18

Конфокальная лазерная микроскопия фотоиндуцированной диффузии нанопластин и кубических нанокристаллов перовскита $CsPbBr_3$

© Л.Н. Бородина, Д.А. Татаринов, К.И. Аннас, В.Н. Борисов, А.В. Вениаминов

МНОЦ физики наноструктур, Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: lnborodina@itmo.ru

Поступила в редакцию 24.11.2025 г.
В окончательной редакции 24.11.2025 г.
Принята к публикации 01.12.2025 г.

Гидродинамические размеры нанокристаллов кубической формы и прямоугольных нанопластин перовскита состава $CsPbBr_3$, диффундирующих в коллоидном растворе, определены с помощью метода восстановления флуоресценции с экспонированием полосы раствора (stripe-FRAP, sFRAP) и сопоставлены с их геометрическими размерами по данным просвечивающей электронной микроскопии. Длины ребер и объемы кубических нанокристаллов и нанопластин различаются в 1.5−2 раза, но их измеренные гидродинамические размеры почти одинаковы: 15 ± 5 nm и 13 ± 5 nm. Вариации размеров нанокристаллов в ансамбле проявляются в люминесцентных измерениях через нелинейность зависимости квадрата ширины фотоиндуцированной пространственной неоднородности от времени.

Ключевые слова: перовскитные квантовые точки, нанопластины, диффузия несферических наночастиц, гидродинамический размер, конфокальная микроскопия, метод восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания (Fluorescence recovery after Photobleaching, FRAP).

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Среди многообразия современных материалов фотоники перовскитные нанокристаллы (НК) и нанопластины (НП) занимают особое место благодаря своим исключительным оптическим свойствам, таким как высокое значение квантового выхода фотолюминесценции (ФЛ), значительное одно- и многофотонное поглощение, высокая оптическая стабильность и толерантность к дефектам, яркая узкополосная ФЛ во всем видимом спектральном диапазоне. В сочетании с недорогими и относительно простыми методами синтеза перовскитов эти свойства делают их идеальными кандидатами для создания современных устройств оптоэлектроники, фотоники и нелинейной оптики [1–4]. Кроме этого, коллоидные перовскитные НК (квантовые точки) и НП могут быть легко внедрены в сложные многокомпонентные системы путем замены лигандов на их поверхности, что позволяет разрабатывать и создавать новые гибридные материалы с уникальными оптическими свойствами, а также использовать перовскитные наноструктуры для биомедицинских приложений [5–8].

За последнее десятилетие опубликовано большое количество работ, в которых обсуждались фотоэлектрические свойства, оптические характеристики и стабильность перовскитных НК и НП химического состава $CsPbBr_3$, однако их транспортные и гидродинамические свойства, которые критически важны для многих потенциальных биомедицинских и технических приложений, таких как адресная доставка и формирование фотонных структур в результате фотоиндуцированной диффузии, остаются недостаточно изученными. Среди ключевых параметров, определяющих поведение НК в коллоидных растворах — коэффициент диффузии, тесно связанный с их гидродинамическими размерами.

Традиционные подходы подразумевают диффузию сферических частиц в непрерывной среде, однако частицы перовскита имеют выраженно несферическую форму. Не очевидно, как связана подвижность НК или НП с геометрическими размерами наночастиц, полученными средствами электронной или атомно-силовой микроскопии, а например метод динамического рассеяния света не применим к коллоидным растворам с высокой концентрацией наночастиц. Однако при создании дифракционных, лазерных, сенсорных структур путем голографической записи в фотополимеризуемой композиции с использованием фотоиндуцированной диффузии [9–12] необходимо учитывать особенности пространственного перераспределения наночастиц различной морфологии.

Настоящая работа обращена к экспериментальному исследованию фотоиндуцированной диффузии НК перовскита кубической формы и прямоугольных НП методом восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания и сопоставлению полученных закономерностей с размерами нанокристаллов, наблюдаемых на электронно-микроскопических снимках.

Материалы и методы исследования

Для синтеза НК и НП перовскита были использованы следующие химические вещества: 1-октадецен (ODE, 90 %, Merck), олеиновая кислота (OA, 90 %, Sigma-Aldrich), олеиламин (OlAm, 70 %, Sigma-Aldrich), карбонат цезия (Cs_2CO_3, 99.9 %, Sigma-Aldrich), бромид свинца (II) ($PbBr_2$, ≥ 99.999 %, Sigma-Aldrich), толуол и гексан (Вектон), этилацетат (EtOAc, безводный, ≥ 99.5 %, Sigma-Aldrich).

Для химического синтеза НК и НП перовскита $CsPbBr_3$ предварительно был подготовлен прекурсор олеата цезия (Cs–OA). Его получали по описанной методике [13]: в трехгорлую колбу объемом 50 mL загружали соответствующее количество Cs_2CO_3, высушенные олеиновую кислоту (OA) и 1-октадецен (ODE). Смесь дегазировали при 120 °C в течение 30 min, после чего в атмосфере азота нагревали до 150 °C до полного растворения твердой фазы. Затем устанавливали температуру 120 °C и поддерживали ее до момента инжекции Cs–OA.

