

УДК 544.774.4:544.522.122

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПЛЕНКАХ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ПЕРОВСКИТОВ CsPbBr₃ МЕТОДОМ PUMP-PROBE СПЕКТРОСКОПИИ

© 2024 г. А. А. Галушко², Г. А. Лочин^{1,2}*, Д. Н. Певцов^{1,2}*, А. В. Айбуш³, Ф. Е. Гостев³,
И. В. Шелаев³, В. А. Надточенко^{3,4}, С. Б. Бричкин^{1,2}, В. Ф. Разумов^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Черноголовка, Россия

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

³ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

*E-mail: pevtsov.dn@mipt.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

Синтезированы коллоидные квантовые точки перовскитов CsPbBr₃. Определен средний размер и полидисперсность нанокристаллов — 8.3 нм и 16% соответственно. На основе полученных нанокристаллов методами drop-casting и spin-coating изготовлены тонкие пленки. Методом лазерной фемтосекундной спектроскопии зондирования-накачки исследован процесс транспорта носителей заряда. Предложена интерпретация смещения пика просветления от времени. С помощью уравнения Эйнштейна–Смолуховского сделана оценка подвижности носителей заряда в пленках.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки, перовскиты, перенос носителей заряда, спектроскопия зондирования-накачки

DOI: 10.31857/S0023119324060045 EDN: TIBWXC

ВВЕДЕНИЕ

Перовскитные квантовые точки — нанокристаллы (НК), кристаллическая решетка которых совпадает с решеткой массивного перовскита, а оптические и электрические свойства определяются не только строением кристаллической структуры, но и эффектом размерного квантования.

К факторам, выделяющим перовскитные ККТ на фоне других низкоразмерных структур перовскитов, можно отнести высокий выход люминесценции, дополнительный способ регуляции размера запрещенной зоны, обеспеченный эффектом размерного квантования, доступный метод получения [1, 2]. Высокотемпературный коллоидный синтез не только относительно прост в осуществлении, но и позволяет получать НК перовскитов с полидисперсностью около 10–20% [3]. Отличительной чертой перовскитных НК среди других КТ также является возможность регулировать ширину

запрещенной зоны, меняя анион, входящий в состав перовскита, что продемонстрировано в работе [4].

Перспективы использования перовскитных НК в оптоэлектронике и фотовольтаике высоки, на данный момент материал используется в качестве активного слоя для светоизлучающих диодов. Большой потенциал использования перовскитов для изготовления солнечных элементов объясняется строением кристаллической решетки перовскитов. Было установлено, что процессы, происходящие в решетке перовскитов при фотоиндуцированном возбуждении, снижают потери эффективности в солнечных элементах, вызванные взаимодействием носителей заряда с решеткой, а также способствуют разделению зарядов [5]. Оба эти свойства повышают эффективность итогового солнечного элемента. Использование перовскитов в виде нанокристаллов, в свою очередь, позволит расширить диапазон поглощаемых длин волн, а также упростит и сделает более доступным изготовление

пленок. Для успешного применения перовскитных ККТ в перечисленных областях необходимо не только получение стабильных НК с необходимыми характеристиками, но и понимание процессов, протекающих в слоях перовскитных ККТ, на которых базируется работа итогового устройства. Особенно в вопросе процессов переноса носителей заряда. Изучение данных процессов в пленках ККТ было проведено в работах [6–8], в которых авторы исследовали процесс переноса носителей заряда в растворах и пленках с искусственно созданной полидисперсностью, а также в гибридных материалах. Во всех этих работах эффективным оказался метод время-разрешенной спектроскопии накачки зондирования.

В данной работе исследовался процесс диффузии носителей заряда в пленках ККТ CsPbBr₃ в условиях собственной полидисперсности ансамбля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез наночастиц

Синтез ККТ проводился в два этапа: в течение первого этапа был синтезирован прекурсор цезия — олеат цезия, на второй стадии был проведен синтез ККТ с использованием полученного прекурсора цезия.

В работе были использованы следующие реактивы и растворители: Cs₂CO₃ (97%, Aldrich), PbBr₂ (98%, Acros Organics), олеиновая кислота (90% техническая, “Вектон”), олеиламин (80–90% технический, Alinda Chemical), октадецен-1 (96%, “Химкрафт”), изопропанол (осч, “Компонент-Реактив”), н-гексан (для спектроскопии, “Компонент-Реактив”), этилацетат (хч, “Химмед”).

В ходе первого этапа, следуя методике, приведенной в статье [9], был синтезирован прекурсор цезия — олеат цезия. В сосуде Шленка смешивались навеска карбоната цезия массой 0.326 г, 8 мл олеиновой кислоты и 3.5 мл 1-октадецена. Система вакуумировалась до ~0.5 мБар с последующим заполнением аргона, описанная последовательность действий повторялась трижды, после чего смесь перемешивалась в течение 30 мин в инертной атмосфере. Далее смесь дегазировалась под вакуумом при постоянном перемешивании в течение 4 ч. Полученный прекурсор был запечатан и хранился в сосуде Шленка для последующих синтезов ККТ.

