

# ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОПЛАСТИНОК CdSe В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ НА НЕЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ

Г. А. Клименко <sup>a\*</sup>, М. В. Козлова <sup>a</sup>, К. В. Ежова <sup>b</sup>, Б. М. Саиджонов <sup>c</sup>, Р. Б. Васильев <sup>c</sup>,  
А. М. Смирнов <sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119991, Москва, Россия

<sup>b</sup> Институт «Высшая инженерно-техническая школа», Университет ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>c</sup> Факультет наук о материалах, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119991, Москва, Россия

<sup>d</sup> Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119991, Москва, Россия

<sup>e</sup> 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

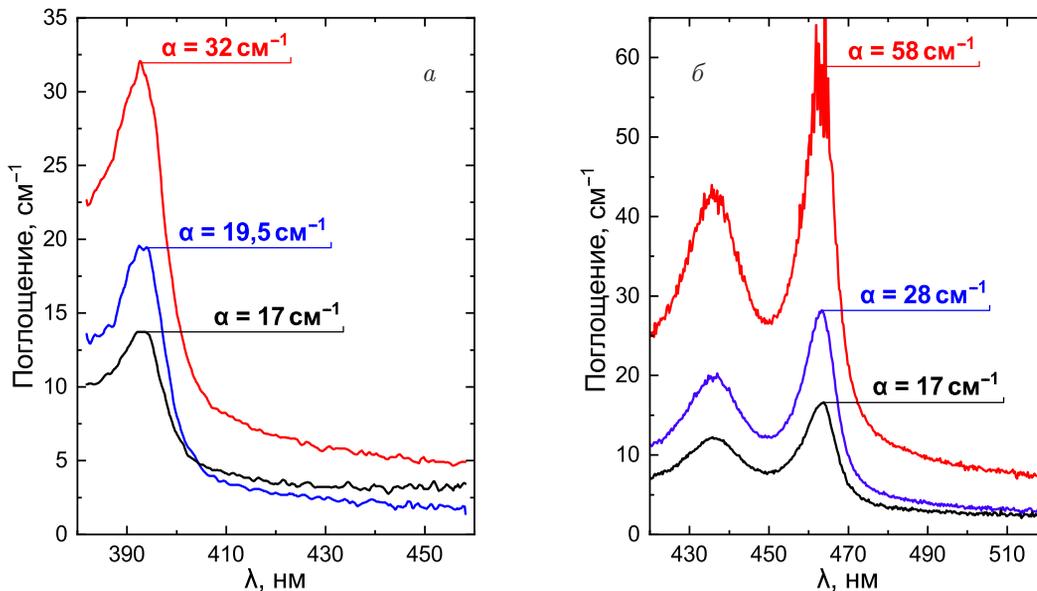


Рис. 1. (В цвете онлайн) Линейные спектры поглощения коллоидных нанопластинок: CdSe393 (а) и CdSe463 (б)

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 стоковского 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  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . 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  $\alpha$  (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-

