для нанопластин. Таким образом, наблюдается красный сдвиг межзонной люминесценции наносвитков относительно нанопластин $\delta E \approx 33$ мэВ (~ 6 нм). Этот сдвиг может быть объяснён влиянием внутреннего электрического поля, обусловленного возникновением механических напряжений при изгибе нанопластин, когда они сворачиваются в наносвитки. Кроме того, изменение геометрии квазидвумерной структуры с плоской на свернутую может приводить к некоторой модификации положения энергетических уровней в потенциальной яме и, следовательно, к красному сдвигу люминесценции. В свою очередь, уширение полосы межзонной люминесценции наносвитков по сравнению с нанопластинами объясняется тем, что она в большей степени перекрывается с полосой люминесценции дефектов, чем в случае нанопластин.

Для сравнения на рис.3 приведен спектр фотолюминесценции сферических КТ CdSe радиусом $r = 2.1$ нм (кривая 3) из работы [55]. Максимум межзонной люминесценции соответствует энергии $E = 2.4$ эВ (517 нм), а ширина полосы межзонной люминесценции $\Delta E = 170$ мэВ ($\Delta\lambda = 40$ нм). Таким образом, полосы межзонной люминесценции наносвитков и нанопластин оказываются значительно уже, чем сферических нанокристаллов. Поэтому для фундаментальных и прикладных задач нанофотоники, в которых требуются узкие полосы люминесценции, наиболее предпочтительным является использование квазидвумерных коллоидных нанокристаллов винтовой или планарной формы, а не КТ сферической или тетраподной формы.

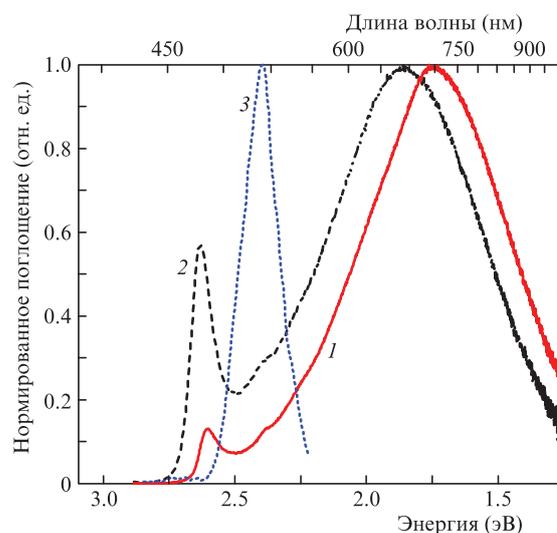


Рис.3. Спектры фотолюминесценции наносвитков CdSe (1) и нанопластин CdSe (2), а также спектр фотолюминесценции КТ CdSe ($r = 2.1$ нм) по данным [55] (3).

Из рис.3 также видно заметное падение интенсивности межзонной люминесценции наносвитков по сравнению с нанопластинами. Причина этого заключается в том, что при сворачивании нанопластин происходит перераспределение заряда на противоположных гранях слоя свитка в связи с изменением расстояния между соседними атомами, что может приводить к тушению люминесценции. Кроме того, из-за деформации нанопластин при сворачивании на их поверхности возможно образование различных дефектов, например вакансий, которые могут служить ловушками для фотовозбуждённых носителей заряда. Помимо межзонной люминесценции с максимумами в окрестности энергий квантов 2.7–2.8 эВ, справа от них на рис.3 как для наносвитков, так и для нанопластин наблюдаются широкие полосы фотолюминесценции, обусловленные наличием дефектов. Максимумы этих полос приходятся на энергии $E = 1.74$ эВ (694 нм) для наносвитков и 1.86 эВ (640 нм) для нанопластин. Ширины полос на полувысоте таковы: $\Delta E = 660$ мэВ ($\Delta\lambda = 254$ нм) и 690 мэВ (242 нм). Таким образом, для люминесценции дефектных состояний также наблюдается красный сдвиг.