Используемая методика синтеза ККТ была предложена в статье [10]. Для синтеза ККТ навеска бромида свинца 0.14 г была внесена в трехгорлую

колбу, далее в колбу вводились длинноцепочечные растворители: 2 мл олеиновой кислоты, 10 мл октадецена и 2 мл олеиламина. Затем реакционная смесь дегазировалась, вакуумировалась в течение одного часа при температуре 120°C при постоянном перемешивании.

Для начала синтеза температура повышалась до 150°C; быстро вводилось 0.3 мл раствора олеата цезия. Через 5 с реакция останавливалась резким охлаждением в ледяной бане.

После охлаждения раствора ККТ до комнатной температуры, проводилась очистка, основанная на методике, приведенной в статьях [11]. Для очистки полученный раствор ККТ был разделен на 6 пробирок. К каждой пробирке приливался объем изопропанола, равный объему раствора ККТ в пробирке, после чего пробирки центрифугировались в течение 10 мин при 3000 об/мин. Далее надосадочная жидкость удалялась и к осадку приливался этилацетат. Осадок на стенках пробирки аккуратно промывался, после чего с помощью дозатора удаляли этилацетат. Далее осадок высушивался и редиспергировался в н-гексане. Полученный раствор центрифугировался в течение 5 мин при 3000 об/мин. Надосадочная жидкость использовалась в качестве рабочего раствора.

Спектрально-кинетические измерения

Стационарные оптические измерения проходили при комнатной температуре в кварцевой кювете квадратного сечения с длиной оптического пути, составляющей 1 см.

Спектры поглощения исследуемых растворов были получены с использованием спектрофотометра Jasco V-750. Матрица “возбуждение—люминесценция” была получена с помощью спектрофлуориметра Jasco FP-8300.

Для оценки среднего диаметра частиц была использована экспериментальная зависимость положения экситонного пика от размера частиц, приведенная в работе [12]:

$$E_g(d) = E_g(\infty) + \frac{1}{a + bd + cd^2},$$

где $a = -1.26 \text{ эВ}^{-1}$, $b = 0.996 \text{ нм}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$, $c = -0.0324 \text{ нм}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, $E_g(\infty) = 2.25 \text{ эВ}$, d — средний размер частиц в ансамбле и E_g — положение экситонного пика в электронвольтах.

Для определения полидисперсности ККТ использовалась методика, предложенная в статье [19], и производная размерной кривой:

$$\frac{\partial E_g}{\langle E_g \rangle} = - \frac{(\langle E_g \rangle - E_g(\infty))^2}{\langle E_g \rangle} (b \langle d \rangle + 2c \langle d \rangle^2) \frac{\partial d}{\langle d \rangle}.$$

Спектры наведенного поглощения измерялись методом фемтосекундной накачки с зондированием суперконтинуумом. Лазерные импульсы от задающего генератора (800 нм, 80 МГц, 80 фс, Tsunami, Spectra-Physics, USA) усиливались регенеративным усилителем (Spitfire, Spectra-Physics, USA) для получения частоты импульсов 100 Гц. Усиленные импульсы расщеплялись на два пучка. Первый пучок, использовавшийся для получения импульса накачки, преобразовывался параметрическим усилителем (TOPAS-WHITE, Light-Conversion, Lithuania), сжимался и использовался для генерации второй гармоники в диапазоне длин волн 350–450 нм; типичная длительность импульса накачки составляла ~50 фс, энергии импульсов лежали в диапазоне 5–150 нДж. Второй пучок, использовавшийся для генерации пробного импульса, фокусировался на заполненную водой ячейку из плавленого кварца для генерации широкого суперконтинуума в диапазоне от 400 до 800 нм.

Импульсы накачки и зондирования разносились во времени с помощью управляемого компьютером каскада задержки. Диапазон задержек составлял от 0 фс до 0.5 нс. Далее они объединялись и сфокусировались на ячейке с характерной длиной ~0.5 мм между окнами из плавленого кварца толщиной ~0.2 мм.

Импульсы накачки и зондирования имели диаметры ~0.13 мм и ~0.2 мм соответственно. Относительные поляризации импульсов накачки и зондирования выставлялись под углом 54.7° (магический угол). После прохождения образца суперконтинуум разлагался спектрометром (Acton SP-300, Roper Scientific, USA) и регистрировался EMCCD-камерой (Newton-970, Andor, Oxford Instruments, UK) в многоканальном режиме.

Измерения для разных времен задержки проводились с различным шагом: во временном диапазоне от 0 до 3.5 пс измерения проводились с шагом 6.7 фс; от 3.5 до 4.5 пс — с шагом 10 фс; от 4.5 до 6.5 пс — с шагом 50 фс; от 6.5 до 30 пс — с шагом 100 фс; от 30 до 40 пс — с шагом 500 фс; в пределах от 40 до 500 пс — с шагом 1000 фс.

