

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОПЛАСТИНОК CdSe В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ НА НЕЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ

Г. А. Клименко ^{a*}, М. В. Козлова ^a, К. В. Ежова ^b, Б. М. Саиджонов ^c, Р. Б. Васильев ^c,
А. М. Смирнов ^{d,e}

^a Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

^b Институт «Высшая инженерно-техническая школа», Университет ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Россия

^c Факультет наук о материалах, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

^d Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

^e Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук
125009, Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 сентября 2023 г.,
после переработки 20 октября 2023 г.
Принята к публикации 26 октября 2023 г.

Экспериментально исследованы особенности нелинейного поглощения коллоидных растворов нанопластинок CdSe толщиной 2.5 и 3.5 монослоя в зависимости от концентрации в случае их резонансного стационарного возбуждения наносекундными лазерными импульсами. Обнаружен рост амплитуды дифференциального пропускания и интенсивности насыщения поглощения на длинах волн экситонных переходов, связанных с тяжелыми дырками, для двух серий образцов при увеличении концентрации нанопластинок в коллоидном растворе, что объяснено процессом заполнения фазового пространства экситонов. Для коллоидных растворов нанопластинок высокой концентрации выявлена область отрицательных значений дифференциального пропускания при достаточно высокой интенсивности накачки и объяснена переходом от режима насыщения поглощения к режиму оптического усиления.

DOI: 10.31857/S0044451024030015

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий особый практический и научный интерес вызывают полупроводниковые структуры пониженной размерности. Совершенствование методов коллоидного роста нанокристаллов привело в возможности создания нанокристаллов с заданными оптическими и электронными свойствами ввиду возможности контроля параметров кристаллической решетки, морфологии, размера и размерности, а также возможности создания гетероструктурных нанокристаллов: квантовых точек [1], нанотетраподов [2, 3], нанопластинок [4–6] и наносвистков [7].

Квантово-размерные полупроводниковые кристаллы характеризуются пространственным ограничением движения носителей заряда, что определяет значительную модификацию их энергетического спектра от исходного спектра объемного полупроводника. Контролируя размер и размерность нанокристаллов, возможно создавать объекты с заданной эффективной шириной запрещенной зоны, с управляемым дискретным оптическим спектром. Помимо этого, определяющим отличием квантово-размерных полупроводниковых кристаллов от объемных полупроводников являются существенно большие сила осциллятора и энергия связи экситонов. Общая особенность всех низкоразмерных структур — особый вид спектров поглощения и фотолюминесценции (ФЛ) вследствие возможности проявления в них влияния формы

* E-mail: klimenko.ga17@physics.msu.ru

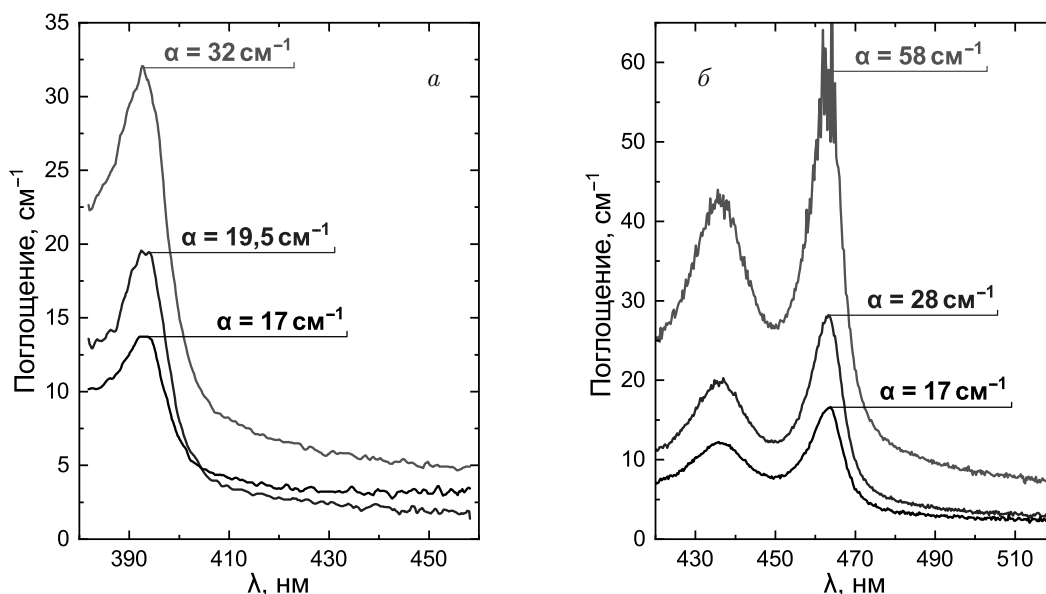


Рис. 1. (В цвете онлайн) Линейные спектры поглощения коллоидных нанопластинок: CdSe393 (а) и CdSe463 (б)

наноструктур на энергию связи экситонов [8], локализацию зарядов [9], зарядово-индуцированный эффект Штарка [10].

Вышеупомянутые особенности нанокристаллов открывают исключительные возможности для проектирования эффективных оптоэлектронных приборов, принцип действия которых определяется экситонными процессами. В качестве примеров можно отметить успешное создание фототранзисторов [11], высокоэффективных солнечных концентраторов [12–14], светодиодов [15–17], рабочих элементов активной среды лазера [18], модуляторов добротности [19], биомаркеров [20].

Сравнительно недавно был впервые синтезирован новый тип наночастиц [4] — полупроводниковые двумерные нанокристаллы планарной геометрии (CdSe, CdS, CdTe, CdSe/CdS, CdSe/CdZnS), получившие название «нанопластины». За счет латеральных размеров 30–200 нм и толщины, не превышающей нескольких атомных слоев (3–7 монослоев), эффект размерного квантования в данных объектах реализуется только в одном выделенном направлении. Важной особенностью подобных нанокристаллов выступает возрастающее отношение поверхностных атомов к атомам в объеме, что приводит к повышению влияния поверхностных состояний на оптические свойства наноструктур [21, 22]. При захвате носителей заряда на локализованные поверхностные состояния в результате оже-рекомбинации [23–26] возможно как увеличение времен релаксации ФЛ при излучательной релаксации с поверхностных состояний, так и ускоренная депопуляция при преобладании безызлучательных процессов. Данное свой-

ство особенно характерно и для ультратонких нанопластинок. Для контроля данных свойств с помощью коллоидного синтеза выращиваются гетероструктурные нанокристаллы [27], в том числе второго рода, которые представляют особый интерес из-за эффекта фотоиндуцированного разделения зарядов [28, 29].

