

УДК 66-9

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ CsPbBr<sub>3</sub> ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СВЕТОДИОДАХ И ФОТОПРИЕМНИКАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2022 г. А. А. Кныш<sup>а, \*</sup>, А. А. Ткач<sup>а</sup>, Д. Гулевич<sup>а</sup>, И. Набиев<sup>а, b</sup>, П. С. Самохвалов<sup>а</sup><sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия<sup>б</sup>Университет Реймса, Шампань-Арденны, Реймс, 51100 Франция

\*E-mail: knyshkikai@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2022 г.

После доработки 08.06.2022 г.

Принята к публикации 13.06.2022 г.

В настоящее время активно развиваются фундаментальные и прикладные исследования перовскитных нанокристаллов (ПНК) состава CsPbBr<sub>3</sub> для использования в фотовольтаических ячейках, гибридных светодиодах, источниках единичных фотонов, базовых элементах оптических компьютеров и в других оптоэлектронных устройствах. Основной проблемой, ограничивающей применения ПНК, является их низкая стабильность в нормальных условиях. Одним из вариантов решения проблемы стабильности ПНК при контакте с атмосферой является создание композитных материалов, подразумевающих включение ПНК в полимерные матрицы. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по созданию композитных тонких пленок (ТП) из ПНК и модифицированного полиметилметакрилата (ПММА). В частности, были изготовлены образцы стабильных во времени ТП CsPbBr<sub>3</sub>, обладающих высоким квантовым выходом фотолюминесценции, найдены оптимальные параметры для изготовления ТП методом вращающейся подложки (время вращения, скорость вращения, концентрация), а также получены ТП, характеризующиеся высокой однородностью пленочного покрытия. Последний фактор является важным критерием для применения ТП состава ПНК–ПММА в качестве активного слоя в гибридных светоизлучающих диодах QDLED (от англ. Quantum Dot Light-Emitting Diode). Кроме этого, поскольку ПНК являются перспективной основой сцинтилляционного покрытия детекторов, качество работы которых зависит от равномерности распределения люминофора в объеме сцинтиллятора (например, ПЗС-матриц), результаты настоящей работы могут быть использованы при разработке детекторов рентгеновского излучения медицинского назначения.

**Ключевые слова:** люминесценция, перовскитные нанокристаллы, CsPbBr<sub>3</sub>, тонкие пленки, композитные материалы, метод вращающейся подложки, квантовый выход

DOI: 10.56304/S2079562922030228

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Перовскитные нанокристаллы (ПНК), с общей формулой ABX<sub>3</sub>, где A = Cs<sup>+</sup>, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, HC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub><sup>+</sup> и др.; B = Pb<sup>2+</sup>, Sn<sup>2+</sup> и др., а X = галогенид-ион [1], представляют собой новый класс материалов, который может быть успешно использован в оптоэлектронных устройствах благодаря таким своим оптическим свойствам, как высокий коэффициент оптического поглощения и значительный квантовый выход (КВ) фотолюминесценции (ФЛ).

Широкое использование ПНК в настоящее время ограничено из-за их структурной нестабильности и ухудшения фотофизических свойств при воздействии света, влаги и кислорода [2].

Особенно перспективными для использования в новых типах светодиодов (СД) и фотоприемников [3] являются ПНК химического состава CsPbBr<sub>3</sub>, отличающиеся высокой термодинамической стабильностью и хорошими оптическими характеристиками. Основными причинами постепенной фотодеградации ПНК указанного состава являются неполное покрытие их поверхности органическими молекулами-стабилизаторами, а также высокодинамичное поведение лигандов на границе раздела нанокристалл/среда, что делает поверхность ПНК уязвимой под воздействием атмосферной влажности [4]. Для решения подобных проблем известен ряд постсинтетических методов, а именно модификация поверхности ПНС состава CsPbBr<sub>3</sub> лигандами, обладающими

более высокой стабильностью, по сравнению с используемыми при синтезе, создание структур по типу ядро-оболочка, иммобилизация на поверхности ПНК олиго- и полимеров, и др. [5, 6]. В настоящей работе, для снижения негативных эффектов окружающей среды была проведена инкапсуляция ПНК в защитную полимерную матрицу с последующим отжигом образцов, что позволило получить стабильные во времени тонкие пленки ПНК, обладающие равномерным покрытием, а также высоким КВ ФЛ. Предложенная методика обеспечивает эффективную физическую защиту ПНК от воздействия как факторов атмосферы, так и от тушащих ФЛ молекул, что значительно улучшает стабильность излучающего наноматериала. В качестве полимерной матрицы нами были использованы поли (метилметакрилат) (ПММА) и его сополимер с лаурилметакрилатом (п(ММА–ЛМА)). Выбор ПММА в качестве матрицы был обусловлен его оптической прозрачностью и высокой устойчивостью полимера к влажности воздуха [7].