Разностные спектры поглощения $\Delta OD(t, \lambda)$, где ΔOD есть изменение оптической плотности, t есть

время задержки, а λ есть длина волны, записывались в диапазоне 400–700 нм. Измеренные спектры были скорректированы на дисперсию групповой скорости суперконтинуума. Накачка осуществлялась на длине волны 360 нм. Оптическая плотность исследуемых образцов на длине волны 360 нм — 0.157 и 0.139 для образцов, нанесенных методом drop-casting и spin-coating соответственно.

Изготовление пленок

Для формирования тонких пленок ККТ CsPbBr₃ использовали методы drop-casting и spin-coating.

Для нанесения пленок ККТ методом drop-casting использовалось 50 мкл исходного раствора ККТ, который наносился на предварительно очищенное кварцевое стекло.

Для изготовления пленок методом spin-coating использовали исходный раствор ККТ, предварительно выпаренный под аргоном для увеличения концентрации ККТ. Дополнительно использовали раствор нитрата свинца в метилацетате, концентрация раствора составила 4 ммоль/л. Раствор нитрата свинца в метилацетате необходим для нескольких целей: метилацетат как полярный растворитель убирает часть исходных лигандов — кислотных остатков олеиновой кислоты — с поверхности ККТ, в то же время ионы свинца закрывают дефекты, образовавшиеся в процессе удаления лигандов, кроме того, нитрат свинца, оставшийся в пленках после выпаривания растворителя, способен проводить ток, таким образом повышает проводимость внутри и между слоями в пленках перовскитных ККТ. Данные растворы наносили на предварительно очищенное ацетоном кварцевое стекло, закрепленное на вращающейся подложке. Сначала на закрепленное стекло, вращающееся со скоростью 1000 об/мин нанесли 35 мкл раствора ККТ, после чего наносились 50 мкл раствора нитрата свинца при скорости 2000 об./мин. Описанную процедуру повторяли 5 раз для получения пятислойных пленок ККТ.

Толщина пленок определялась с помощью оптического конфокального микроскопа Sensofar S Neox.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате синтеза были получены ККТ перовскитов CsPbBr₃, характеризующиеся спектрами поглощения и люминесценции, представленными на рис. 1. Средний размер был определен по размерной кривой и составил 8.3 нм.

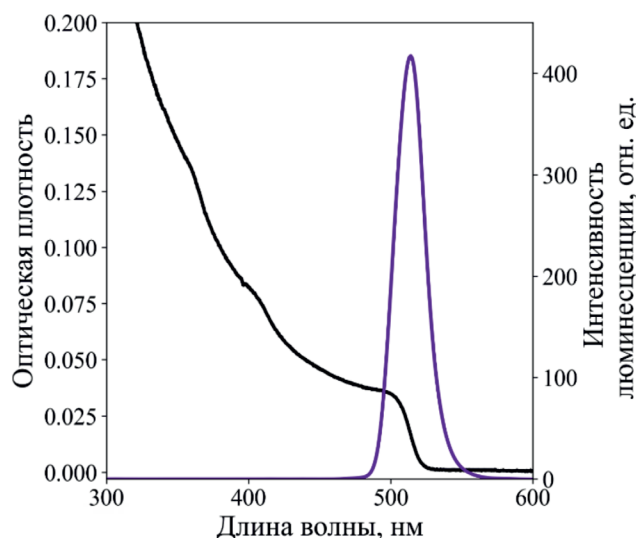


Рис. 1. Спектры поглощения и люминесценции раствора ККТ CsPbBr₃.

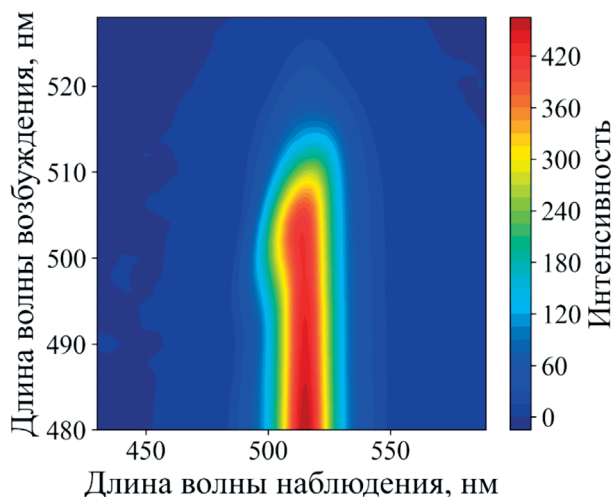


Рис. 2. Матрица “возбуждение-люминесценция” раствора ККТ CsPbBr₃.

Из представленной на рис. 2 матрицы возбуждения-люминесценции ККТ CsPbBr₃ по методике [13] было определено неоднородное уширение, составившее 5.48 нм, а с использованием формулы была рассчитана полидисперсность, которая составила 16%.