Кроме того, для нанопластинок характерны гораздо меньшие значения стока сдвига и времени затухания люминесценции в сравнении с иными низкоразмерными структурами (в частности, с квантовыми точками) [30]. Третьим эффектом, выделяющим нанопластины на фоне остальных наноструктур, является узкая полоса люминесценции [31].

Данная работа направлена на определение влияния концентрации нанопластинок CdSe в коллоидном растворе на нелинейное изменение поглощения в случае стационарного возбуждения носителей заряда наносекундными лазерными импульсами, а также на установление особенностей насыщения поглощения, обусловленных эффектом заполнения фазового пространства экситонов [32].

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования были выбраны коллоидные растворы нанопластинок CdSe: CdSe393 и CdSe463 с толщинами 2.5 монослоя (1.2 нм) и 3.5 монослоя (1.5 нм) соответственно (цифра в обозначении образцов указывает на длину волны экситонного перехода $1_{hh}-1_e$, связанного с тяжелыми дырками, рис. 1).

Образцы были синтезированы методом коллоидной химии и обладают кристаллической структурой сфалерита. В качестве растворителя использовался гексан, прозрачный в исследуемом оптическом диапазоне. Для проведения измерений коллоидные растворы нанопластинок CdSe помещались в стеклянную кювету толщиной 1 мм. Все измерения проводились при комнатной температуре. Начальная концентрация нанопластинок в коллоидном растворе составляла порядка 10^{15} см^{-3} . Последовательное уменьшение концентрации в 2 и 3 раза проводилось путем добавления растворителя в исходный коллоидный раствор. Для характеристики коллоидных растворов нанопластинок CdSe различных толщин и концентраций были измерены их линейные спектры поглощения. На спектрах поглощения коллоидных растворов нанопластинок CdSe с толщинами 2.5 монослоя (рис. 1а) максимум поглощения на длине волны 393 нм соответствует экситонному переходу $1_{hh}-1_e$. Положение данного максимума не зависит от концентрации раствора. В зависимости от значения коэффициента поглощения α (рассчитанного из закона Бугера $I = I_0 e^{-\alpha d}$) коллоидные растворы нанопластинок CdSe393 были переобозначены как CdSe14, CdSe19 и CdSe32 для малой, средней и большой концентрации раствора соответственно. Спектры линейного поглощения коллоидных нанопластинок CdSe толщиной 3.5 монослоя (рис. 1б) характеризуются двумя максимумами, положение которых не зависят от концентрации, и соответствуют экситонным переходам, связанным с легкими ($1_{lh}-1_e$; 436 нм) и тяжелыми ($1_{hh}-1_e$; 463 нм) дырками. Аналогично для коллоидных растворов нанопластинок CdSe463 были введены обозначения CdSe17, CdSe28 и CdSe58 для малой, средней и большой концентрации раствора соответственно. Разрешимость экситонных пиков при комнатной температуре указывает на их значительную энергию связи [33] и монодисперсность нанокристаллов по толщине.

Для определения нелинейного изменения поглощения коллоидных растворов нанопластинок был применен метод накачки и зондирования. Возбуждение образцов осуществлялось импульсами третьей гармоники (360 нм) лазера $\text{Nd}^{3+} : \text{YAP}$ ($\text{Nd}^{3+} : \text{YAlO}_3$; $\lambda = 1080 \text{ нм}$), работающего в режиме модуляции добротности (длительность импульсов $\tau \approx 9 \text{ нс}$). Одновременное зондирование осуществлялось широкополосной ФЛ органических красителей BBQ ($\text{C}_{48}\text{H}_{66}\text{O}_2$) для нанопластинок CdSe393, а также Coumarin-120 ($\text{C}_{10}\text{H}_9\text{NO}_2$) для нанопластинок CdSe463. Подбор красителей определялся со-

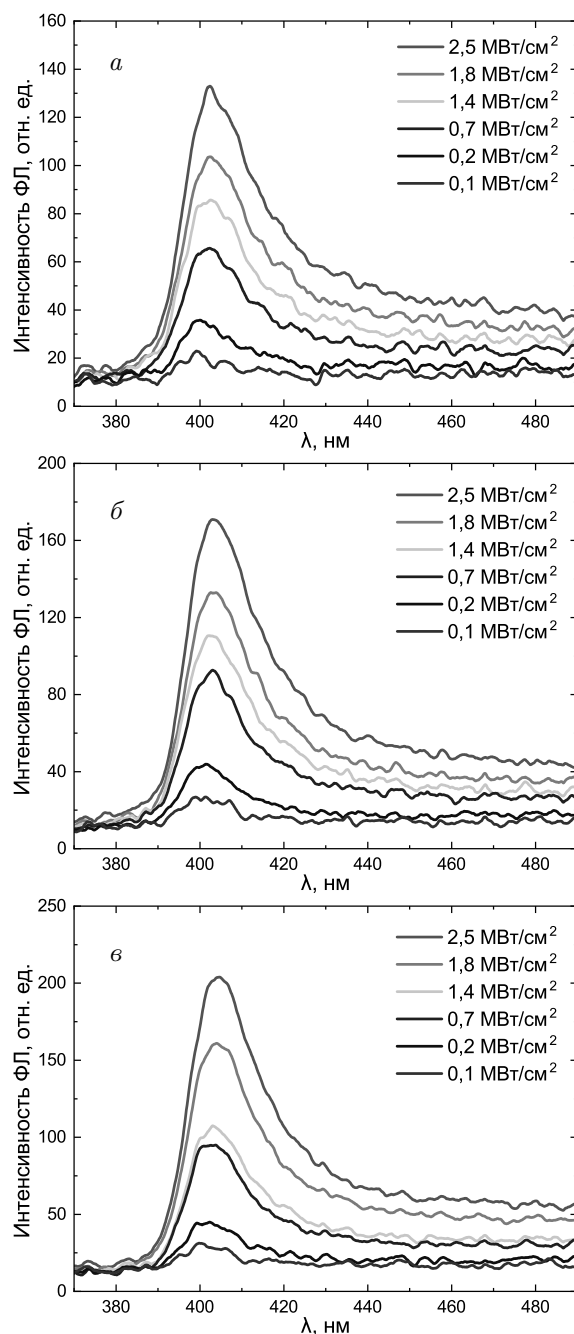


Рис. 2. (В цвете онлайн) Спектры ФЛ коллоидных нанопластинок CdSe393 при различных интенсивностях накачки для растворов малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации (время экспозиции $t = 3 \text{ с}$)