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Материалы:**  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  (99.9%, Aldrich),  $\text{PbBr}_2$  (99.999%, Aldrich), 1-октадецен (90%, Sigma-Aldrich), олеиновая кислота (98%, Aldrich), олеиламин (98%, Aldrich), толуол (осч., АО “Экос-1”), октан (98%, Sigma-Aldrich), метилацетат (98%, Aldrich).

**Инструментальные методы исследований:** тонкие пленки ПНК–ПММА состава  $\text{CsPbBr}_3$  были изготовлены на установке спин-коатинга Spin-Coater KW-4A (Chemmat). Измерение спектров люминесценции ТП проводили при помощи оптоволоконного зонда, подключенного к спектрофлуориметру Cary Eclipse (Agilent). Исследования временной стабильности флуоресценции перовскита проводили путем измерения КВ ТП с использованием интегрирующей сферы. Микроструктуру ПНК исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения на приборе JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 3.1. Синтез перовскитных нанокристаллов $\text{CsPbBr}_3$

ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$  были получены методом коллоидного синтеза в две стадии. На первом этапе проводили реакцию взаимодействия  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  и олеиновой кислоты в октадецене в токе аргона при температуре 150°C, в результате чего был синтезирован олеат цезия. Далее, полученный прекурсор инжестировали при температуре 180°C в раствор рассчитанных количеств бромиды свинца, олеиновой кислоты и олеиламина в октадецене, в результате чего получили коллоидные нанокри-

сталлы состава  $\text{CsPbBr}_3$ . Очистку ПНК проводили путем их осаждения метилацетатом, сопровождаемым центрифугированием и перерастворением в толуоле.

### 3.2. Синтез полимерных матриц

Изготовление полимерных матриц на основе смеси метилметакрилата и лаурилметакрилата осуществляли методом радикальной полимеризации соответствующих мономеров, в соотношении 2 : 1, в растворе толуола с использованием 0.5 мол. % азобисциклогексанкарбонитрила (ACHN) в качестве термоинициатора. После проведения полимеризации в инертной атмосфере при 95°C в течение 10 ч, полученный полимер осаждали добавлением избытка метанола, отделяли от маточного раствора декантированием и высушивали на плитке при 100°C в течение 3 ч.

### 3.3. Получение тонких пленок

Химическую очистку стеклянных подложек от органических загрязнений проводили в два этапа. Подложки помещали в смесь концентрированной серной кислоты и дихромата калия (хромовая смесь) на 15–20 мин, омывали проточной водой и опускали в смесь концентрированных азотной  $\text{HNO}_3$  и соляной  $\text{HCl}$  кислот, взятых в соотношении 1 : 3 по объему (царская водка), на 30–40 мин. Далее, каждую подложку промывали деионизированной водой, после чего высушивали в сушильном шкафу при температуре 100–110°C в течение 1.5–2 ч. Для формирования ТП, приготовленные смеси наносили на стеклянную подложку методом вращающейся подложки (спин-коатинга) [8] при определенной скорости ( $\omega_{\text{вр}}$ ) и времени ( $\tau_{\text{вр}}$ ) вращения подложки. Тонкие пленки ПНК готовили с использованием коллоидных растворов  $\text{CsPbBr}_3$  с концентрацией 20 мг/мл в толуоле или октане. На предварительно очищенное стекло наносили 80–100 мкл раствора, после чего пленки формировали методом спин-коатинга при  $\omega_{\text{вр}} \sim 2000$  об/мин и  $\tau_{\text{вр}} = 60$  с. Для улучшения люминесцентных свойств ТП также применяли технологии отжига, благодаря чему из пленок выпаривается лишняя захваченный растворитель и происходит релаксация их механических напряжений за счет изменения конформации лигандов [9]. После нанесения раствора ПНК тонкие пленки отжигали при 70°C в течение 30 мин.