На основе раствора методами drop-casting и spin-coating были получены пленки, толщина составила около 50 нм. Методом фемтосекундной лазерной pump-probe спектроскопии были получены спектры разности оптической плотности от времени задержки для различных энергий накачки. Данные матрицы при энергии накачки 45 нДж представлены на рис. 3.

Из результатов измерений видно, что для обоих объектов релаксация из высших возбужденных состояний в низшее возбужденное состояние, соответствующее первому экситонному пику в стационарном спектре поглощения, происходит за характерное время порядка 1 пс. Кроме того, для обоих образцов заметно смещение пика просветления, происходящее в диапазоне времен от десятка пикосекунд до 0.5 нс. На рис. 4 представлено смещение пика просветления от времени и аппроксимация биэкспоненциальным спадом. Аппроксимация проводилась в диапазоне данных от 300 фс до 400 пс.

Из представленных рисунков видно, что за время порядка 103 фс происходит смещение пика про-

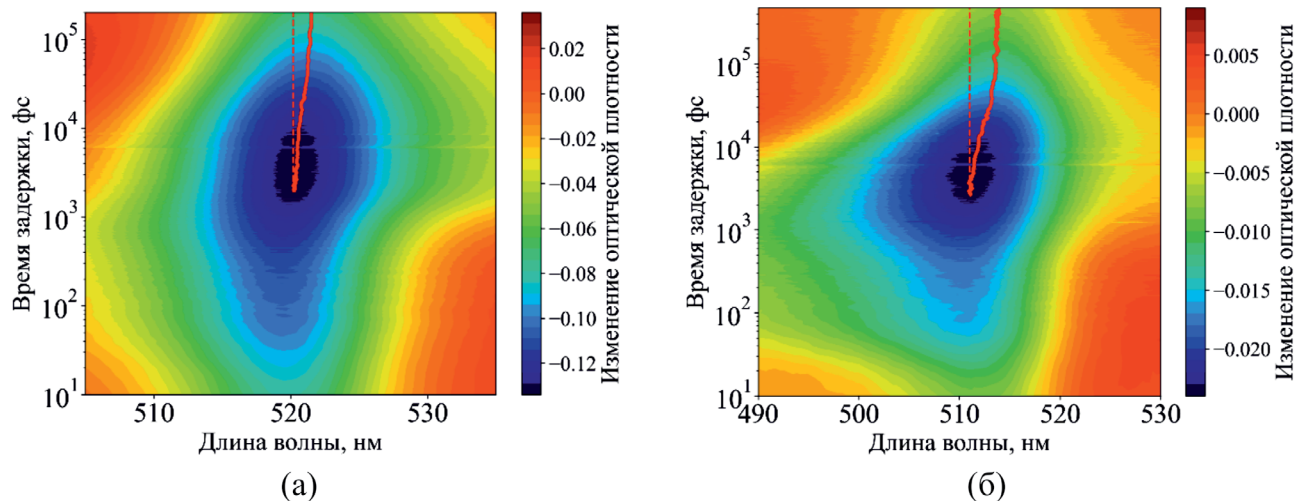


Рис. 3. Времяразрешенные матрицы разностного поглощения ККТ CsPbBr₃ при энергии накачки 45 нДж образца, изготовленного методом (а) drop-casting; (б) spin-coating. Сплошной красной линией показано смещение пика просветления относительно красной пунктирной линии, указывающей на исходное положение пика.