гласно их спектрам поглощения с целью охвата по длинам волн основных полос экситонного поглощения исследуемых нанопластинок. Кроме того, учитывались условия пространственного и временного совмещения лучей накачки и зондирования. В частности, длительность ФЛ красителей составляет порядка 1 нс, что позволяло выполнить условие одновременного возбуждения и зондирования образцов.

Интенсивность возбуждающего излучения I_{pump} изменялась от 0.3 до 2.5 МВт/см² при помощи нейтральных светофильтров. Спектры пропускания и ФЛ нанопластинок CdSe были измерены с помощью CCD-камеры Pixis 256, совмещенной с полихроматором SpectraPro 2300.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По спектрам ФЛ нанопластинок CdSe (рис. 2 и 3) были построены зависимости длин волн, соответствующих максимуму ФЛ, и значений полуширины пика ФЛ от интенсивности накачки (рис. 4а,б).

По спектрам ФЛ коллоидных нанопластинок CdSe393 (рис. 2), CdSe463 (рис. 3) при различных концентрациях и интенсивностях накачки установлены длины волн их максимумов (402 ± 3 нм и 472 ± 1 нм соответственно), отличных от длин волн максимумов поглощения (393 нм и 463 нм соответственно) ввиду стоксова сдвига (около 10 нм; излучение фотонов сдвигается относительно их поглощения в длинноволновую область в том числе за счет передачи части энергии в излучение оптического фонона). Кроме того, было обнаружено, что для образцов CdSe463 ширина пиков ФЛ увеличивается с ростом интенсивности накачки (рис. 4а,б), а максимум спектра ФЛ сдвигается в красную область (рис. 4д,е). Уширение и сдвиг пиков ФЛ на величину около 4 нм (или 23 мэВ) объясняется излучением заряженных экситонов (трионов) [34] и биэкситонов [35]. Кроме этого, отмечено, что с увеличением плотности излучающих наночастиц амплитуды пиков ФЛ при одинаковых уровнях возбуждения имеют большие значения (рис. 4в,з).

Для определения особенностей нелинейного поглощения образцов был применен метод накачки и зондирования, подробно описанный в работе [36]. По измеренным спектрам пропускания были рассчитаны спектры дифференциального пропускания (differential transmission, DT) [37]:

$$DT(\lambda) = \frac{T(\lambda) - T_0(\lambda)}{T_0(\lambda)}, \quad (1)$$

где $T(\lambda)$ и $T_0(\lambda)$ – спектры пропускания возбужденных и невозбужденных образцов соответственно. На рис. 5 и 6 представлены спектры DT коллоидных нанопластинок при различных интенсивностях накачки. Для образцов серии CdSe393 измеренный максимум спектра DT связан с просветлением экситонного перехода из подзоны тяжелых дырок. Для образцов серии CdSe463 установлено наличие двух максимумов, соответствующих экситонным переходам из подзон легких и тяжелых дырок.

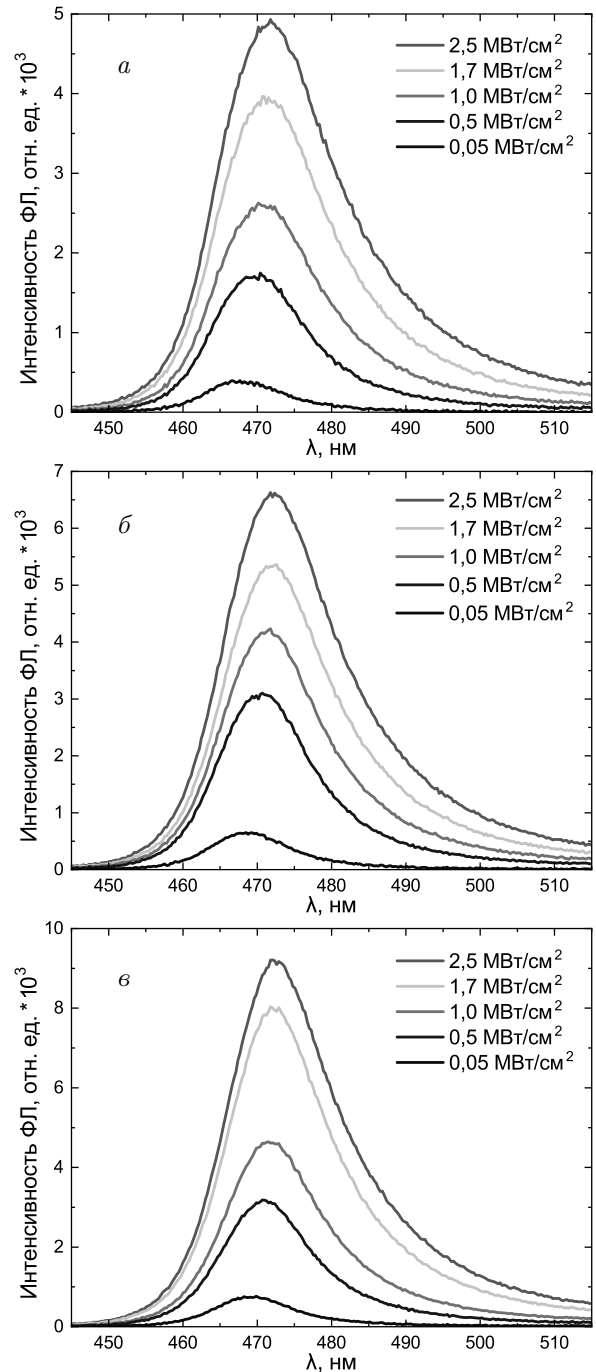


Рис. 3. (В цвете онлайн) Спектры ФЛ коллоидных нанопластинок CdSe463 при различных интенсивностях накачки для растворов малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации (время экспозиции $t = 3$ с)