Помимо ТП на основе чистых ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$ , в настоящей работе также были исследованы композитные ТП, представляющие собой смеси полимеров и нанокристаллов, а также двухслойные ТП, где поверх исходной пленки ПНК наносили дополнительный стабилизирующий слой полимеров. Для этих целей в работе были использованы как чистый ПММА, так и его аналог – со-

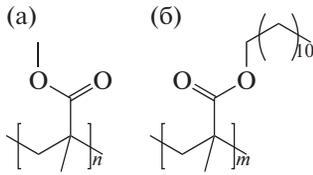


Рис. 1. Структурные формулы ПММА (а) и ПЛМА (б).

полимер метил- (рис. 1а) и лаурил- (рис. 1б) метакрилат в соотношении 2 : 1 (п(ММА–ЛМА)), которые предназначены для “механической” стабилизации и инкапсуляции ПНК в полимерную матрицу.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате реакций двухстадийного коллоидного синтеза в работе были получены образцы ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$ , характеризующиеся достаточно высоким КВ, достигающим 70% (измерения проведены относительно флуоресцеина). Спектры ФЛ и поглощения полученных образцов приведены на рис. 2а. Полная ширина пика фотолюминесценции (513 нм) на полувысоте составила 19.0 нм. По микрофотографиям просвечивающей электронной микроскопии (рис. 2б), можно сделать вывод, что нанокристаллы полученных образцов имеют преимущественно кубическую форму, а также характеризуются высокими степенями кристалличности и монодисперсности.

Предварительные эксперименты по изготовлению ТП на основе чистых ПНК были проведены при  $\omega_{\text{вр}} = 1500$  об/мин и  $\tau_{\text{вр}} = 45$  с, при этом полученные образцы характеризовались неравномерностью покрытия, и, кроме того, были подвержены быстрой деградации из-за воздействия окружающей среды.

Для нанесения инкапсулирующего слоя использовали раствор ПММА в ацетоне, поскольку данный метод активно используется при стабилизации и защиты слоев активных слоев на основе квантовых точек в гибридных светодиодах [10]. Слой ПММА наносили методом спин-коатинга из раствора полимера в ацетоне, концентрацию которого варьировали от 1 до 1.5 мг/мл [10, 11]. Нанесение слоев ПММА проводили в диапазоне скоростей  $\omega_{\text{вр}}$  от 1000 до 3000 об/мин. В результате эксперимента оказалось, что нанесение слоя ПММА из раствора в ацетоне поверх чистых ПНК приводит к разрушению слоя ПНК и дальнейшей деградации нанокристаллов (рис. 3а, 3б). Нанесение слоя ПММА на слой ПНК из раствора в октане (что могло бы снизить напряжения в пленке ПНК из-за высокой полярности ацетона) также не привело к удовлетворительному результату (рис. 3в, 3г). В результате нами было принято решение готовить гибридные тонкие пленки нанесением слоя ПММА на слой ПНК из раствора в толуоле.

В результате проведенных экспериментов нами были получены образцы тонких пленок ПНК, покрытых полимерным слоем, наносимым из растворов с различными массовыми долями ПММА.