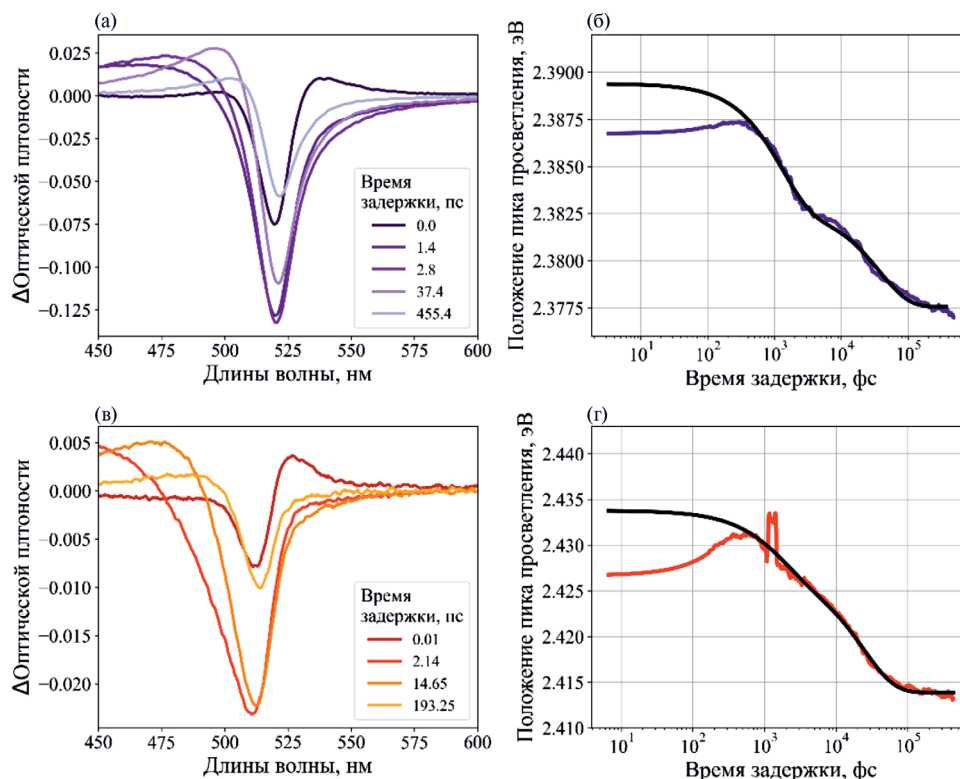


Рис. 4. Спектральная зависимость разности оптической плотности при разных временах задержки и зависимости энергий положения пика просветления от времени задержки. Пункты (а) и (б) — для образца, изготовленного методом drop-casting; (в) и (г) — для образца, изготовленного методом spin-coating. Все зависимости приведены для энергии накачки в 45 нДж. На рисунках (б) и (г) фиолетовая и красная кривая — сдвиг пика просветления для образца, изготовленного методом drop-casting и spin-coating соответственно, черная — аппроксимация биэкспоненциальным спадом.

светления в коротковолновую область, связанное с характерным временем электрон-колебательной релаксации.

Приближая экспериментальные результаты биэкспоненциальным спадом, были получены характерные времена (рис. 5). При небольших энергиях накачки характерные времена данных процессов отличаются на порядки, поэтому для удобства назовем их условно “медленным” и “быстрым” процессами. Характерные времена “медленного” процесса для обоих образцов при всех энергиях

накачки составляют десятки пикосекунд. Для “быстрого” процесса характерные времена для пленок, изготовленных с помощью метода spin-coating, варьируются в пределах от сотен до тысяч фемтосекунд, а для образца, изготовленного методом drop-casting, составляют единицы пикосекунд (табл. 1).

Отметим общие закономерности, характерные “медленному” процессу: 1) для образца пленок, изготовленного методом spin-coating, данный процесс протекает быстрее при всех энергиях накачки; 2) при увеличении энергии накачки время

Таблица 1. Характерные времена для двух процессов, протекающих в образцах, изготовленных различными методами. Первый процесс — “медленный”; второй — “быстрый”

Энергия накачки, нДж	Образец 1 (spin-coating)		Образец 2 (drop-casting)	
	Характерное время процесса 1, пс	Характерное время процесса 2, пс	Характерное время процесса 1, пс	Характерное время процесса 2, пс
5	57.7	0.65	—	—
15	—	—	62.6	0.9
45	24.1	1.67	37.5	1.25
150	13.4	13.2	36.5	1.5

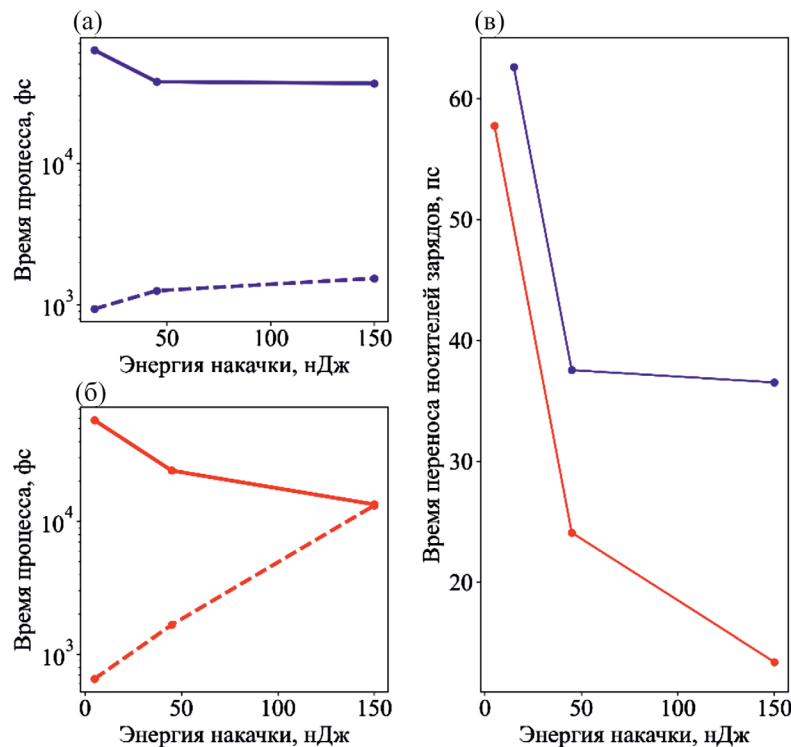


Рис. 5. Зависимость характерного времени процесса от энергии накачки: (а) “медленный” и “быстрый” процессы для образца, изготовленного методом drop-casting; (б) “медленный” и “быстрый” процессы для образца, изготовленного методом spin-coating; (в) “медленный” процесс для двух образцов. Пунктирными линиями изображен “быстрый” процесс, сплошными линиями обозначен “медленный” для каждого из образцов.