Синтез НК $CsPbBr_3$ проводили с небольшими модификациями методики, опубликованной в работе [13]. В трехгорлую колбу объемом 50 mL помещали $PbBr_2$, высушенные OA и OlAm, а также ODE. Смесь дегазировали под вакуумом при 120 °C в течение 30 min, затем переводили в атмосферу азота. После полного растворения соли температуру повышали до 180 °C и быстро вводили горячий раствор Cs–OA. Через 5 s реакцию останавливали охлаждением в ледяной бане. Полученные НК осаждали центрифугированием (6000 min^{-1}, 10 min), промывали этилацетатом (1:2 гексан:этилацетат), вновь осаждали и перерастворяли в гексане. Дополнительное центрифугирование на скорости 3000 min^{-1} позволило отделить надосадочную фракцию с очищенными НК $CsPbBr_3$.

Нанопластины $CsPbBr_3$ синтезировали согласно методике, описанной в работе [14]. В отдельную трехгорлую колбу вносили $PbBr_2$, OA, OlAm и ODE, после чего дегазировали смесь при 120 °C в течение 20 min и переводили процесс под азот. После полного растворения реагентов температуру снижали до 25 °C и быстро вводили заранее приготовленный раствор Cs–OA. Затем реакционную смесь нагревали до 180 °C и сразу же останавливали реакцию охлаждением в ледяной бане. Образовавшиеся НП очищали центрифугированием: сначала при 6000 min^{-1} в течение 5 min, затем переосаждали, диспергировали в гексане и вновь центрифугировали при 3000 min^{-1} для выделения надосадочной фракции, содержащей очищенные НП $CsPbBr_3$.

Спектры оптического поглощения и ФЛ синтезированных НК и НП перовскита $CsPbBr_3$ (рис. 1, *a, b*) были зарегистрированы с использованием спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu, Киото, Япония) и спектрофлуориметра Panorama (Lumex, Санкт-Петербург, Россия).

Для НК $CsPbBr_3$ характерна выраженная экситонная полоса поглощения с максимумом на 500 nm, а также максимум ФЛ на 510 nm при возбуждении излучением с длиной волны 405 nm (рис. 1, *a*). Полная ширина на половине максимума (FWHM) спектра ФЛ составляет 21 nm, что свидетельствует о высокой однородности ансамбля частиц.

Нанопластины $CsPbBr_3$ демонстрируют более коротковолновую экситонную полосу поглощения с максимумом на 444 nm (рис. 1, *b*). Максимум ФЛ при возбуждении 405 nm наблюдается на длине волны 454 nm, при этом FWHM составляет 19 nm, что также указывает на высокую спектральную чистоту образцов. Оба типа наноструктур характеризуются высокой фотостабильностью.

Квантовый выход ФЛ, определенный относительно референтного образца родамина 6G в этаноле, составил 74 % для НК и 21 % для НП.

Электронно-микроскопические изображения НК (рис. 1, *c*) и НП (рис. 1, *d*) были получены методом просвечивающей электронной микроскопии (*Transmission electron microscopy*, TEM) с использованием микроскопа JEOL JEM-1011 (JEOL, Токио, Япония). Для подготовки образцов стоковые растворы НК и НП предварительно разбавляли приблизительно в 50 раз, после чего небольшое количество разбавленного раствора наносили на медные сетки с углеродной подложкой и высушивали на воздухе.

TEM-изображения НК демонстрируют преимущественно кубическую морфологию частиц с длиной ребра 8–11 nm (рис. 1, *e*), что характерно для $CsPbBr_3$ НК, синтезированных методом горячей инжекции. На TEM-изображениях НП (рис. 1, *d*) наблюдаются прямоугольные пластины с длиной сторон 21–30 nm и 14–27 nm (рис. 1, *f, h*) и толщиной 2.5 nm. Видны также упорядоченные стопки НП, ориентированных ребром к наблюдателю, что типично для двумерных перовскитных наноструктур.

Средний гидродинамический размер нанокристаллов, измеренный методом динамического рассеяния света (*Dynamic Light Scattering*, DLS) с использованием анализатора Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания), составил 11.9 ± 2.7 nm (рис. 1, *g*), в согласии с размерами, полученными из анализа TEM.