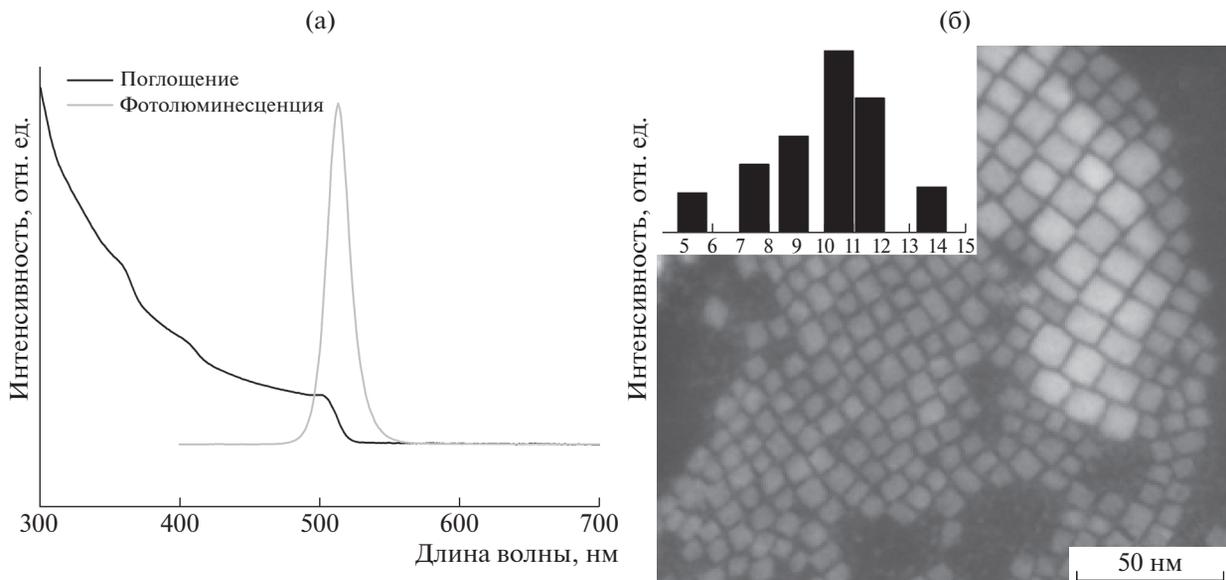
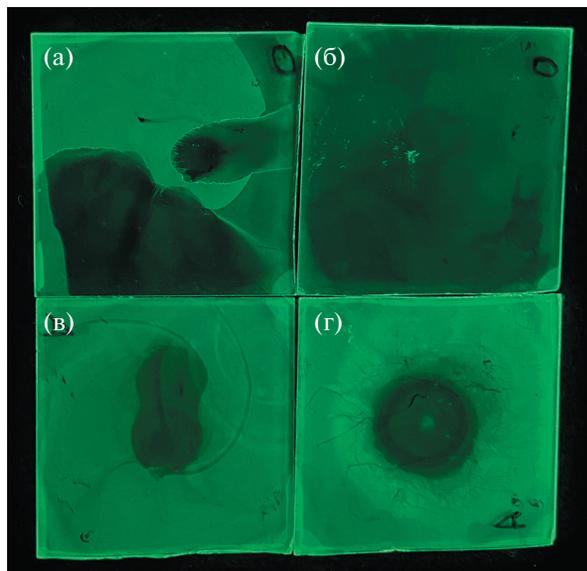


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции и поглощения ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$  в растворе (а), снимок сканирующей просвечивающей электронной микроскопии ПНК  $\text{CsPbBr}_3$  (б), на вставке: распределение ПНК по размерам [нм] (ось абсциссе).

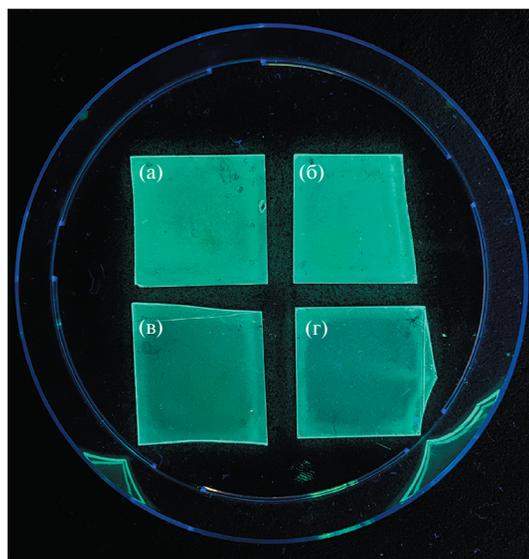
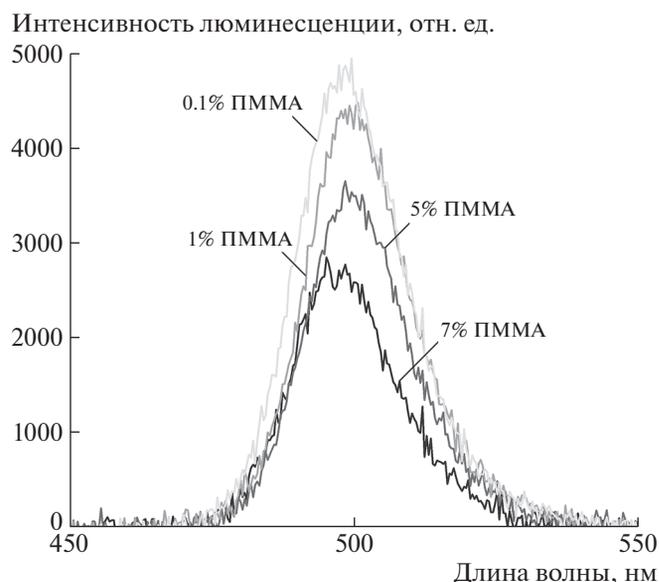


**Рис. 3.** Тонкие пленки ПНК при различных параметрах нанесения: нанесение на слой ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> слоя ПММА в октано (а–б) и ПММА в ацетоне (в–г).