данного процесса уменьшается для обоих образцов.

В первом утверждении сравниваются образцы пленок, отличающиеся способом нанесения, то есть массивы ККТ в них отличаются плотностью упаковки, а индивидуальные точки — лигандным окружением вследствие добавления раствора нитрата свинца при изготовлении образца методом spin-coating. При этом, как отмечено выше, данный процесс протекает быстрее в пленках с более плотной упаковкой, что указывает на возможную связь данного процесса с взаимодействием квантовых точек между собой. Взаимодействие квантовых точек между собой может быть реализовано путем переноса возбуждения и путем переноса носителей заряда. Однако в работе [14] авторы на примере пленок ККТ PbS с разными лигандами продемонстрировали, что при транспорте экситонов сдвига пика просветления не происходит. Перенос энергии, в свою очередь, был изучен в работе [3] для ККТ CsPbBr₃, времена данного процесса измеряются наносекундами. В пользу оставшейся гипотезы о том, что сдвиг пика просветления связан с процессами переноса носителей заряда, свидетельствуют работы [8, 15]. В ра-

боте [15] авторы связывают данное смещение с процессом переноса носителей заряда, подкрепляя свое предположение компьютерным моделированием, используя для моделирования процесса уравнения Миллера—Абрамса, описывающие скорость переноса носителей по прыжковому механизму. В работе [8] авторы искусственно создают условия для реализации прыжкового механизма переноса носителей заряда, вводя в исследуемые пленки точки двух размеров, также наблюдают смещение пика просветления, связывая его с переносом носителей зарядов и сравнивают исследуемые пленки с раствором ККТ, где процесс смещения пика просветления идет заметно медленнее.

В исследуемых образцах в связи с относительно высокой полидисперсностью процесс переноса носителей заряда с большой вероятностью протекает по прыжковому механизму. С данным предположением согласуется и тот факт, что именно для образцов более плотноупакованных, изготовленных с помощью метода spin-coating с добавлением раствора нитрата свинца, времена данного процесса ниже, ведь вероятность прыжка определяется в том числе расстоянием между ККТ, следовательно, так

как в данном образце расстояние между точками меньше — вероятность “прыжка” носителя заряда больше, следовательно, меньше характерное время такого процесса.

Рассмотрим причину наблюдаемого роста скорости процесса, протекающего в пленках с ростом энергии накачки. С увеличением энергии накачки увеличивается и вероятность процессов переноса носителей заряда, так как увеличивается количество возбужденных квантовых точек, которому пропорциональна скорость процесса переноса носителей заряда.

Таким образом, оба приведенных утверждения согласуются с гипотезой о том, что наблюдаемый в исследовании “медленный” процесс связан с прыжковым механизмом переноса носителей заряда. Тогда найденные по сдвигу пика просветления характерные времена “медленного” процесса могут быть использованы для нахождения коэффициента диффузии:

$$D = \frac{\lambda^2}{6\tau},$$

где λ — длина свободного пробега, в нулевом приближении равная среднему размеру частицы в ансамбле, и τ — время свободного пробега. Подвижность носителей заряда можно оценить по уравнению Эйнштейна—Смолуховского (табл. 2, рис. 6):

$$D = \frac{\mu k_B T}{q},$$

где μ — подвижность носителей заряда в $\text{см}^2/(\text{В} \times \text{с})$, k_B — константа Больцмана, T — температура, q — заряд электрона.

Рассмотрим подробнее “быстрый” процесс, наблюдаемый для обоих образцов. Заметим две важные особенности: во-первых, скорость данного процесса падает или не изменяется с увеличением энергии накачки. Во-вторых, для образца, изготовленного методом spin-coating, время данного процесса значительно увеличивается с ростом энергии накачки и при достижении энергии накачки в 150 нДж ста-

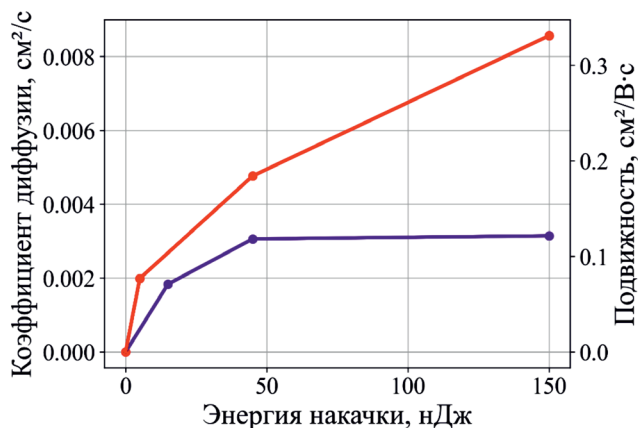


Рис. 6. Зависимость коэффициента диффузии и подвижности от энергии накачки для образцов, изготовленных методом spin-coating и методом drop-casting.