Люминесцентно-микроскопическое исследование диффузии

Суть исследования диффузии методом восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания (*Fluorescence Recovery After Photobleaching*, FRAP) [15–18] состоит в изменении эффективности фотолюминесценции (ФЛ) в некоторой области образца под действием света и дальнейшем отслеживании изменения интенсивности ФЛ за счет фотоиндуцированной диффузии — порожденного световым воздействием перераспределения

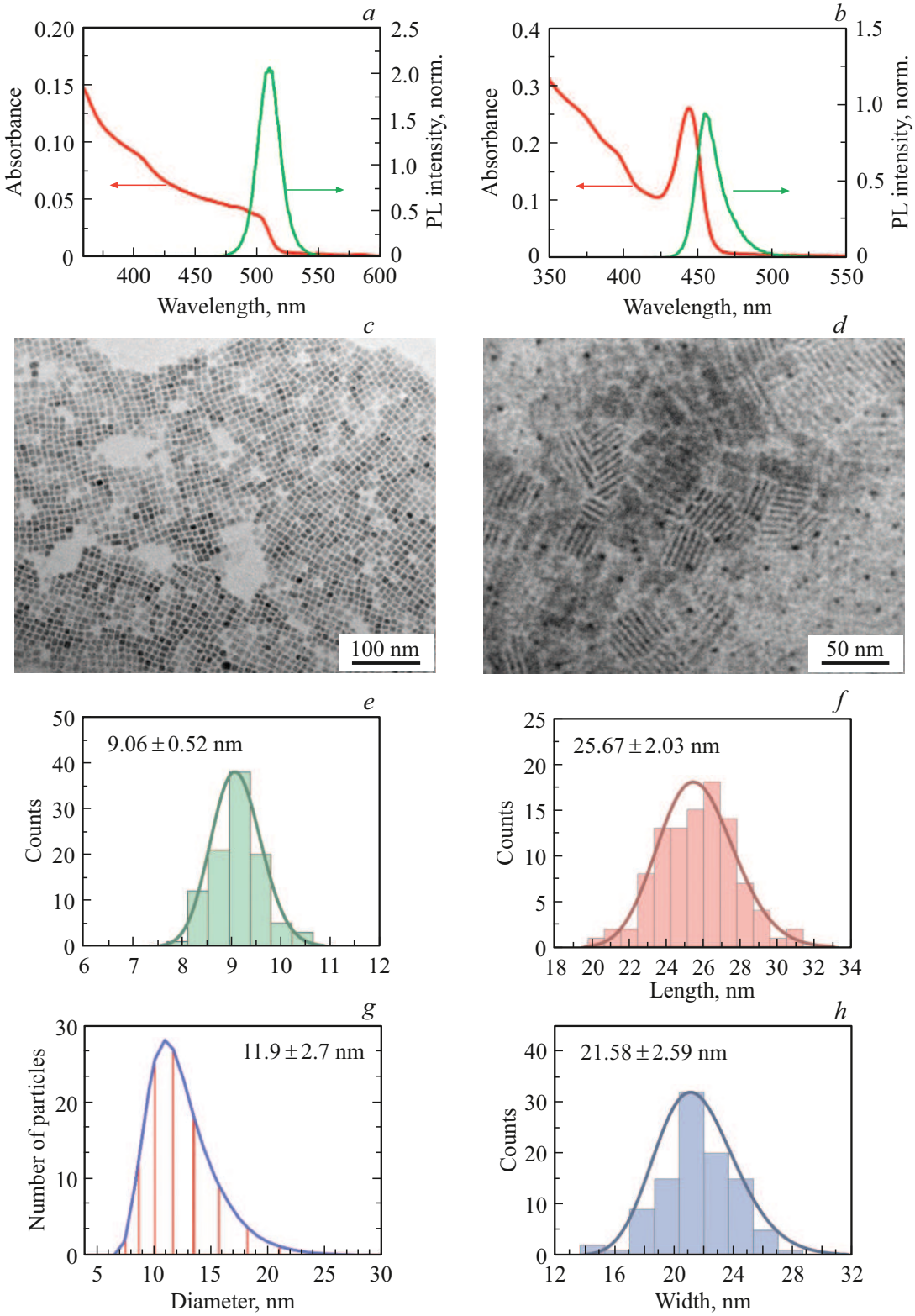

Рис. 1. Спектры поглощения (красные линии) и ФЛ при возбуждении излучением с длиной волны 405 nm (зеленые линии) кубических НК (*a*) и НП (*b*), электронно-микроскопические изображения НК и НП (соответственно *c* и *d*) и определенные по ним гистограммы распределения по длине ребра НК (*e*), по длине и ширине НП (*f* и *h*) распределение по размерам НК по данным динамического рассеяния света DLS (*g*).

в пространстве частиц с измененной и исходной эффективностью ФЛ. Реализация метода FRAP с использованием лазерной сканирующей микроскопии значительно обогатила его возможности благодаря формированию в исследуемом образце оптических неоднородностей произвольной формы и анализу не только интегральной интенсивности ФЛ, но и распределения ее интенсивности в пространстве.