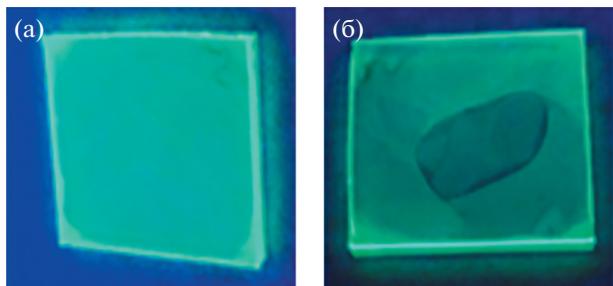
Фотографии изготовленных образцов и их спектры ФЛ приведены на рис. 4.

Из фотографий, приведенных на рис. 4в и 4г, видно, что нанесение ПММА на слой ПНК из раствора в толуоле приводит к частичному смыванию слоя ПНК. Это делает поверхность изготовленных ТП неоднородной, со значительным увеличением интенсивности ФЛ к краю пленки. При этом в образцах, изготовленных с приме-

нием растворов ПММА в толуоле при меньшей концентрации полимера (рис. 4а и 4б), этот эффект не наблюдается. Из приведенных на рис. 4 спектров следует, что наибольшей интенсивностью ФЛ характеризуется образец двухслойной пленки, изготовленный с использованием 0.1%-го раствора ПММА в толуоле, а минимальную интенсивность — образец, полученный с использованием 7%-го раствора ПММА в толуоле. Такая тенденция снижения интенсивности ФЛ при увеличении массовой доли ПММА в толуоле может быть связана с частичным смыванием верхнего слоя исходной пленки ПНК более вязким раствором, что приводит к общему уменьшению количества люминофора в пленке. Максимум интенсивности ФЛ образца ТП, изготовленного нанесением 7%-го раствора ПММА в толуоле на слой ПНК, сдвинут на 5 нм относительно среднего значения  $\lambda_{\text{макс}}$  (ФЛ) нм, при среднем значении ширины максимума ФЛ на полувысоте равном 21 нм. При этом,  $\lambda_{\text{макс}}$  (ФЛ) образца с максимальной интенсивностью ФЛ совпадает со средним значением  $\lambda_{\text{макс}}$  (ФЛ). Таким образом, можно заключить, что при увеличении массовой доли ПММА в исходном растворе в толуоле происходит снижение интенсивности флуоресценции ТП. Предположительно, полученные результаты могут быть обусловлены неоднородностью поверхности, что влияет на качество ТП. С другой стороны, в процессе создания ТП возможно изменение квантового выхода ФЛ самих нанокристаллов, причем как в сторону его уменьшения, так и увеличения. При этом, корреляции между интенсивностью и значением квантового выхода ТП не наблюдается.



**Рис. 4.** Спектр фотолюминесценции тонких пленок ПНК CsPbBr<sub>3</sub> при различных концентрациях ПММА в толуоле (слева), тонкие пленки ПНК с соотношениями ПММА в толуоле по массе 0.1 (а), 1 (б), 5 (в), 7% (г) при  $\omega_{\text{вр}} = 1500$  об/мин и  $\tau_{\text{вр}} = 45$  с (справа).