На основе этих данных были также построены зависимости максимумов DT от интенсивности накачки (рис. 7, 8). Для определения интенсивностей насыщения I_s для каждого из исследуемых экситонных переходов в нанопластинках CdSe была использована полуэмпирическая зависимость ампли-

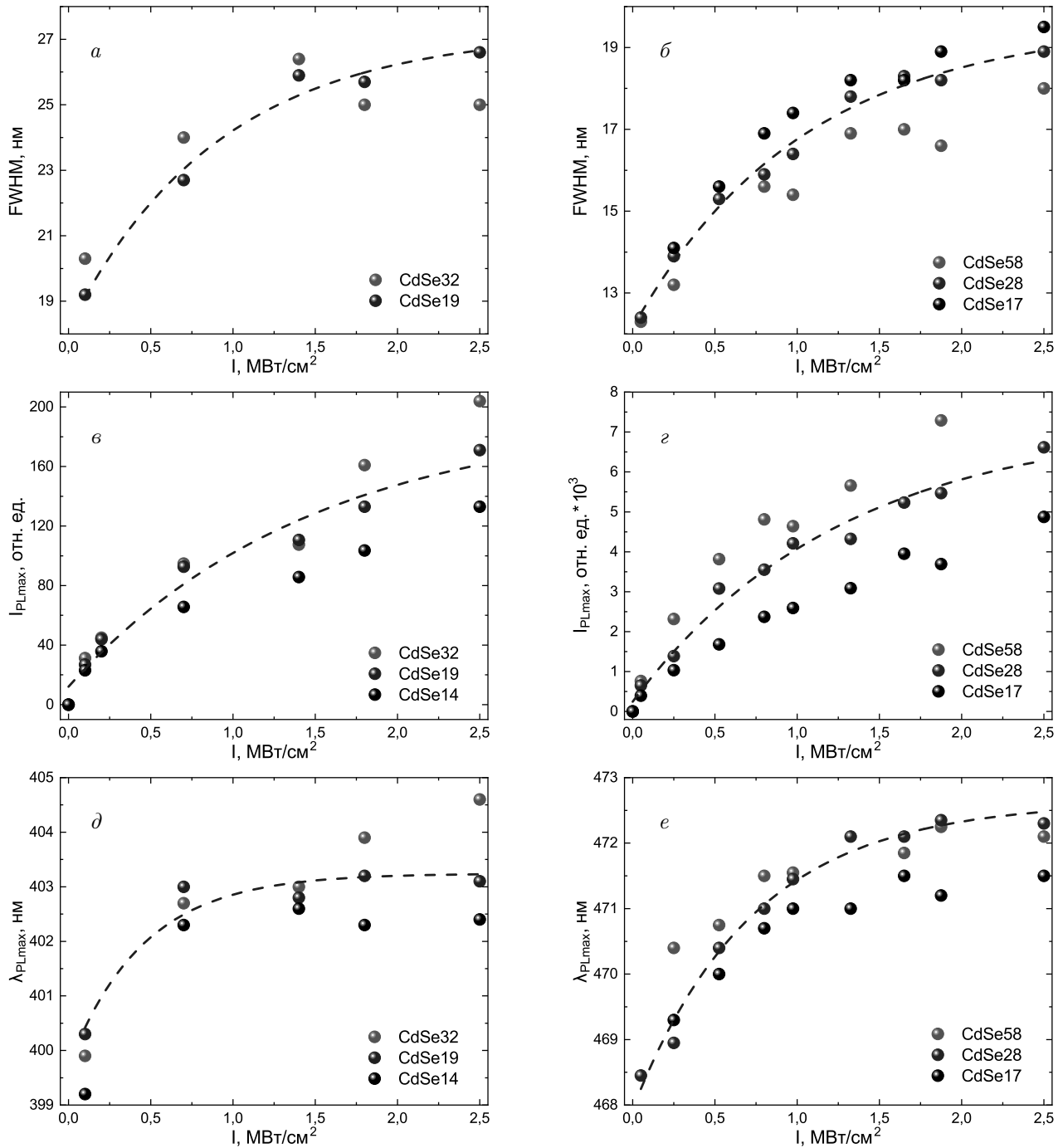


Рис. 4. (В цвете онлайн) Зависимость полуширин (*а, б*), интенсивностей (*в, г*) и длин волн (*д, е*) пиков ФЛ коллоидных растворов CdSe393 (*а, в, д*) и CdSe463 (*б, г, е*) от интенсивности накачки. Синие штриховые линии представлены для улучшения визуального восприятия экспериментальных данных

туды DT от интенсивности накачки [37]:

$$DT(I) = DT_{max} \left(1 - \frac{1}{1 + I/I_s} \right). \quad (2)$$

Для нанопластинок CdSe393 (рис.7), согласно формуле (2), были получены значения $I_s \approx 0.5 \pm 0.1 \text{ MBт/см}^2$ для образца низкой кон-

центрации CdSe14 и $I_s \approx 0.6 \pm 0.1 \text{ MBт/см}^2$ для образца средней концентрации CdSe19. Для нанопластинок CdSe463 (рис.8) были получены значения $I_s(lh) \approx 0.9 \pm 0.5 \text{ MBт/см}^2$ и $I_s(hh) \approx 1.4 \pm 0.4 \text{ MBт/см}^2$ для образца низкой концентрации CdSe17; $I_s(lh) \approx 0.7 \pm 0.2 \text{ MBт/см}^2$ и $I_s(hh) \approx 1.6 \pm 0.6 \text{ MBт/см}^2$ для образца сред-