4. Кинетика затухания фотолюминесценции

Для синтезированных в работе наносвитков CdSe с продольным размером 100–150 нм и нанопластин CdSe с продольным размером 50–70 нм в соответствующих максимумах межзонной люминесценции ($\lambda = 477$ и 471 нм) были получены кривые затухания интенсивности I фотолюминесценции при $T = 300$ К (рис.4). Результаты для наносвитков и нанопластин прямоугольной формы практически совпадают (на рис.4 им соответствует кривая 1). Это означает, что сворачивание пластин в свитки при увеличении их продольного размера не приводит к существенному изменению динамики релаксации возбуждённых состояний.

Большой интерес представляет сравнение характера затухания люминесценции исследуемых здесь наносвитков CdSe с соответствующим поведением люминесценции сферических нанокристаллов CdSe. Для этого на рис.4 приведена кривая затухания люминесценции для КТ CdSe

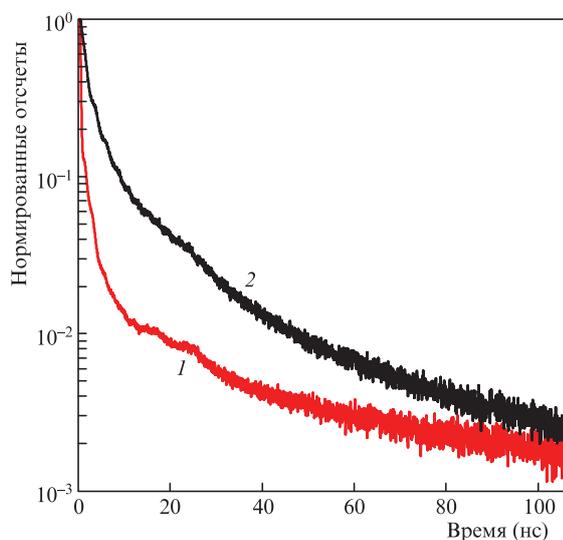


Рис.4. Кривые затухания интенсивности фотолюминесценции в максимумах, соответствующих межзонной люминесценции, для наносвитков CdSe (1) и КТ CdSe (2) при $T = 300$ К. Кривая затухания для нанопластин CdSe идентична кривой 1.

в максимуме экситонного пика ($\lambda = 586$ нм). Анализ кривых затухания показывает, что в обоих случаях полученные экспериментальные зависимости $I(t)$ на всём исследованном временном интервале $t \in [0; 100]$ нс являются существенно неэкспоненциальными. Тем не менее для описания начальной стадии затухания люминесценции наносвитков CdSe и КТ CdSe нами были оценены характерные значения их временных констант ($\tau_{scr} = 1.6$ нс и $\tau_{QD} = 3.5$ нс), использование которых дает возможность с помощью простого соотношения $I(t)/I_0 \propto \exp(-t/\tau)$ разумно передать ход кривых 1 и 2 при $t \lesssim 10$ нс. Полученные константы τ_{scr} и τ_{QD} различаются более чем в два раза, что указывает на значительное различие характерных времён затухания интенсивности фотолюминесценции наносвитков и КТ на начальной стадии релаксации. Более того, из анализа результатов следует, что синтезированные здесь квазидвумерные нанокристаллы CdSe обладают наименьшими временными константами (определяющими кинетику фотолюминесценции) из всех известных типов коллоидных полупроводниковых нанокристаллов, включая КТ сферической [42] и тетраподной [56] форм.

5. Заключение

В работе получены и исследованы коллоидные полупроводниковые наноразмерные структуры, представляющие собой наносвитки CdSe. Исследована их морфология, определены размеры, изучены спектры и кинетика фотолюминесценции. Установлено, что при достаточно большом продольном размере нанопластин CdSe ($A, B \geq 100$ нм) в процессе их синтеза происходит образование наносвитков, а не тонких наноструктур плоской прямоугольной формы. Продемонстрировано, что полученные наноструктуры в форме свитков обладают рядом привлекательных для приложений оптических свойств и определёнными преимуществами по сравнению с коллоидными полупроводниковыми КТ с точки зрения решения комплекса фундаментальных и прикладных задач нанофотоники. К ним, в частности, относятся большие силы осцилляторов радиационного перехода, малые ширины спектров люминесценции, малое время затухания люминесценции. Это делает наносвитки CdSe перспективными объектами для использования в качестве элементной базы оптоэлектронных устройств. Они могут применяться, например, в качестве эмиттеров в гибридных органико-неорганических светодиодах, функционирующих в коротковолновой части видимого спектра с чистым цветом, высоким внешним квантовым выходом и низкими рабочими напряжениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-22-00273), РФФИ (гранты № 14-02-31269-мол-а, 14-02-90452-укр, 15-02-07777-а, 15-02-05856-а), программ «Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения» и «Фундаментальные основы и экспериментальная реализация перспективных полупроводниковых лазеров в интересах промышленности и технологий» Отделения физических наук РАН и программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 1.