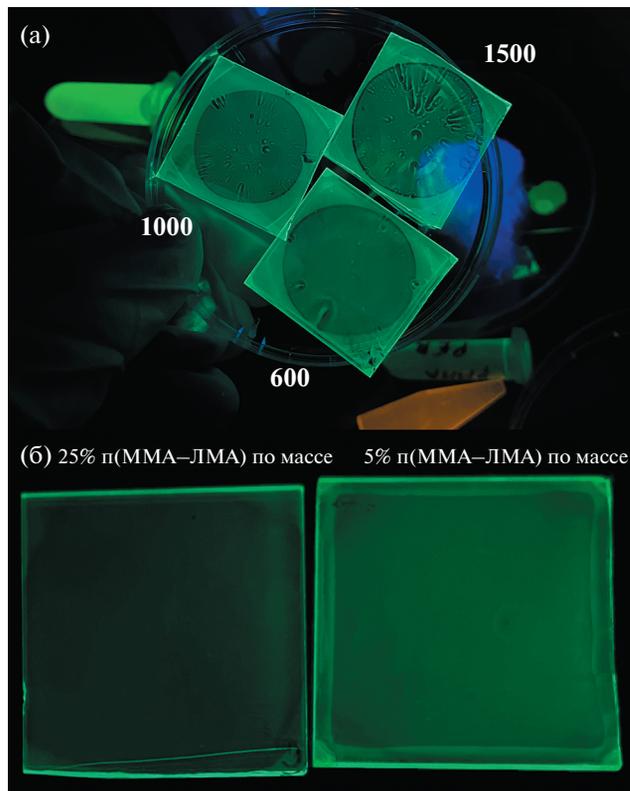


**Рис. 5.** Внешний вид образцов: однослойной тонкой пленки ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> (а), двухслойной ТП с нанесением поверхностного слоя чистого сополимера p(MMA–ЛМА) на слой ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> (б).

Далее, нами были изготовлены образцы двухслойных ТП, состоящих из слоя чистого ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> и поверхностного слоя сополимера p(MMA–ЛМА) (рис. 1б), который позволяет дополнительно стабилизировать изготовленные ТП и защитить инкапсулированные ПНК от воздействий окружающей среды. Действительно, указанный сополимер обладает лучшей фазовой совместимостью с поверхностью ПНК, по сравнению с чистым ПММА, из-за наличия у третьей части его мономерных звеньев длинного алифатического фрагмента, который может напрямую встраиваться в слой поверхностных лигандов нанокристаллов. Слои сополимера наносили на слой ПНК при скорости коатинга  $\omega_{вр} = 1800$  об/мин и времени  $\tau_{вр} = 60$ . Было установлено, что, как и в случае с чистым ПММА, нанесение слоя сополимера p(MMA–ЛМА) описанным выше способом приводит к разрушению нижних слоев ПНК (рис. 5б).

Таким образом, нами показано, что нанесение дополнительного слоя полимера на слой ПНК не позволяет получить ТП с качественным покрытием. Для решения этой проблемы, нами было принято решение изготовить образцы композитных ТП, состоящих из смесей ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> и матрицы ПММА или сополимера p(MMA–ЛМА).

В предварительных экспериментах, нами были приготовлены смеси растворов ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> в октане и ПММА в толуоле (растворимость ПММА в октане является крайне низкой). Массовая доля ПММА по отношению к ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> в стоковых растворах составляла 10 и 20%. Композитные тонкие пленки ПНК/ПММА формировали при  $\omega_{вр} = 2000$  об/мин и  $\tau_{вр} = 60$  с. Изготовленные при таких условиях ТП были неравномерными; последующие нанесения производились при меньших  $\omega_{вр}$ , составляющих 1500, 1000 и 600 об/мин, с целью определения оптимальной скорости вращения. Было установлено, что с уменьшением  $\omega_{вр}$  поверхность композитных ТП становилась более однородной, однако полностью равномерного покрытия стеклянной под-



**Рис. 6.** Внешний вид композитных тонких пленок, нанесенных из смеси растворов ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> в октане и p(MMA–ЛМА) в толуоле при  $\tau_{вр} = 60$  с и  $\omega_{вр} = 1500, 1000$  и  $600$  об/мин (а) и композитные тонкие пленки, нанесенных из смеси ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> и p(MMA–ЛМА) в октане при  $\omega_{вр} = 2000$  об/мин и  $\tau_{вр} = 60$  с (б).

ложки тонкими пленками достичь не удалось (рис. 6а). Вследствие этого, нами было решено изготовить композитные ТП на основе ПНК состава CsPbBr<sub>3</sub> и сополимера p(MMA–ЛМА). Преимуществом такого варианта является возможность растворения в октане как ПНК, так и сополимера, что снижает вероятность появления в пленках дефектов, связанных с неравномерностью испарения растворителя. Массовая доля сополимера p(MMA–ЛМА), по отношению к CsPbBr<sub>3</sub>, в изготовленных ТП, составляла 5 и 25%. Тонкие пленки готовили при  $\omega_{вр} = 2000$  об/мин и  $\tau_{вр} = 60$  с. При указанных условиях, полученные ТП демонстрируют качественное равномерное покрытие. На рис. 6б представлены пленки, качество которых являлось лучшим из всех исследованных образцов.