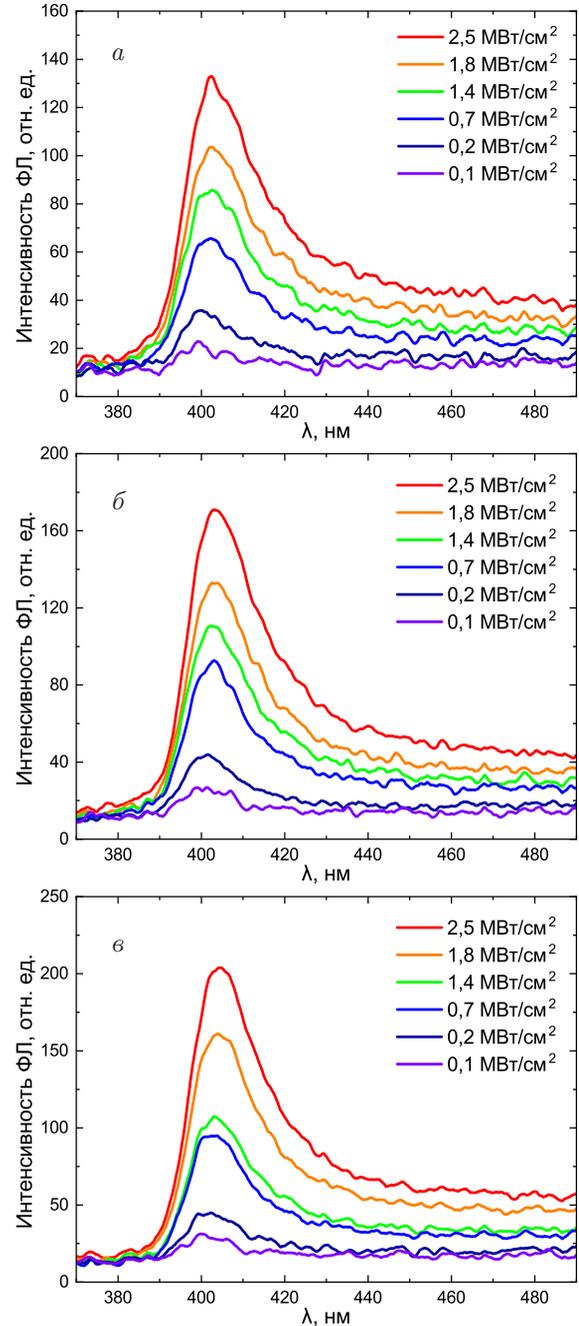


Рис. 2. (В цвете онлайн) Спектры ФЛ коллоидных нанопластинок CdSe393 при различных интенсивностях накачки для растворов малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации (время экспозиции  $t = 3 \text{ с}$ )

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/см<sup>2</sup> 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 ( $402 \pm 3$  нм и  $472 \pm 1$  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 фона). 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.

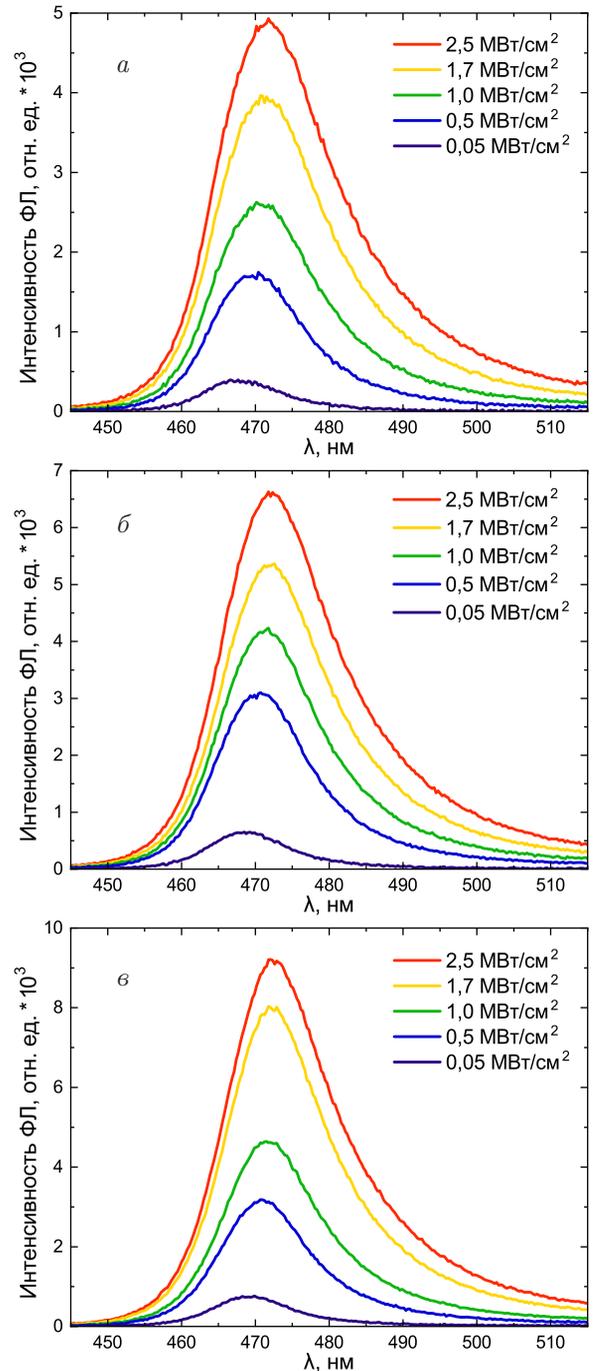


Рис. 3. (В цвете онлайн) Спектры ФЛ коллоидных нанопластинок CdSe463 при различных интенсивностях накачки для растворов малой (а), средней (б) и высокой (в) концентрации (время экспозиции  $t = 3$  с)