1. Lunt R.R., Osedach T.P., Brown P.R., Rowehl J.A., Bulović V. *Adv. Mater.*, **23**, 5712 (2011).
2. Guo C., Lin Y.-H., Witman M.D., Smith K.A., Wang C., Hexemer A., Strzalka J., Gomez E.D., Verduzco R. *Nano Lett.*, **13**, 2957 (2013).
3. Chang L.-Y., Lunt R.R., Brown P.R., Bulović V., Bawendi M.G. *Nano Lett.*, **13**, 994 (2013).

4. Oulton R.F. *Mater. Today*, **15**, 592 (2012).
5. Liu X., Zhang Q., Yip J.N., Xiong Q., Sum T.C. *Nano Lett.*, **13**, 5336 (2013).
6. Khurgin J.B., Sun G. *Nature Photon.*, **8**, 468 (2014).
7. Nikolaenko A.E., Papisimakis N., Chipouline A., De Angelis F., Fabrizio E.D., Zheludev N.I. *Opt. Express*, **20**, 6068 (2012).
8. Jin C.-Y., Wada O. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 133001 (2014).
9. O'Dell D., Serey X., Erickson D. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 043112 (2014).
10. Wang Y., Liao C.R., Wang D.N. *Opt. Lett.*, **37**, 4747 (2012).
11. Arslanagic S., Ziolkowski R.W. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, **13**, 80 (2015).
12. Кузнецова Т.И., Лебедев В.С. *Квантовая электроника*, **32**, 727 (2002).
13. Jones R., Rong H., Liu A., Fang A. W., Hak D., Cohen O. *Opt. Express*, **13**, 519 (2005).
14. Kuznetsova T.I., Lebedev V.S. *Phys. Rev. E*, **78**, 016607 (2008).
15. Gramotnev D.K., Bozhevolnyi S.I. *Nature Photon.*, **8**, 13 (2014).
16. Chen Z.-X., Wu Z.-J., Ming Y., Zhang X.-J., Lu Y.-Q. *AIP Advances*, **4**, 017103 (2014).
17. Wei W., Zhang X., Ren X. *Nanoscale Research Lett.*, **9**, 599 (2014).
18. Naber A., Molenda D., Fischer U.C., Maas H.-J., Höppener C., Lu N., Fuchs H. *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 210801 (2002).
19. Кузнецова Т.И., Лебедев В.С. *Квантовая электроника*, **33**, 931 (2003).
20. Kuznetsova T.I., Lebedev V.S., Tselik A.M. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, **6**, 338 (2004).
21. Novotny L., Stranick S.J. *Annual Rev. Phys. Chem.*, **57**, 303 (2006).
22. Huber C., Trügler A., Hoheneste U., Priorc Y., Kautek W. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 2289 (2014).
23. Yatsui T., Isumi K., Kourogi M., Ohtsu M. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2257 (2002).
24. Кузнецова Т.И., Лебедев В.С. *Письма в ЖЭТФ*, **79**, 70 (2004).
25. Kuznetsova T.I., Lebedev V.S. *Phys. Rev. B*, **70**, 035107 (2004).
26. Кузнецова Т.И., Лебедев В.С. *Квантовая электроника*, **34**, 361 (2004).
27. Agranovich V.M., Gartstein Yu.N., Litinskaya M. *Chem. Rev.*, **111**, 5179 (2011).
28. Wiederrecht G.P., Wurtz G.A., Bouhelier A. *Chem. Phys. Lett.*, **461**, 171 (2008).
29. Lebedev V.S., Vitukhnovsky A.G., Yoshida A., Kometani N., Yonezawa Y. *Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **326**, 204 (2008).
30. Лебедев В.С., Медведев А.С., Васильев Д.Н., Чубич Д.А., Витухновский А.Г. *Квантовая электроника*, **40**, 246 (2010).
31. Лебедев В.С., Медведев А.С. *Квантовая электроника*, **42**, 701 (2012).