В настоящей работе использован вариант метода sFRAP (*Stripe*-FRAP) [19], основанный на записи в объекте сфокусированным лазерным лучом узкой полоски и анализе меняющегося из-за диффузии распределения профиля интенсивности ФЛ в перпендикулярном полоске направлении. Информация о диффузии может быть получена из зависимости ширины профиля ФЛ от времени.

Этот подход позволяет рассматривать диффузию как одномерную, учитывать дрейф частиц, изменение интенсивности ФЛ при построении изображений после экспонирования и фотоиндуцированное изменение подвижности частиц. Эксперименты sFRAP были выполнены с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 (Carl Zeiss, Германия). Для проведения измерений кювету толщиной 1 mm с коллоидным раствором перовскитных наночастиц (НК или НП перовскитов) в стоковой концентрации, полученной при синтезе, располагали горизонтально на столике микроскопа и фокусировали в нее излучение диодного лазера с длиной волны 405 nm с помощью объективов с увеличением 10× или 20× и числовой апертурой 0.2 или 0.4 соответственно. Такие значения числовой апертуры являются компромиссными между стремлениями избежать высокой расходимости пучка (различной ширины экспонируемой полоски на разной глубине) и уменьшить толщину слоя, с которого собирается регистрируемая ФЛ — „оптического среза" (*optical slice thickness*) для выполнения приближения одномерной диффузии. Размер сканируемой области от 400×400 до $1400 \times 1400\,\mu$m, ширина экспонируемой полосы $20\,\mu$m. Интенсивность ФЛ детектировалась фотоприемниками микроскопа в спектральных диапазонах, соответствующих полосам ФЛ НК и НП перовскитов (рис. 2, *a*).

Трехмерное сканирование раствора внутри кюветы показывает, что интенсивность ФЛ в объеме коллоидного раствора распределена неравномерно (рис. 2, *b*). Кроме ослабления ФЛ с глубиной из-за поглощения возбуждающего излучения, наблюдается повышенная интенсивность ФЛ на внутренних поверхностях стекол кюветы, которая указывает на адсорбцию наночастиц на них. Адсорбированные частицы могут сохранять способность к фототрансформации, но не к диффузии, и в эксперименте sFRAP при фокусировке лазерного излучения на поверхности экспонированная полоса остается неизменной (рис. 2, *c*). Поэтому для изучения диффузии наночастиц в растворе нужен его объем, отстоящий от поверхности на некоторое расстояние, но не слишком большое, чтобы интенсивность возбуждающего излучения оставалась достаточной. В этой работе выбрано расстояние $100\,\mu$m при толщине оптического среза $10-20\,\mu$m, задаваемой числовой апертурой объектива и диаметром конфокальной диафрагмы.

Анализ изменения пространственного распределения интенсивности ФЛ в поперечном к фототрансформированной полосе направлении позволяет определить коэффициент диффузии наночастиц по скорости изменения ширины полосы, а затем рассчитать эффективные гидродинамические размеры НК. Для определения ширины полосы профиль интенсивности ФЛ в самом простом, но достаточно типичном случае аппроксимируется функцией Гаусса, которая является фундаментальным решением уравнения диффузии при постоянном ее коэффициенте. Квадрат ширины гауссова профиля линейно зависит от времени, и коэффициент диффузии определяется по наклону зависимости: $D = \Delta w^2/8\Delta t$.

Однако, например, в случае изменения коэффициента диффузии наночастиц в результате экспонирования профиль ФЛ описывается не одной функцией Гаусса, а разностью двух таких функций с разными скоростями изменения их ширины [19].

Профили ФЛ НК также продемонстрировали отклонение от гауссовой формы непосредственно после экспонирования. Оптимальная аппроксимация суммой двух функций Гаусса (рис. 3, *a, b*) указывает не на изменение коэффициента диффузии под действием света, а на исходное наличие в коллоидном растворе двух диффундирующих компонент, подобно тому что отмечалось в работах по исследованию диффузии модельной системы люминесцирующих полистирольных сфер различных диаметров [20]. Одна из гауссовых составляющих быстро расширяется и выходит за пределы сканируемой области, переставая вносить вклад в профили ФЛ; уже через несколько секунд после экспонирования они приближаются к гауссовой форме (рис. 3, *c*). Зависимость квадрата ширины профиля ФЛ от времени, показанная на рис. 3, *d*, оказывается нелинейной. Это отвечает наличию в ансамбле диффундирующих НК перовскитов различных размеров (рис. 1, *c, e*). По величине наклона зависимости на различных участках диапазон гидродинамических диаметров НК оценен как $7-18$ nm, в хорошем соответствии с результатами измерения методом динамического рассеяния света ($7-23$ nm, рис. 1, *g*).