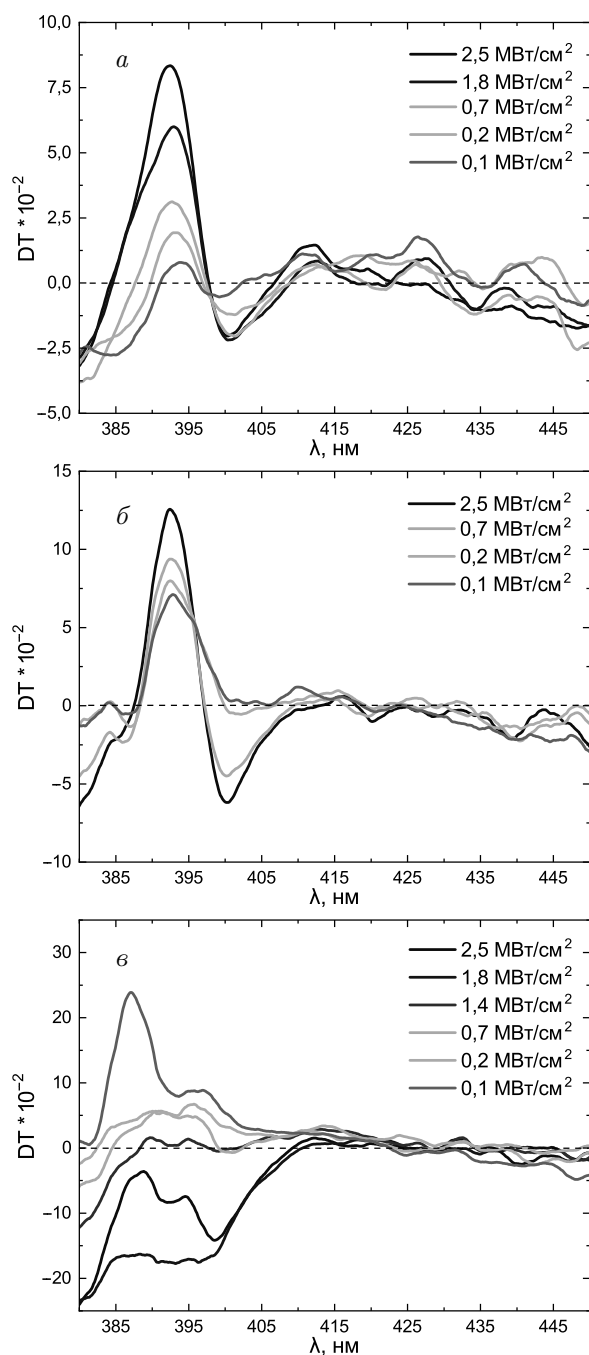


Рис. 5. (В цвете онлайн) Спектры дифференциального пропускания коллоидных нанопластинок CdSe393 малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации при различных интенсивностях накачки

ней концентрации CdSe28. Это свидетельствует о росте амплитуды DT и интенсивности насыщения поглощения на длинах волн экситонных переходов $1_{hh}-1_e$ для обоих образцов, CdSe393 и CdSe463, при увеличении концентрации нанопластинок в коллоидном растворе, что объяснено процессом заполнения фазового пространства экситонов.

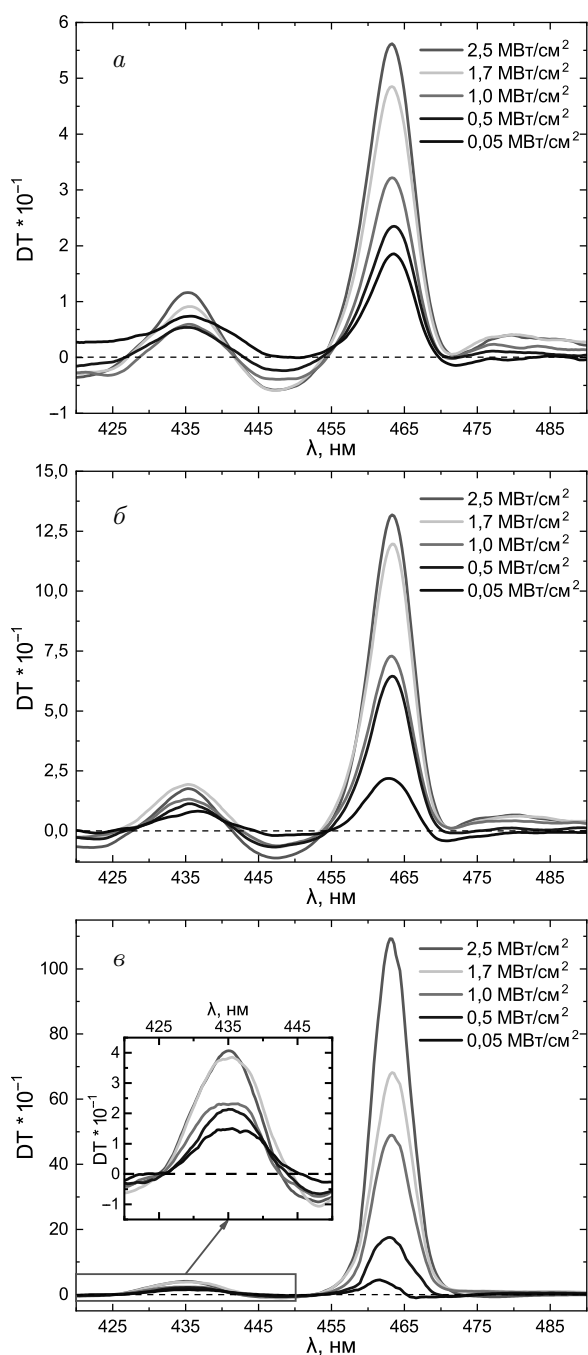


Рис. 6. (В цвете онлайн) Спектры дифференциального пропускания коллоидных нанопластинок CdSe463 малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации при различных интенсивностях накачки

Особый интерес представлял случай высокой концентрации для коллоидных растворов нанопластинок обеих толщин. Для раствора нанопластинок CdSe393 в случае высокой концентрации (рис. 7б) при умеренных значениях интенсивности накачки (до 1.5 MBt/cm^2) выявлен рост пропускания, тогда как при значениях интенсивности накачки бо-