новится близким к времени “медленного” процесса. В то же время для образца, нанесение которого осуществлялось методом drop-casting, время “быстрого” процесса незначительно меняется при увеличении энергии накачки, оставаясь порядка 1 пс.

Наиболее простым кажется предположение о том, что “быстрый” процесс также связан с процессом переноса носителей заряда. Например, можно допустить, что “медленный” процесс связан с переносом дырок, а “быстрый” — электронов или наоборот. Однако это не соответствует отмеченной ранее зависимости времени процесса переноса от энергии накачки. Данное предположение не объясняет и второго факта — различия в зависимостях времен процессов от энергий накачки для двух образцов для “быстрого” процесса и отсутствие такого различия для “медленного” процесса.

С другой стороны, логичным может показаться и предположение о том, что часть носителей заряда перемещается по другому механизму — для массива квантовых точек также возможен band-like механизм процесса переноса носителей заряда. К подобным выводам приходят авторы статьи [16], исследующие транспорт зарядов в плотноупакованных слоях ККТ PbS, а также в гетероструктурах,

Таблица 2. Коэффициент диффузии и подвижность для образцов, изготовленных различными методами

Энергия накачки, нДж	Образец 1 (spin-coating)		Образец 2 (drop-casting)	
	Коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$	Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \times \text{с})$	Коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$	Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \times \text{с})$
5	0.002	0.0769	—	—
15	—	—	0.0018	0.0709
45	0.0048	0.1842	0.00305	0.1182
150	0.0086	0.3310	0.0031	0.1215

состоящих из данных ККТ, и перовскитной матрицы с помощью время-разрешенной микроскопии. В данной статье авторы приходят к выводу о реализации в исследуемой ими системе последовательно трех механизмов переноса носителей заряда. Причем времена наиболее быстрого из процессов совпадают по порядку величины с временами, характерными для “быстрого” процесса. Кроме того, любопытным является и тот факт, что по приведенным в статье графикам видно, что коэффициент диффузии для наиболее быстрого процесса падает с увеличением числа фотонов, приходящихся на одну квантовую точку (то есть с увеличением энергии накачки), следовательно, характерное время данного процесса пропорционально энергии накачки, что справедливо и для наблюдаемого нами “быстрого” процесса. В таком случае подвижность носителей заряда можно оценить как $\sim 5 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$.

Однако, исходя из сути наблюдаемого явления, за основную была принята следующая гипотеза. Перенос носителей заряда возможен между квантовыми точками разных размеров, данные процессы описываются различными вероятностями и константами скоростей, соответственно, различными характерными временами, таким образом, будет наблюдаться непрерывное распределение таких времен. Поэтому наблюдаемые “быстрые” и “медленные” процессы — части этого распределения, следовательно, “быстрый” процесс также связан с переносом носителей заряда, но между точками других размеров. В свою очередь средняя подвижность носителей заряда в ансамбле должна лежать в диапазоне $0.1\text{--}5 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$. Для подтверждения данной гипотезы требуется провести дополнительные исследования, включающие в себя компьютерное моделирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе исследован процесс переноса носителей заряда в плотноупакованных слоях квантовых точек CsPbBr_3 , характерные времена данного процесса были определены с помощью время-разрешенной спектроскопии накачки зондирования и составили порядка десятка пикосекунд.

Рассматривая процесс переноса носителей заряда как процесс, контролируемый диффузией, для определения подвижности в работе было использовано уравнение Эйнштейна—Смолуховского, коэффициент диффузии в котором был найден из экспериментально полученного времени переноса носителей заряда. Таким образом, были охарактеризованы электрофизические свойства пленок ККТ CsPbBr_3 , определены подвижности носителей заряда. Величины подвижностей находятся в диапазоне $0.1\text{--}5 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$.