Зависимость квадрата ширины профиля ФЛ НП от времени, полученная из анализа последовательности профилей ФЛ (рис. 3, *e*), также нелинейна (рис. 3, *f*). Изменение ее наклона указывает на наличие в ансамбле НП с эффективными гидродинамическими диаметрами в диапазоне от 9 до 20 nm, почти совпадающем с диапазоном гидродинамических размеров НК, несмотря на значительное различие длин сторон этих наночастиц: $8-11$ nm для НК (рис. 1, *e*) против $16-30$ nm для НП (рис. 1, *f, h*) и их объемов: соответственно $500-1300\,\text{nm}^3$ против $800-2100\,\text{nm}^3$.

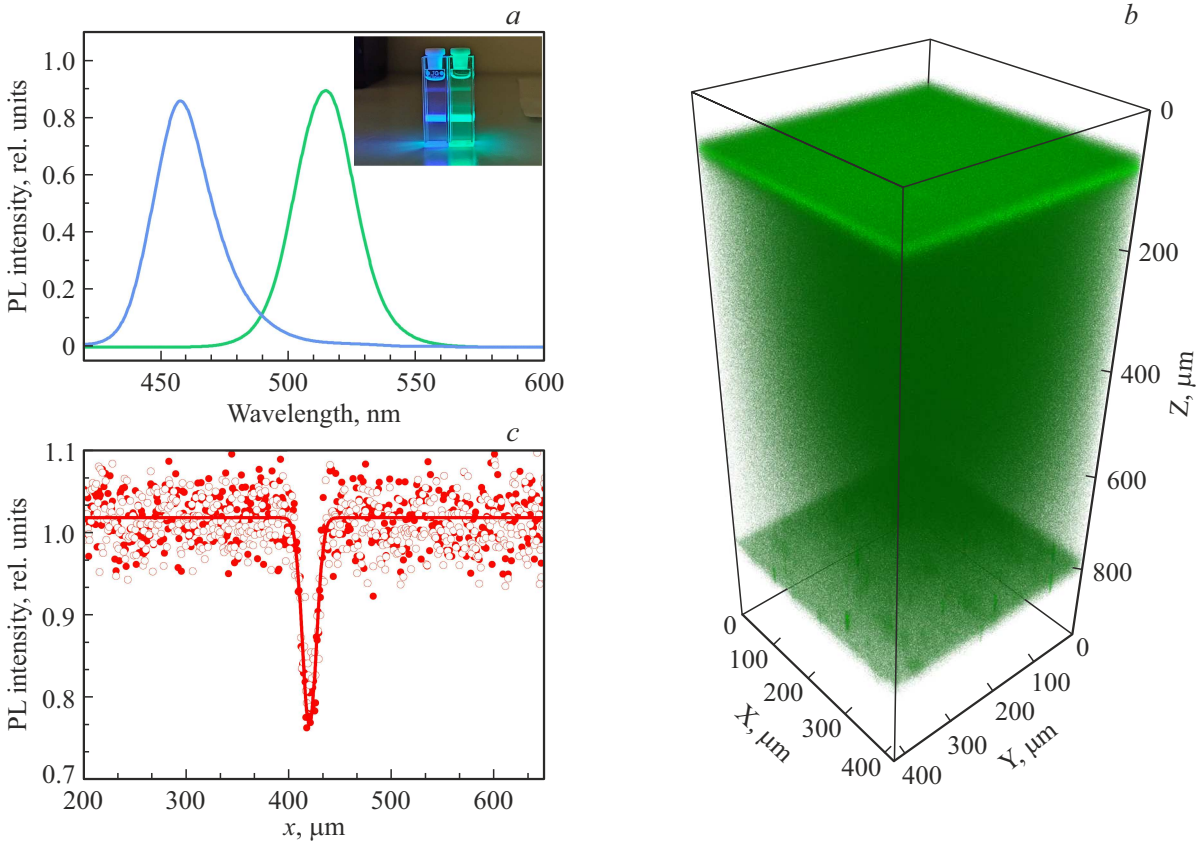

Рис. 2. Спектры ФЛ НП (синяя кривая) и НК (зеленая кривая) перовскитов $CsPbBr_3$, измеренные с помощью лазерного сканирующего микроскопа при возбуждении излучением лазера с длиной волны 405 nm (на вставке люминесцирующие коллоидные растворы НП и НК перовскитов в кюветах при той же длине волны возбуждения) (*a*). Влияние поверхности кюветы: объемное распределение интенсивности люминесценции коллоидного раствора НП перовскита при падении возбуждающего излучения сверху (видна повышенная интенсивность ФЛ на внутренних поверхностях стекол кюветы) (*b*) и профили ФЛ в направлении, поперечном к экспонированной полосе, зарегистрированные через 1 s и 50 s (темные и светлые точки) после экспонирования (ширина профиля неизменна и составляет 14 μm) (*c*).