Для исследования стабильности ФЛ-характеристик тонких композитных пленок, в течение недели проводили измерения квантового выхода ФЛ с использованием интегрирующей сферы (ИС) [12]. Преимуществом такого подхода является отсутствие чувствительности измерений к

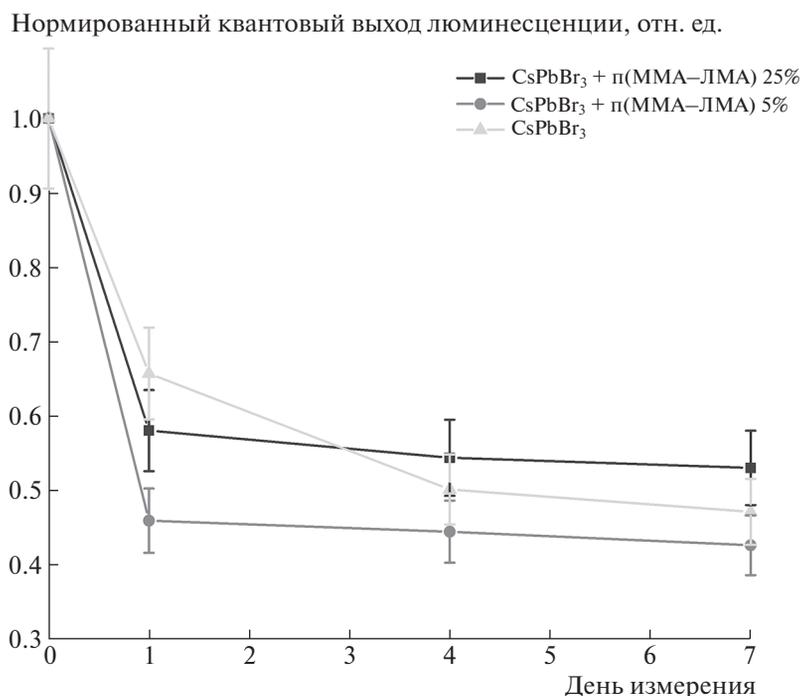
**Таблица 1.** Относительный квантовый выход тонких пленок ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3 + \text{p(MMA-LMA)}$  с различными массовыми соотношениями компонент.

Образец	Начальный квантовый выход, %	Квантовый выход через неделю после изготовления, %
$\text{CsPbBr}_3 + \text{p(MMA-LMA) 25\%}$	61.8	32.8
$\text{CsPbBr}_3 + \text{p(MMA-LMA) 5\%}$	71.1	30.3
$\text{CsPbBr}_3$	65.8	31.0

рассеянию ФЛ и геометрии образца [13]. В качестве образца сравнения использовали ТП на основе чистых ПНК без добавления полимера (табл. 1 и рис. 7). Из приведенных данных видно, что ТП на основе чистых ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$ , в пределах погрешности, демонстрирует значительный спад квантового выхода ФЛ, который в долгосрочном периоде стремится к нулю, свидетельствуя о деградации свойств ПНК, а также об их возможном разрушении. При этом остальные образцы, в пределах погрешности, демонстрируют долгосрочное постоянство квантового выхода ФЛ. Немаловажно отметить, что несмотря на уменьшении интенсивности ФЛ при увеличении массового соотношения  $\text{p(MMA-LMA)}$  в октане (рис. 4), величина квантового выхода ФЛ возрастает. Таким образом, можно заключить, что изготовленные композитные ТП на основе ПНК и сополимера  $\text{p(MMA-LMA)}$ , нанесенные из раствора в октане, обладают большей долгосрочной стабильностью квантового выхода ФЛ, по срав-

нению с ТП на основе чистых ПНК, несмотря на его резкое снижение на начальном этапе.

Предложенный в настоящей работе метод изготовления ТП на основе ПНК, заключающийся в создании композитных образцов ТП из ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$  и сополимера  $\text{p(MMA-LMA)}$  в октане, позволяет создавать высококачественные пленочные слои ПНК со стабильным спектром ФЛ, и, кроме того, демонстрирующие высокую равномерность распределения ПНК в пленке и однородную поверхность слоя. Предложенный метод изготовления ТП на основе ПНК станет полезным для формирования активных слоев гибридных светодиодов. При этом, результаты настоящей работы окажутся востребованными при разработке детекторов медицинского назначения, поскольку ПНК, обладая высоким средним атомным весом, являются перспективной основой для создания сцинтилляционных покрытий детекторов.