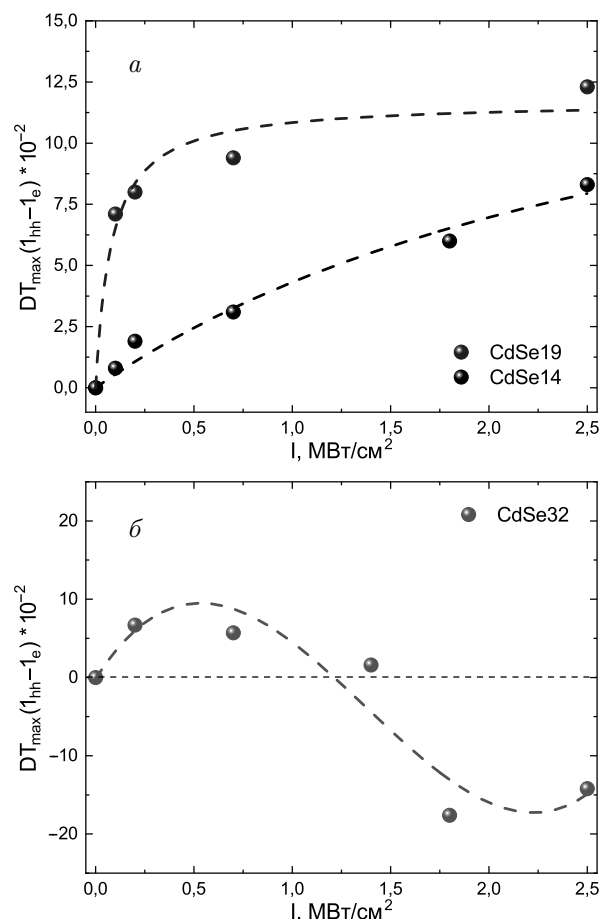


Рис. 7. (В цвете онлайн) Зависимость максимумов дифференциального пропускания, соответствующих переходу $1_{hh}-1_e$, от интенсивности накачки для коллоидных нанопластинок CdSe393 малой/средней (а) и высокой (б) концентрации

лее $1.5 \text{ MBT}/\text{cm}^2$ обнаружен, наоборот, рост поглощения. Такой переход от увеличения к уменьшению пропускания может быть объяснен проявлением вынужденного излучения при резонансном возбуждении экситонного перехода, связанного с тяжелыми дырками, и переходом от режима насыщения поглощения к режиму оптического усиления [38]. Тем не менее наличие оптического усиления или усиленного спонтанного излучения является существенным, но не в полной мере достаточным условием для реализации вынужденного излучения в сильно ограниченных системах. Отсутствие отрицательного DT-сигнала для экситонных переходов $1_{hh}-1_e$ в коллоидных растворах с меньшей концентрацией нанопластинок CdSe можно объяснить недостаточной интенсивностью накачки или сильно ограниченной длиной активной среды (кювета 1 мм).

По спектрам DT коллоидного раствора нанопластинок CdSe463 высокой концентрации (рис. 8в) бы-

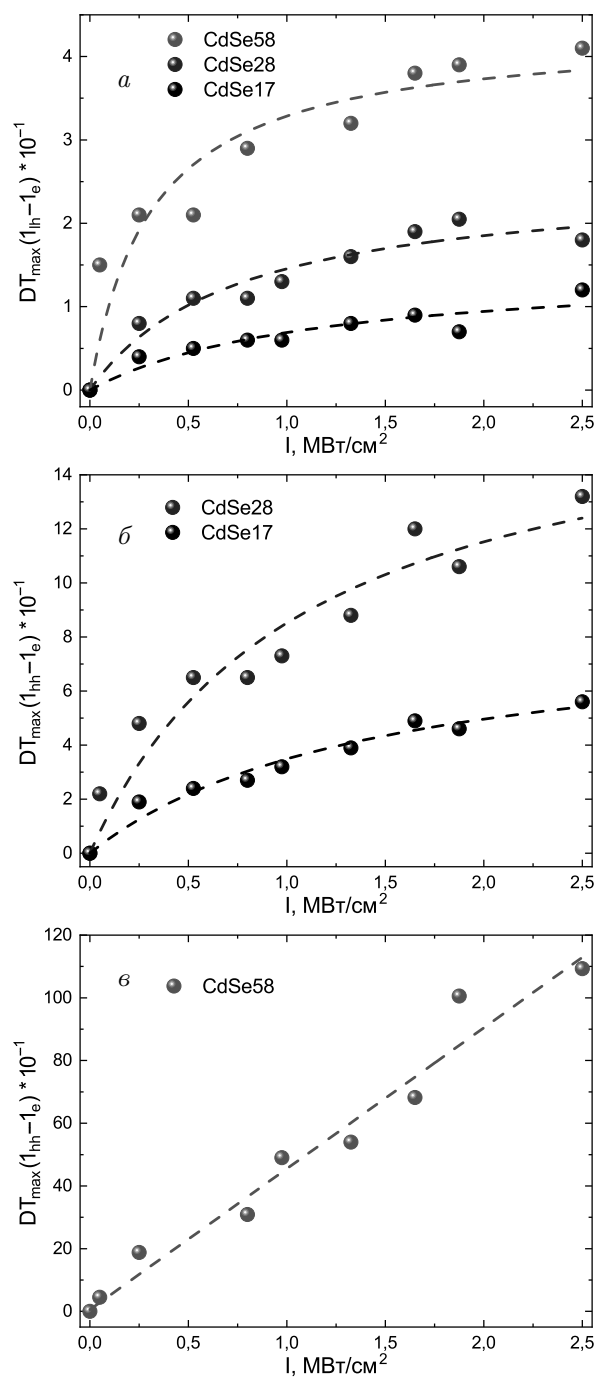


Рис. 8. (В цвете онлайн) Зависимость максимумов дифференциального пропускания, соответствующих пикам $1_{lh}-1_e$ (а) и $1_{hh}-1_e$ (б, в), от интенсивности накачки для коллоидных нанопластинок CdSe463 малой/средней (а, б) и высокой (в) концентрации

ли обнаружены рост пропускания и насыщение поглощения на длине волны экситонных переходов, связанных с легкими и тяжелыми дырками, однако переход от насыщения поглощения к вынужденному излучению выявлен не был (отсутствие области с отрицательными значениями DT). Для