Данные о поступательной диффузии частиц в коллоидном растворе в предположении их сферической формы принято интерпретировать на основе уравнения Стокса-Эйнштейна, связывающего коэффициент диффузии с диаметром частицы:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}.$$

Чтобы применить это уравнение к частицам несферической формы, нужно разумно определить их размер. Естественный пространственный масштаб куба — длина его ребра a. Но куб очевидно больше шара с диаметром, равным длине его ребра — таков размер вписанного в куб шара, и диффундирует медленнее. Описанный вокруг куба шар с диаметром, равным пространственной диагонали куба $\sqrt{3}a$, велик по сравнению с этим кубом. Авторы работы [21] показали, что сила гидродинамического трения кубической частицы близка к силе трения шара, диаметр которого равен арифметическому среднему между диаметрами вписанного в куб и описанного вокруг куба шаров $(\sqrt{3}+1)a/2$. Эта величина может быть принята за расчетный гидродинамический размер куба, не учитывающий однако сольватной оболочки, лигандов, поверхностно активных молекул, окружающих реальную наночастицу. Объем такого шара на несколько процентов больше, чем объем соответствующего куба. Это означает, в частности, что при равных объемах куб испытывает более сильное гидродинамическое трение и диффундирует медленнее, чем шар. Диапазон гидродинамических диаметров кубических нанокристаллов 7–18 nm, измеренных методом sFRAP, перекрывает диапазон размеров 10–14 nm, рассчитанных в рамках изложенных представлений для кубических НК с ребрами длиной 8–11 nm, наблюдаемых на электронно-микроскопических изображениях (рис. 1, *c, e*), а средние размеры одинаковы.

Для рассмотрения гидродинамических свойств диффундирующих частиц, имеющих форму пластины, удобным частным случаем является тонкий диск, в который в пределе бесконечного отношения двух длинных осей к короткой переходит сплюснутый сфероид вращения. Сила гидродинамического трения тонкого диска радиу-

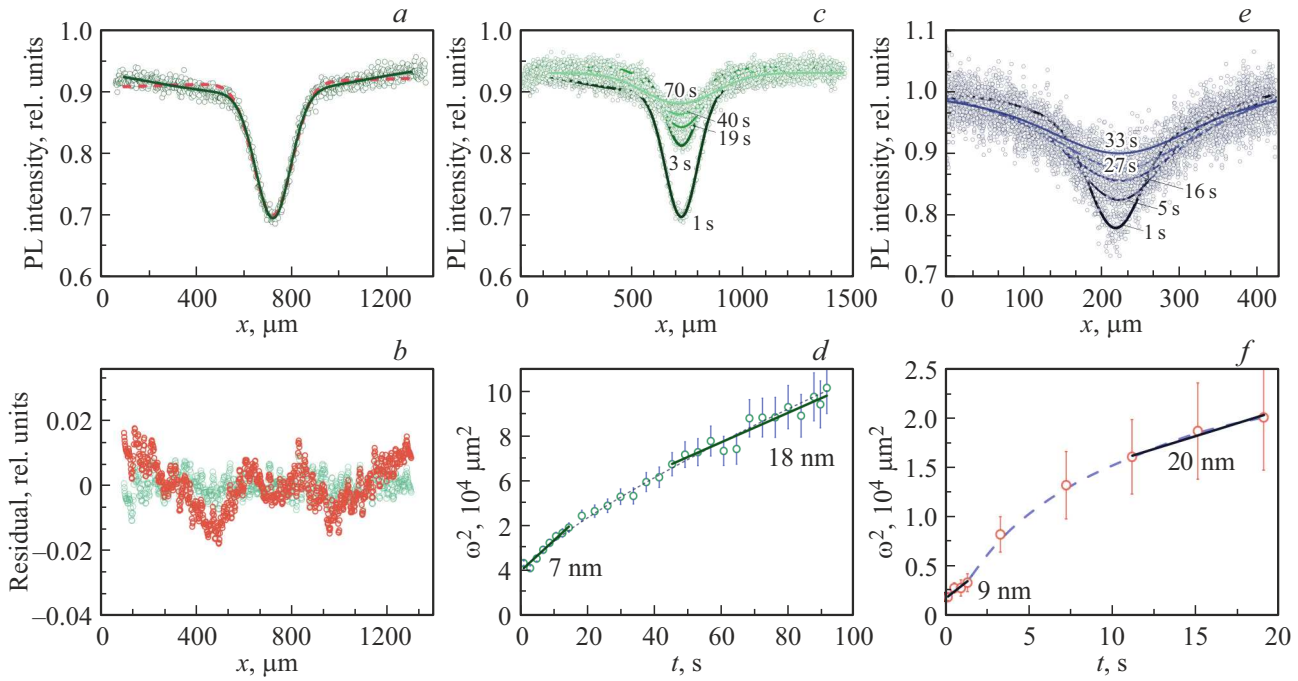

Рис. 3. Результаты исследования НК и НП перовскитов методом sFRAP: *a* — профиль ФЛ НК в направлении, перпендикулярном экспонированной полосе, и результат его аппроксимации функцией Гаусса (оранжевая штриховая кривая) и суммой двух таких функций (сплошная зеленая кривая); *b* — отклонение результата аппроксимации функцией Гаусса (оранжевые точки) и суммой двух функций Гаусса (зеленые точки) от измеренного профиля; профили ФЛ кубических НК, измеренные через различные промежутки времени после экспонирования (*c*) и соответствующая им зависимость квадрата гауссовой ширины профиля от времени (*d*), аппроксимированная степенной функцией для связности восприятия и линейными зависимостями для определения гидродинамических размеров, которые также указаны на графике; подобные последовательности профилей ФЛ (*e*) и зависимость квадрата ширины профиля от времени (*f*) для НП.