Отдельно стоит остановиться на наблюдаемом в данной работе “быстром” процессе. Для объяснения данного факта было предложено несколько гипотез, среди которых наиболее правдоподобной оказалась гипотеза о том, что данный процесс также связан с переносом носителей зарядов, но между ККТ других размеров, отличных от ККТ, для которых наблюдался “медленный процесс”. Для подтверждения данной гипотезы требуются дополнительные исследования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 21-73-20245). В работе использовано оборудование (фемтосекундная установка) Центра коллективного пользования ФИЦ ХФ РАН “Анализ химических, биологических систем и природных материалов: масс-спектральная микроскопия и фемтосекундная лазерная микроскопия-спектроскопия” (рег. номер 506694).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akkerman Q.A., Rainò G., Kovalenko M.V. et al. // *Nature materials*. 2018. V. 17. № 5. P 394.
2. Dey A., Ye J., De A., Debroye E. et al. // *ACS nano*. 2021. V. 15. № 7. P. 10775.
3. de Weerd C., Gomez L., Zhang, H. et al. // *J. Phys. Chem. C*. 2016. V. 120. № 24. P. 13310.
4. Song J., Li J., Li X. et al. // *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*. 2015. V. 27. № 44. P. 7162.
5. Wu X., Tan L.Z., Shen X. et al., // *Science advances*. 2017. V. 3. № 7. P. e1602388.
6. Liu X., Zeng P., Chen S. et al. // *Laser & Photonics Reviews*. 2022. № 12 (16). P. 2200280.
7. Mandal S., George L., Tkachenko N.V // *Nanoscale*. 2019. № 3 (11). P. 862.
8. Proppe A.H, Jixian X., Randy P.S. et al. // *Nano letters*. 2018. V. 18. № 11. P. 7052.
9. Lu Ch., Wright M.W., Ma X. et al. // *Chemistry of Materials*. 2019. V. 31. № 1. P. 62.
10. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I. et al // *Nano Lett*. 2015. V. 15. P. 3692.
11. Kumawat N.K., Swarnkar A., Nag A. et al. // *J. Phys. Chem. C*. 2018. V. 122. № 25. P. 13767.
12. Maes J., Balcaen L., Drijvers E. et al. // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2018. V. 9. № 11. P. 3093.
13. Tovstun, S. A., Gadomska, A. V., Spirin, M. G. et al. // *Journal of Luminescence*. 2022. V. 252. P. 119420.
14. Zhang Z., Sung J., Toolan D.T. et al. // *Nature Materials*. 2022. V. 21. № 5. P. 533.
15. Gilmore R. H., Lee E.M., Weidman, M.C. et al. // *Nano letters*. 2017. V. 17. № 2. P. 893.
16. Liu M., Verma S.D., Zhang Z. et al. // *Nano Letters*. 2021. V. 21. № 21. P. 8945.

RESEARCH OF CHARGE CARRIER TRANSFER PROCESSES IN FILMS OF COLLOIDAL QUANTUM DOTS OF CsPbBr₃ PEROVSKITES BY PUMP-PROBE SPECTROSCOPY

A. A. Galyshko^b, G. A. Lochin^{a, b}, D. N. Pevtsov^{a, b}*, A. V. Aybush^c, F.E. Gostev^c, I. V. Shelaev^c,
V. A. Nadtochenko^{c, d}, S. B. Brichkin^{a, b}, V. F. Razumov^{a, b}

^a Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

^b Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, Russia

^c Federal Research Centre for Chemical Physics named after N.N. Semenov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^d Department of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: pevtsov.dn@mipt.ru

Colloidal quantum dots of CsPbBr₃ perovskites have been synthesised. The average size and polydispersity of the nanocrystals were determined to be 8.3 nm and 16%, respectively. The nanocrystals were employed in the fabrication of thin films via two distinct methods: drop casting and spin coating. The process of charge carrier transport was investigated through the use of laser femtosecond pump-probe spectroscopy. A proposed interpretation of the time-dependent shift of the lumen peak is presented. The Einstein–Smoluchowski equation was employed to estimate the mobility of charge carriers in the films.

Keywords: colloidal quantum dots, perovskites, charge carrier transport, pump-probe spectroscopy

REFERENCES

1. Akkerman Q.A., Rainò G., Kovalenko M.V. *et al.* // Nature materials. 2018. V. 17. № 5. P. 394.
2. Dey A., Ye J., De A., Debroye E. *et al.* // ACS nano. 2021. V. 15. № 7. P. 10775.
3. de Weerd C., Gomez L., Zhang, H. *et al.* // J. Phys. Chem. C. 2016. V. 120. № 24. P. 13310.
4. Song J., Li J., Li X. *et al.* Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.). 2015. V. 27. № 44. P. 7162.
5. Wu X., Tan L. Z., Shen X. *et al.* // Science advances. 2017. V. 3. № 7. P. e1602388.
6. Liu X., Zeng P., Chen S. *et al.* // Laser & Photonics Reviews. 2022. № 12 (16). P. 2200280.
7. Mandal S., George L., Tkachenko N. V // Nanoscale. 2019. № 3 (11). P. 862.
8. Proppe A.H., Jixian X., Randy P.S. *et al.* // Nano letters. 2018. V. 18. № 11. P. 7052.
9. Lu Ch., Wright M.W., Ma X. *et al.* // Chemistry of Materials. 2019. V. 31. № 1. P. 62.
10. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., *et al.* // Nano Lett. 2015. V. 15. P. 3692.
11. Kumawat N.K., Swarnkar A., Nag A. *et al.* // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. № 25. P. 13767.
12. Maes J., Balcaen L., Drijvers E. *et al.* // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2018. V. 9. № 11. P. 3093.
13. Tovstun S.A., Gadomska A.V., Spirin M.G. *et al.* // Journal of Luminescence. 2022. V. 252. P. 119420.
14. Zhang Z., Sung J., Toolan D.T. *et al.* // Nature Materials. 2022. V. 21. № 5. P. 533.
15. Gilmore R.H., Lee E.M., Weidman, M.C. *et al.* // Nano letters. 2017. V. 17. № 2. P. 893.
16. Liu M., Verma S.D., Zhang Z. *et al.* // Nano Letters. 2021. V. 21. № 21. P. 8945.