32. Лебедев В.С., Медведев А.С. *Квантовая электроника*, **43**, 1065 (2013).
33. Lekeufack D.D., Brioude A., Coleman A.W., Miele P., Bellessa J., Zeng L.D., Stadelmann P. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 253107 (2010).
34. Zengin G., Johansson G., Johansson P., Antosiewicz T.J., Käll M., Shegai T. *Scient. Reports*, **3**, 3074 (2013).
35. Antosiewicz T.J., Apell S.P., Shegai T. *ACS Photon.*, **1**, 454 (2014).
36. Anikeeva P.O., Madigan C.F., Halpert J.E., Bawendi M.G., Bulović V. *Phys. Rev. B*, **78**, 085434 (2008).
37. Qian L., Zheng Y., Xue J., Holloway P.H. *Nature Photon.*, **5**, 543 (2011).
38. Ващенко А.А., Лебедев В.С., Витухновский А.Г., Васильев Р.Б., Саматов И.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **96**, 118 (2012).
39. Витухновский А.Г., Ващенко А.А., Лебедев В.С., Васильев Р.Б., Брунков П.Н., Бычковский Д.Н. *ФТП*, **47**, 962 (2013).
40. Song K.W., Costi R., Bulović V. *Adv. Mater.*, **25**, 1420 (2013).
41. Ho M.D., Kim D., Kim N., Cho S.M., Chae H. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 12369 (2013).
42. Lee K.-H., Lee J.-H., Kang H.-D., Park B., Kwon Y., Ko H., Lee C., Lee J., Yang H. *ACS Nano*, **8**, 4893 (2014).
43. Wong J.I., Mishra N., Xing G., Li M., Chakraborty S., Sum T.C., Shi Y., Chan Y., Yang H.Y. *ACS Nano*, **8**, 2873 (2014).
44. Ithurria S., Tessier M.D., Mahler B., Lobo R.P.S.M., Dubertret B., Efros A.L. *Nat. Mater.*, **10**, 936 (2011).
45. Mahler B., Nadal B., Bouet C., Patriache G., Dubertret B. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 18591 (2012).
46. Tessier M.D., Biadala L., Bouet C., Ithurria S., Abecassis B., Dubertret B. *ACS Nano*, **7**, 3332 (2013).
47. Соколик М.С., Васильев Р.Б., Гаськов А.М. *Ж. неорг. химии*, **59**, 577 (2014).
48. Feldmann J., Peter G., Goebel E.O., Dawson P., Moore K., Foxon C., Elliot R.J. *Phys. Rev. B*, **59**, 2337 (1987).
49. Ващенко А.А., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Селюков А.С., Васильев Р.Б., Соколик М.С. *Письма в ЖЭТФ*, **100**, 94 (2014).
50. Vitukhnovsky A.G., Lebedev V.S., Selyukov A.S., Vashchenko A.A., Vasiliev R.B., Sokolikova M.S. *Chem. Phys. Lett.*, **619**, 185 (2015).
51. Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., Ващенко А.А., Васильев Р.Б., Соколик М.С. *ЖЭТФ*, **147**, 687 (2015).
52. Chen Z., Nadal B., Mahler B., Aubin H., Dubertret B. *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 295 (2014).
53. Huang Y., Li T. *J. Appl. Mech.*, **80**, 040903 (2013).
54. Peng X., Zhou J., Wang W., Cao D. *Carbon N. Y.*, **48**, 3760 (2010).
55. Ekimov A.I., Hache F., Schanne-Klein M.C., Ricard D., Flytzanis C., Kudryavtsev I.A., Yazeva T.V., Rodina A.V., Efros A.L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **10**, 100 (1993).
56. Vitukhnovsky A.G., Shul'ga A.S., Ambrozevich S.A., Khokhlov E.M., Vasiliev R.B., Dirin D.N., Yudson V.I. *Phys. Lett. A*, **373**, 2287 (2009).