сом R, усредненная по всевозможным его ориентациям, составляет $f = 12\eta R$ [22], а эквивалентный радиус шара, испытывающего при поступательной диффузии такое же сопротивление растворителя (стоксов радиус) — $2R/\pi$. Авторы работы [23] вычисляют силу трения пластины произвольной формы через силу трения диска той же площади, домножив ее на выражение, линейное по толщине диска, но слабо зависящее от нее. Для квадратной или близкой к ней прямоугольной пластины площадью S со сторонами $\approx \sqrt{S}$ и толщиной h сила трения при диффузии в среде с вязкостью η составляет $f = 12\eta(1.035\sqrt{S/\pi} + 0.68h)$, а стоксов радиус — $2/\pi(1.035\sqrt{S\pi} + 0.68h)$. Согласно этим представлениям, расчетный гидродинамический диаметр нанопластины со средними по ансамблю размерами $25.7 \times 21.6 \times 2.5$ nm составит 20 nm. Методом sFRAP получена оценка диапазона эффективных размеров НП от 9 до 20 nm (рис. 3,*f*), несколько отстающих от 15–24 nm, рассчитанных по геометрическим размерам НП (рис. 1,*d,f*), хотя можно было ожидать, что полученные из экспериментальных данных по диффузии гидродинамические размеры превысят рассчитанные по данным электронной микроскопии. Одной из причин расхождения может быть малая выборка НП, положенная в основу оценки их геометрических размеров.

Заключение

В этой работе, затрагивающей особенности проявления диффузии коллоидных нанокристаллов перовскита различной формы в экспериментах с вызванными световым воздействием неоднородностями люминесценции, обнаружено сходное диффузионное поведение кубических нанокристаллов с плоскими прямоугольными нанопластинами, превосходящими их в 1.5–2 раза по линейным размерам и объему. Наличие в ансамбле наночастиц различных размеров, заметное на электронно-микроскопических снимках, проявляется в люминесцентно-микроскопических экспериментах через нелинейность зависимости квадрата ширины профиля интенсивности люминесценции от времени. Оценки гидродинамических размеров кубических нанокристаллов по геометрическим близки к результатам оптических измерений, а для нанопластин они дают несколько завышенные значения.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-23-00708 „Фотоиндуцированная диффузия перовскитных кванто-

вых точек по данным лазерной микроскопии и голографической релаксометрии для дифракционных устройств фотоники“, https://rscf.ru/project/25-23-00708/.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D. Tatarinov, A.O. Ismagilov, A.V. Koroleva, E. Zhizhin, W. Zheng, A.V. Baranov, A.P. Litvin. Nanoscale, **17**, 6695–6703 (2025). DOI: 10.1039/D4NR05049E

[2] D.A. Tatarinov, J. Xie, Q. Qian, Q. Wang, N.A. Maslova, L.N. Borodina, A.P. Litvin, H. Huang. Chin. J. Chem., **42**, 2779–2787 (2024). DOI: 10.1002/cjoc.202400513

[3] A.P. Litvin, J. Guo, J. Wang, X. Zhang, W. Zheng, A.L. Rogach. Small, **21**, 2408422 (2025). DOI: 10.1002/smll.202408422

[4] Z. Liu, X. Qin, Q. Chen, T. Jiang, Q. Chen, X. Liu. Advanced Materials, **35**, 2209279 (2023). DOI: 10.1002/adma.202209279

[5] S. Wang, A.A. Yousefi Amin, L. Wu, M. Cao, Q. Zhang, T. Ameri. Small Struct., **2**, 2000124 (2021). DOI: 10.1002/sstr.202000124

[6] W. Lv, L. Li, M. Xu, J. Hong, X. Tang, L. Xu, Y. Wu, R. Zhu, R. Chen, W. Huang. Advanced Materials, **31**, 1900682 (2019). DOI: 10.1002/adma.201900682

[7] K. Sakhatskyi, A. Bhardwaj, G.J. Matt, S. Yakunin, M.V. Kovalenko. Advanced Materials, **37**, 2418465 (2025). DOI: 10.1002/adma.202418465