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 полумэмпирическая зависимость ампли-

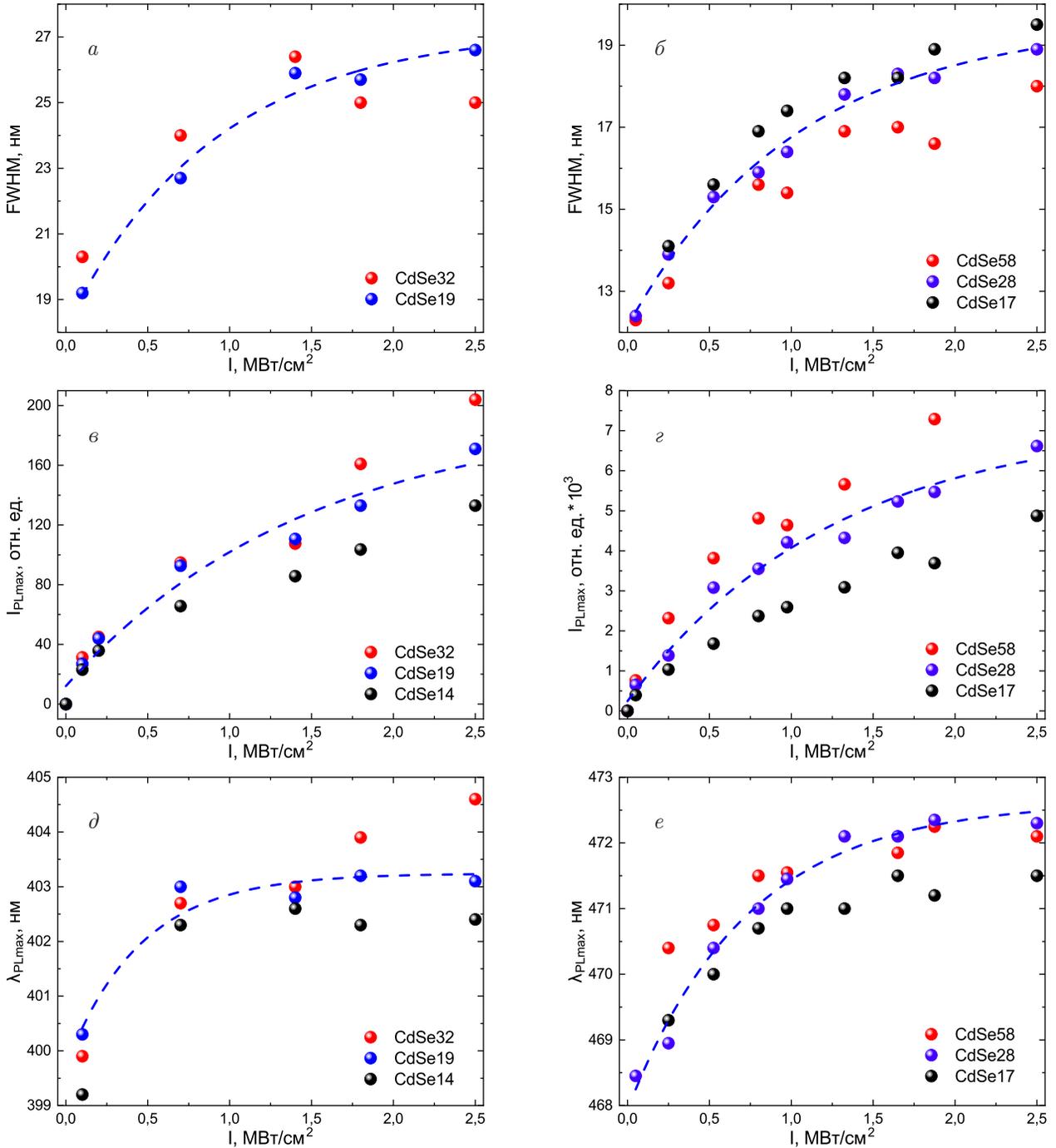


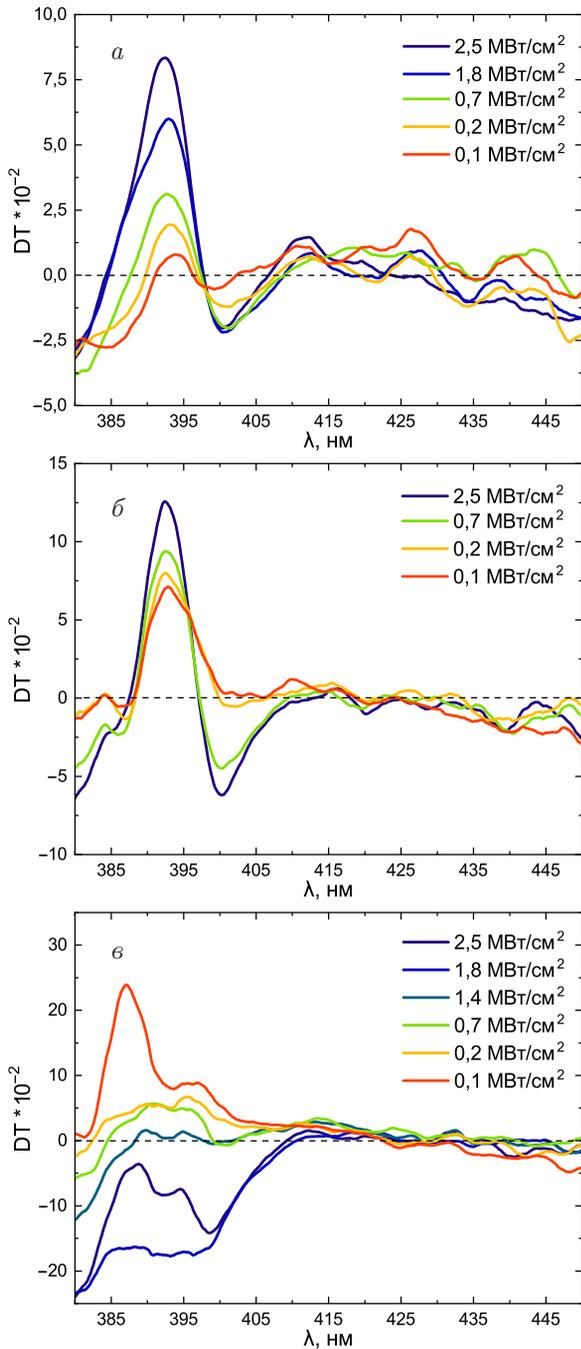
Рис. 4. (В цвете онлайн) Зависимость полуширин (*a, б*), интенсивностей (*в, з*) и длин волн (*д, е*) пиков ФЛ коллоидных растворов CdSe393 (*a, в, д*) и CdSe463 (*б, з, е*) от интенсивности накачки. Синие штриховые линии представлены для улучшения визуального восприятия экспериментальных данных

туды DT от интенсивности накачки [37]:

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

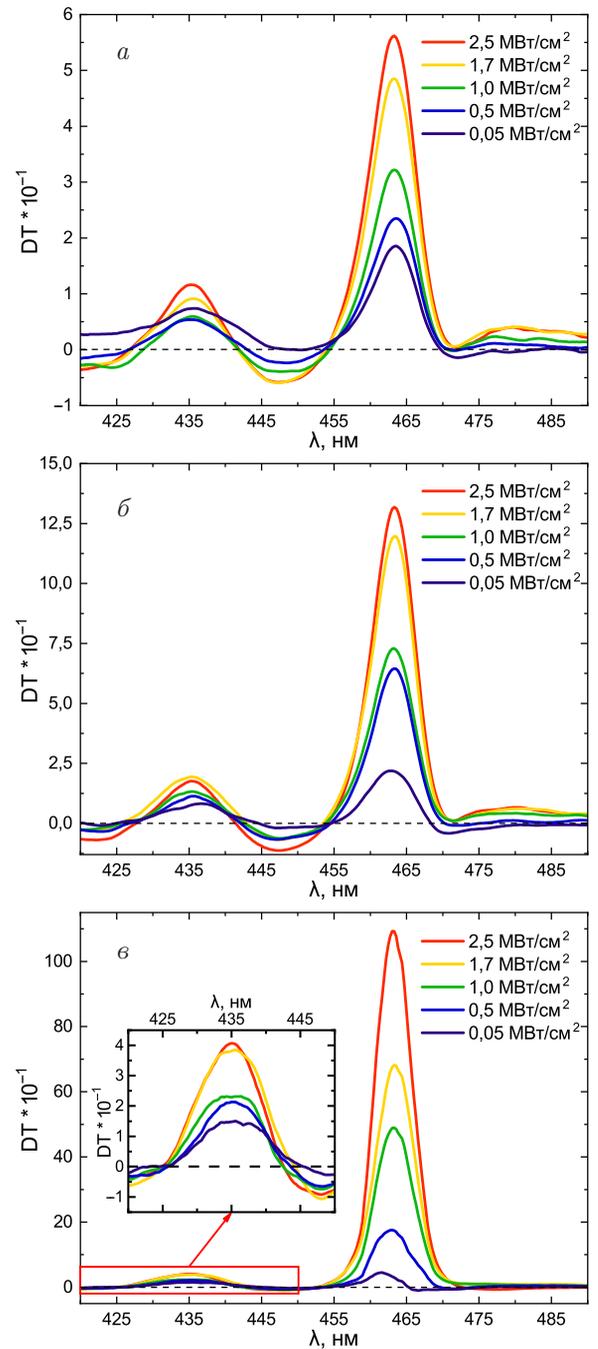
Для нанопластинок CdSe393 (рис.7), согласно формуле (2), были получены значения  $I_s \approx 0.5 \pm 0.1 \text{ МВт/см}^2$  для образца низкой кон-

центрации CdSe14 и  $I_s \approx 0.6 \pm 0.1 \text{ МВт/см}^2$  для образца средней концентрации CdSe19. Для нанопластинок CdSe463 (рис.8) были получены значения  $I_s(lh) \approx 0.9 \pm 0.5 \text{ МВт/см}^2$  и  $I_s(hh) \approx 1.4 \pm 0.4 \text{ МВт/см}^2$  для образца низкой концентрации CdSe17;  $I_s(lh) \approx 0.7 \pm 0.2 \text{ МВт/см}^2$  и  $I_s(hh) \approx 1.6 \pm 0.6 \text{ МВт/см}^2$  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  $1.5 \text{ MBт/см}^2$ ) выявлен рост пропускания, тогда как при значениях интенсивности накачки бо-