экситонного перехода $1_{lh}-1_e$, связанного с легкими дырками, согласно формуле (2), было возможно определить интенсивность насыщения поглощения $I_s(lh) \approx 0.5 \pm 0.1$ МВт/см². В случае же экситонного перехода $1_{hh}-1_e$, связанного с тяжелыми дырками, определить данную характеристику не представляется возможным. При увеличении интенсивности возбуждения выявлен резкий, практически линейный, рост амплитуды ДТ, что может свидетельствовать о граничном соотношении интенсивности возбуждения и концентрации коллоидного раствора нанопластинок CdSe463, при превышении которого возможен переход к режиму оптического усиления. Аналогичные результаты были продемонстрированы и объяснены в работе [38]. Недостижение оптического усиления в коллоидном растворе нанопластинок популяции CdSe463 при тех же интенсивностях возбуждения, что и для популяции CdSe393, по-видимому, объясняется различными режимами возбуждения. В случае с нанопластинками CdSe393 возбуждение осуществляется на длине волны, соответствующей резонансному возбуждению экситонов $1_{lh}-1_e$, которые достаточно эффективно передают энергию экситонам, связанным с тяжелыми дырками, $1_{hh}-1_e$ [5, 6], в то время как при возбуждении на длине волны 360 нм в нанопластинках CdSe463 первоначально рождаются свободные электроны и дырки, которым для связывания в экситоны необходимо отдать суммарно энергию $E_b \approx 0.77$ эВ.

Таким образом, в последнем (нерезонансном) случае для достижения оптического усиления требуются большие интенсивности возбуждения. Кроме этого, дополнительные сложности могут возникать с избыточной энергией свободных электронов и дырок, которые как приводят к передаче энергии фононам и локальному нагреву нанопластинок, так и провоцируют безызлучательную оже-рекомбинацию [23–26], опустошающую рабочее состояние.

Процесс оже-рекомбинации в полупроводниковых нанокристаллах может дополнительно приводить к захвату свободных носителей на поверхность и проявляться в ФЛ с участием дефектов. В исследуемых нанопластинках толщиной 2.5 монослоя (CdSe393) и 3.5 монослоя (CdSe463) [39] полоса ФЛ, связанная с дефектами, располагается в диапазоне длин волн 430–700 нм и 470–700 нм соответственно. Как правило, интенсивность ФЛ на дефектах насыщается при уровнях возбуждения низких по сравнению с насыщением поглощения основного экситонного перехода, вследствие того, что время релаксации превышает единицы микросекунд.

4. ВЫВОДЫ

Определено влияние концентрации коллоидных нанопластинок CdSe различных толщин на нелинейное изменение поглощения при стационарном возбуждении носителей заряда наносекундными лазерными импульсами. Для образцов серии CdSe393 реализовано резонансное возбуждение экситонов, связанных с легкими дырками. Обнаружен рост дифференциального пропускания (ДТ) коллоидных растворов нанопластинок CdSe различных концентраций. Просветление, увеличивающееся с ростом оптического возбуждения, объяснено заполнением фазового пространства экситонов. Обнаружено увеличение ДТ коллоидного раствора нанопластинок CdSe393 высокой концентрации (CdSe32) на длине волны экситонного перехода из подзоны тяжелых дырок в подзону проводимости только при интенсивностях накачки до 1.5 МВт/см². При интенсивности накачки выше 1.5 МВт/см² выявлено отрицательное ДТ, которое может быть объяснено переходом от насыщения поглощения к режиму оптического усиления. При возбуждении свободных электронов и дырок, реализованном в коллоидном растворе нанопластинок CdSe463, обнаружен рост ДТ для всех исследуемых концентраций. В исследуемом диапазоне интенсивностей возбуждения переход от насыщения поглощения к режиму оптического усиления не достигается, однако выявлен резкий рост амплитуды ДТ, что может свидетельствовать о граничном соотношении интенсивности возбуждения и концентрации коллоидного раствора нанопластинок CdSe463, при превышении которого возможен переход к режиму оптического усиления.

Благодарности. Выражаем отдельную благодарность В. С. Днепровскому за плодотворное обсуждение результатов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72-10008).

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Matijevic and W.D. Murphy, *Preparation and Properties of Monodispersed Spherical Colloidal Particles of Cadmium Sulfide*, J. Coll. Interface Sci. **86**, 476 (1982).
2. A. D. Golinskaya, A. M. Smirnov, M. V. Kozlova et al., *Tunable Blue-Shift of the Charge-Transfer Photoluminescence in Tetrapod-Shaped CdTe/CdSe Nanocrystals*, Results Phys. **27**, 104488 (2021).