**Рис. 7.** Динамика изменения квантового выхода люминесценции тонких пленок состава  $\text{CsPbBr}_3 + \text{p(MMA-LMA)}$  с различными массовыми соотношениями компонент.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был предложен и оптимизирован процесс изготовления тонких пленок на основе ПНК состава  $\text{CsPbBr}_3$ , позволяющий получать ТП с высокой равномерностью пленочного покрытия, и характеризующихся повышенной стабильностью своей фотолюминесценции. Оптимальный результат был достигнут при использовании в качестве инкапсулирующего агента сополимера метилметакрилата и лаурилметакрилата, что позволило улучшить фазовую совместимость гидрофобной поверхности ПНК и полимерной матрицы. Наилучшее качество пленок было достигнуто при изготовлении ТП в форме композита, где ПНК равномерно распределены в объеме полимера, при этом оба компонента были изначально растворены в *n*-октане. Такие композитные пленки были изготовлены методом вращающейся подложки при скорости вращения  $\omega_{\text{вр}} = 2000$  об/мин и времени  $\tau_{\text{вр}} = 60$  с. Полученные в работе результаты, методики и материалы послужат основой для нанесения светоизлучающего активного слоя гибридных светодиодов нового поколения, а также будут использованы как активирующий сцинтилляционный слой в рентгеновских детекторах медицинского назначения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-1413.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Liu R. et al. // *Nanoscale*. 2019. V. 11 (19). P. 9302–9309.
2. Yan W. et al. // *Opt. Express*. 2020. V. 28 (10). P. 15706.
3. Song J. // *Adv. Mater.* 2018. V. 30 (30). P. 1800764.
4. Rainò G. et al. // *Nano Lett.* 2019. V. 19 (6). P. 3648–3653.
5. Shamsi J. et al. // *Chem. Rev.* 2019. V. 119 (5). P. 3296–3348.
6. Chen J. et al. // *Chem. Rev.* 2021. V. 121 (20). P. 12112–12180.
7. Jiang G. et al. // *ACS Nano*. 2019. V. 13 (9). P. 10386–10396.
8. Padilha G. da S. et al. // *Polimeros*. 2017. V. 27 (3). P. 195–200.
9. Chen H. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. V. 10 (34). P. 29076–29082.
10. Zvaizne M. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11 (8). P. 2014.
11. Cheng X. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51 (40). P. 405103.
12. Pica G., Bajoni et al. // *Struct. Dyn.* 2022. V. 9 (1). P. 011101.
13. Elterman P. // *Appl. Opt.* 1970. V. 9 (9). P. 2140.

## Optimization of $\text{CsPbBr}_3$ Perovskite-Based Composite Thin Film Fabrication Processes for Use in New-Generation Light Emission Diodes and Photodetectors

A. A. Knysh<sup>1, \*</sup>, A. A. Tkach<sup>1</sup>, D. Gulevich<sup>1</sup>, I. Nabiev<sup>1, 2</sup>, and P. S. Samokhvalov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

<sup>2</sup>*Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, 51100 France*

\*e-mail: knyshkikai@mail.ru

Received May 30, 2022; revised June 8, 2022; accepted June 13, 2022

**Abstract**— $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals (PNCs) are the focus of recent basic and applied research, with special emphasis on their use in photovoltaic cells, hybrid light-emitting diodes, single-photon sources, basic elements of optical computers, and other optoelectronic devices. The main problem limiting the use of PNCs is their low stability under normal conditions. Development of composite materials where PNCs are embedded in polymer matrices is an approach to solving the problem of the stability of PNCs contacting the atmosphere. Here, we report the results of experiments on designing composite thin films (TFs) consisting of PNCs and modified polymethyl methacrylate (PMMA). Specifically, samples of durable TFs containing  $\text{CsPbBr}_3$  with a high photoluminescence quantum yield have been engineered, optimal parameters (including the spinning time, spinning rate, and concentration) for the spin-coating fabrication of the TFs have been found, and the TFs with a highly homogenous film coating have been obtained. This last factor is an important criterion for the use of PNC–PMMA composite as an active layer in quantum dot light-emitting diodes (QDLEDs). In addition, since PNCs are promising as a basis for the scintillating coating of detectors, whose performance depends on the homogeneity of the luminophore distribution within the scintillator (e.g., a CCD array), the results of this study could be used in developing X-ray detectors for medical applications.

**Keywords:** luminescence, perovskite nanocrystals,  $\text{CsPbBr}_3$ , thin films, composite materials, spin-coating method, quantum yield