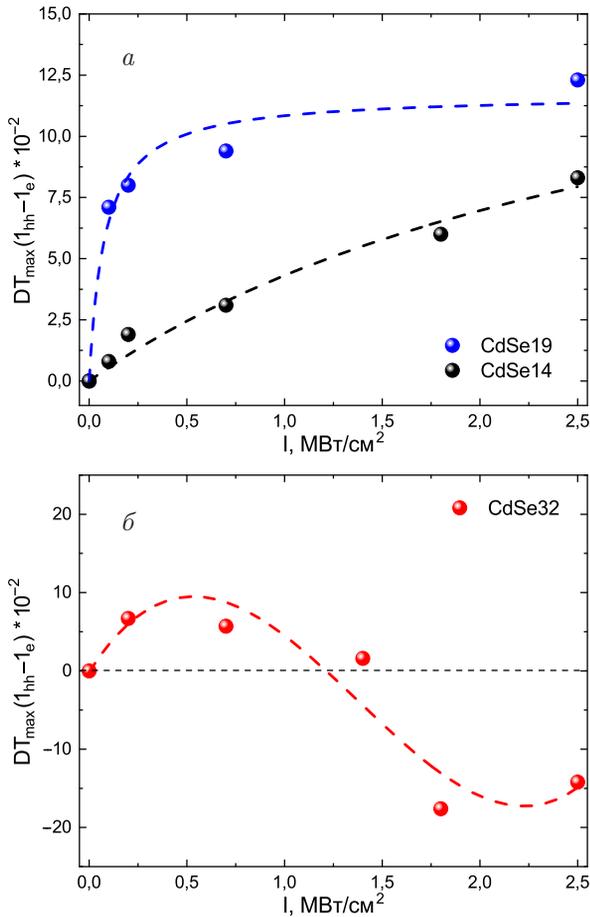


Рис. 7. (В цвете онлайн) Зависимость максимумов дифференциального пропускания, соответствующих переходу  $1_{hh}-1_e$ , от интенсивности накачки для коллоидных нанопластинок CdSe393 малой/средней (а) и высокой (б) концентрации

лее 1.5 МВт/см<sup>2</sup> 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-

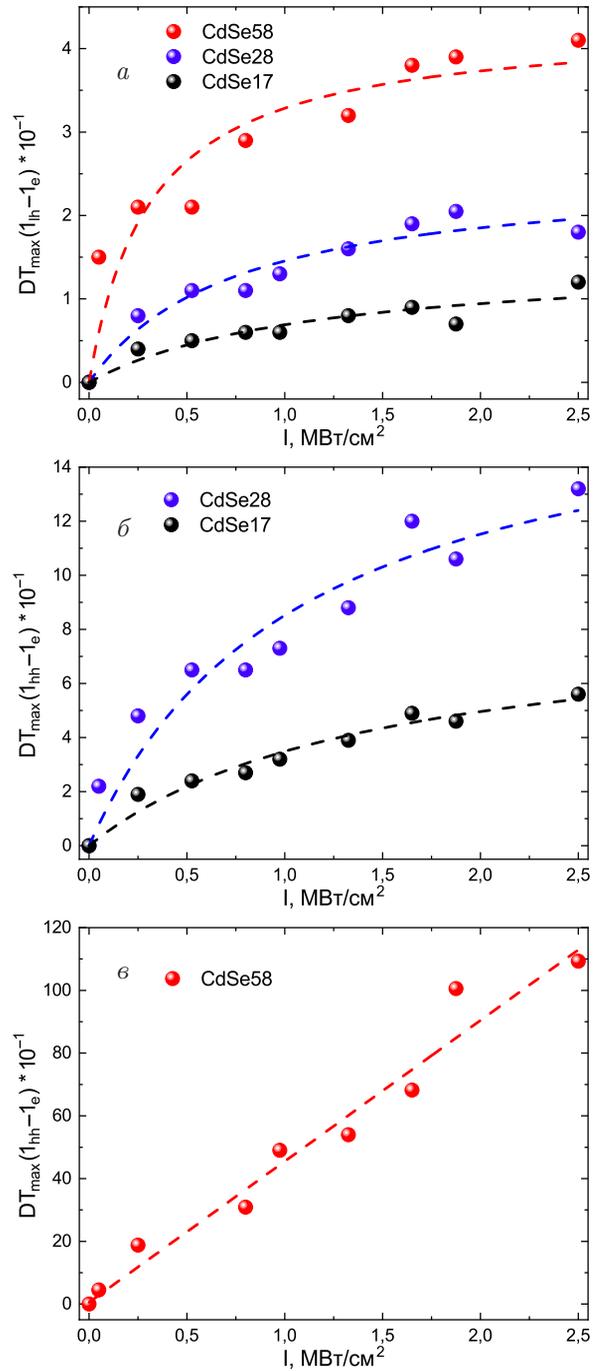


Рис. 8. (В цвете онлайн) Зависимость максимумов дифференциального пропускания, соответствующих пикам  $1_{hh}-1_e$  (а) и  $1_{hh}-1_e$  (б,в), от интенсивности накачки для коллоидных нанопластинок CdSe463 малой/средней (а,б) и высокой (в) концентрации

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/см<sup>2</sup>. 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/см<sup>2</sup>. При интенсивности накачки выше 1.5 МВт/см<sup>2</sup> 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. А. М. Смирнов, А. Д. Голинская, 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).