3. A. Fiore, R. Mastria, M. G. Lupo et al., *Tetrapod-Shaped Colloidal Nanocrystals of II-VI Semiconductors Prepared by Seeded Growth*, J. Am. Chem. Soc. **131**, 2274 (2009).
4. S. Ithurria and B. Dubertret, *Quasi 2D Colloidal CdSe Platelets with Thicknesses Controlled at the Atomic Level*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 16504 (2008).
5. A. M. Smirnov, V. N. Mantsevich, D. S. Smirnov et al., *Heavy-Hole and Light-Hole Excitons in Nonlinear Absorption Spectra of Colloidal Nanoplatelets*, Sol. St. Comm. **299**, 113651 (2019).
6. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, B. M. Saidzhonov et al., *Exciton-Exciton Interaction and Cascade Relaxation of Excitons in Colloidal CdSe Nanoplatelets*, J. Luminescence **229**, 117682 (2021).
7. A. S. Baimuratov, Y. K. Gun'ko, A. G. Shalkovskiy et al., *Optical Activity of Chiral Nanoscrolls*, Adv. Opt. Mat. **5**, 1600982 (2017).
8. L. V. Keldysh, *Excitons in Semiconductor-Dielectric Nanostructures*, Phys. Stat. Sol. (a) **164**, 3 (1997).
9. S. Malkmus, S. Kudera, L. Manna et al., *Electron-Hole Dynamics in CdTe Tetrapods*, J. Phys. Chem. B **110**, 17334 (2006).
10. C. Heyn, L. Ranasinghe, M. Zocher et al., *Shape-Dependent Stark Shift and Emission-Line Broadening of Quantum Dots and Rings*, J. Phys. Chem. C **124**, 19809 (2020).
11. E. Lhuillier, A. Robin, S. Ithurria et al., *Electrolyte-Gated Colloidal Nanoplatelets-Based Phototransistor and its Use for Bicolor Detection*, Nano Lett. **14**, 2715 (2014).
12. F. Meinardi, F. Bruni, and S. Brovelli, *Luminescent Solar Concentrators for the Building-Integrated Photovoltaics*, Nature Rev. Mat. **2**, 1 (2017).
13. H. Lee, S. W. Yoon, J. P. Ahn et al., *Synthesis of type II CdTe/CdSe heterostructure tetrapod nanocrystals for PV applications*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **93**, 779 (2009).
14. H. Lee, S. Kim, W.-S. Chung et al., *Hybrid Solar Cells Based on Tetrapod Nanocrystals: The Effects of Compositions and Type II Heterojunction on Hybrid Solar Cell Performance*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **95**, 446 (2011).
15. Z. Chen, B. Nadal, B. Mahler et al., *Quasi-2D Colloidal Semiconductor Nanoplatelets for Narrow Electroluminescence*, Adv. Funct. Mat. **24**, 295 (2014).
16. F. Chen, Q. Lin, H. Shen et al., *Blue Quantum Dot-Based Electroluminescent Light-Emitting Diodes*, Mat. Chem. Frontiers **4**, 1340 (2020).
17. R. B. Vasiliev, D. N. Dirin, M. S. Sokolikova et al., *Growth of Near-IR Luminescent Colloidal CdTe/CdS Nanoheterostructures Based on CdTe Tetrapods*, Mendeleev Commun. **19**, 128 (2009).
18. B. Guzelturk, Y. Kelestemur, M. Olutas et al., *Amplified Spontaneous Emission and Lasing in Colloidal Nanoplatelets*, ACS Nano **8**, 6599 (2014).
19. N. E. Watkins, J. Guan, B. T. Diroll et al., *Surface Normal Lasing from CdSe Nanoplatelets Coupled to Aluminum Plasmonic Nanoparticle Lattices*, J. Phys. Chem. C **125**, 19874 (2021).
20. Y. Wang, V. D. Ta, Y. Gao et al., *Stimulated Emission and Lasing from CdSe/CdS/ZnS Core-Multi-Shell Quantum Dots by Simultaneous Three-Photon Absorption*, Adv. Mat. **26**, 2954 (2014).
21. S. Dayal and C. Burda, *Surface Effects on Quantum Dot-Based Energy Transfer*, J. Am. Chem. Soc. **129**, 7977 (2007).
22. S. F. Wuister, A. van Houselt, C. de Mello Donega et al., *Temperature Antiquenching of the Luminescence from Capped CdSe Quantum Dots*, Angew. Chem. Int. Ed. **43**, 3029 (2004).
23. P. A. Frantsuzov and R. A. Marcus, *Explanation of Quantum Dot Blinking without the Long-Lived Trap Hypothesis*, Phys. Rev. B **72**, 155321 (2005).
24. A. Katsaba, V. Fedyanin, S. Ambrozevich et al., *Characterization of Defects in Colloidal CdSe Nanocrystals by the Modified Thermostimulated Luminescence Technique*, Semiconductors **47**, 1328 (2013).
25. M. S. Zabolotskii, A. V. Katsaba, S. A. Ambrozevich et al., *Reversible and Irreversible Degradation of CdS/ZnSe Nanocrystals Capped with Oleic Acid*, Phys. St. Sol. (RRL)-Rapid Res. Lett. **14**, 2000167 (2020).
26. A. V. Katsaba, S. A. Ambrozevich, V. V. Fedyanin et al., *Effect of Auger Recombination in Ensemble of CdSe Nanocrystals on their Luminescence*, J. Luminescence **214**, 116601 (2019).
27. M. A. Hines and P. Guyot-Sionnest, *Synthesis and Characterization of Strongly Luminescing ZnS-Capped CdSe Nanocrystals*, J. Phys. Chem. **100**, 468 (1996).
28. S. Kumar, M. Jones, S. S. Lo et al., *Nanorod Heterostructures Showing Photoinduced Charge Separation*, Small **3**, 1633 (2007).
29. A. Vitukhnovsky, A. Shul'ga, S. Ambrozevich et al., *Effect of Branching of Tetrapod-Shaped CdTe/CdSe Nanocrystal Heterostructures on their Luminescence*, Phys. Lett. A **373**, 2287 (2009).

30. M. D. Tessier, C. Javaux, I. Maksimovic et al., *Spectroscopy of Single CdSe Nanoplatelets*, ACS Nano **6**, 6751 (2012).
31. P. M. Allen and M. G. Bawendi, *Ternary I-III-IV Quantum Dots Luminescent in the Red to Near-Infrared*, J. Am. Chem. Soc. **130**, 9240 (2008).
32. S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla, and D. A. B. Miller, *Theory of Transient Excitonic Optical Nonlinearities in Semiconductor Quantum-Well Structures*, Phys. Rev. B **32**, 6601 (1985).
33. A. W. Achtstein, A. Schliwa, A. Prudnikau et al., *Electronic Structure and Exciton-Phonon Interaction in Two-Dimensional Colloidal CdSe Nanosheets*, Nano Lett. **12**, 3151 (2012).
34. E. V. Shornikova, L. Biadala, D. R. Yakovlev et al., *Addressing the Exciton Fine Structure in Colloidal Nanocrystals: the Case of CdSe Nanoplatelets*, Nanoscale **10**, 646 (2018).
35. J. Grim, S. Christodoulou, F. Di Stasio et al., *Continuous-Wave Biexciton Lasing at Room Temperature Using Solution-Processed Quantum Wells*, Nature Nanotechnol. **9**, 891 (2014).
36. А. М. Смирнов, А. Д. Голинская, К. В. Ежова и др., *Особенности нелинейного поглощения коллоидных растворов квантовых точек CdSe/ZnS при стационарном однофотонном возбуждении экситонов*, ЖЭТФ **152**, 1046 (2017).
37. O. Svelto, *Principles of Lasers*, Springer New, York (2010), Vol. 620.
38. A. M. Smirnov, A. D. Golinskaya, V. N. Mantsevich et al., *Optical Gain Appearance in the CdSe/CdS Nanoplatelets Colloidal Solution*, Results Phys. **32**, 105120 (2022).
39. B. M. Saidzhonov, V. B. Zaytsev, R. B. Vasiliev, *Effect of PMMA Polymer Matrix on Optical Properties of CdSe Nanoplatelets*, J. Luminescence **237**, 1118175 (2021).