[8] Y. Shi, X. Deng, Y. Gan, L. Xu, Q. Zhang, Q. Xiong. Advanced Materials, **37**, 2413559 (2025). DOI: 10.1002/adma.202413559

[9] J.T. Sheridan, R.K. Kostuk, A.F. Gil, Y. Wang, W. Lu, H. Zhong, Y. Tomita, C. Neipp, J. Rancés, S. Gallego, I. Pascual, V. Marinova, S.H. Lin, K.Y. Hsu, F. Bruder, S. Hansen, C. Manecke, R. Meisenheimer, C. Rewitz, T. Rölle, S. Odinokov, O. Matoba, M. Kumar, X. Quan, Y. Awatsuji, P.W. Wachulak, A.V. Gorelaya, A.A. Sevryugin, E.V. Shalymov, V.Yu. Venediktov, R. Chmelik, M.A. Ferrara, G. Coppola, A. Márquez, A. Beléndez, W. Yang, R. Yuste, A. Bianco, A. Zanutta, C. Falldorf, J.J. Healy, X. Fan, B.M. Hennelly, I. Zhurminsky, M. Schnieper, R. Ferrini, S. Fricke, G. Situ, H. Wang, A.S. Abdurashitov, V.V. Tuchin, N.V. Petrov, T. Nomura, D.R. Morim, K. Saravanamuttu. Journal of Optics (United Kingdom), **22**, 123002 (2020). DOI: 10.1088/2040-8986/abb3a4

[10] Y. Tomita, E. Hata, K. Momose, S. Takayama, X. Liu, K. Chikama, J. Klepp, C. Pruner, M. Fally. J. Modern Optics, **63**, S1–S31 (2016). DOI: 10.1080/09500340.2016.1143534

[11] T.N. Smirnova, O.V. Sakhno, P.V. Yezhov, L.M. Kokhtych, L.M. Goldenberg, J. Stumpe. Nanotechnology, **20**, 245707 (2009). DOI: 10.1088/0957-4484/20/24/245707

[12] L. Borodina, V. Borisov, K. Annas, A. Dubavik, A. Veniaminov, A. Orlova. Materials, **15**, 8195 (2022). DOI: 10.3390/ma15228195

[13] L. Protesescu, S. Yakunin, M.I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C.H. Hendon, R.X. Yang, A. Walsh, M.V. Kovalenko. Nano Lett., **15**, 3692–3696 (2015). DOI: 10.1021/nl5048779

[14] D. Yang, Y. Zou, P. Li, Q. Liu, L. Wu, H. Hu, Y. Xu, B. Sun, Q. Zhang, S.T. Lee. Nano Energy, **47**, 235–242 (2018). DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.03.019

[15] P.S. Russo, J. Qiu, N. Edwin, Y.W. Choi, G.J. Doucet, D. Sohn. *Soft Matter Characterization*, ed. by R. Borsali, R. Pecora (Springer, 2008) p. 605–636. DOI: 10.1007/978-1-4020-4465-6_10

[16] D. Dey, S. Marciano, A. Nunes-Alves, V. Kiss, R.C. Wade, G. Schreiber. J. Mol. Biol., **433**, 166898 (2021). DOI: 10.1016/j.jmb.2021.166898

[17] N. Lorén, J. Hagman, J.K. Jonasson, H. Deschout, D. Bernin, F. Cella-Zanacchi, A. Diaspro, J.G. McNally, M. Ameloot, N. Smisdom, M. Nydén, A.M. Hermansson, M. Rudemo, K. Braeckmans. Q. Rev. Biophys., **48**, 323–387 (2015). DOI: 10.1017/S0033583515000013

[18] M. Carnell, A. Macmillan, R. Whan. *Methods in Molecular Biology*, ed. by Dylan M. Owen, (Humana Press Inc., 2015) p. 255–271. DOI: 10.1007/978-1-4939-1752-5_18

[19] Л.Н. Бородина, В.Н. Борисов, А.В. Вениаминов. Опт. и спектр., **132** (9), 964-974 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.09.59195.6730-24 [L.N. Borodina, V.N. Borisov, A.V. Veniaminov. Opt. Spectrosc., **132** (9), 914–923 (2024). DOI: 10.61011/EOS.2024.09.60046.6730-24].

[20] G.I. Hauser, S. Seiffert, W. Oppermann. J. Microsc., **230**, 353–362 (2008). DOI: 10.1111/j.1365-2818.2008.01993.x

[21] K. Okada, A. Satoh. Mol. Phys., **118**, 1–13 (2020). DOI: 10.1080/00268976.2019.1631498

[22] B.R. Jennings, K. Parslow. Proc. R. Soc. Lond. A, **419**, 137–149 (1988). DOI: 10.1098/rspa.1988.0100

[23] J.G. Hernández-Cifre, R. Rodríguez-Schmidt, C.M. Almagro-Gómez, J. García de la Torre. Polymer, **262**, 125467 (2022). DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125467