

Фотолюминесценция нанокристаллов перовскитов CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) и твердых растворов на их основе

© Л.Б. Матюшкин, В.А. Мошников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: leva.matyushkin@gmail.com

(Получена 4 апреля 2017 г. Принята к печати 5 апреля 2017 г.)

Рассмотрены синтез, структурные и фотолюминесцентные свойства нанокристаллов с естественной ограниченной системой „цезий–свинец–галоген“ кристаллической структуры типа перовскит. Показана возможность непрерывной перестройки максимума спектра фотолюминесценции нанокристаллов в диапазоне длин волн 400–700 нм. Исследованы особенности образования непрерывных рядов твердых растворов CsPb(Cl_{1-x}Br_x)₃ и CsPb(Br_{1-x}I_x)₃ за счет постростовой обработки нанокристаллов CsPbBr₃ в результате анионного замещения при комнатной температуре. Соответствующий диапазон перестройки максимума спектра фотолюминесценции составил 410–690 нм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.10.45018.8575

1. Введение

Коэффициент полезного действия однокаскадных солнечных элементов на основе органо-неорганических перовскитов стремительно вырос с 3.8% в 2009 г. [1] до более 22% в 2016 г. [2]. Кроме того, низкоразмерные формы перовскитов могут использоваться как активные слои светоизлучающих устройств [3]. Однако главной проблемой практического применения подобных материалов остается температурная нестабильность, приводящая к быстрой деградации характеристик устройств на их основе [4]. Другие технологические трудности создания электронных структур обусловлены возможностью депротонирования органической группы гибридных перовскитов материалом примыкающего транспортного слоя, например оксида цинка [5].

На рис. 1 представлена кристаллическая решетка перовскита с общей формулой ABX₃. В гибридном перовските CH₃NH₃PbI₃ позицию A занимает положительно заряженная группа метиламмония CH₃NH₃⁺, B — ион свинца Pb²⁺, X — ион йода I⁻ или, в общем случае, ион другого галогена. Для повышения температурной и химической стабильности структуры органическую группу в позиции A можно заменить на крупный катион, например цезий Cs⁺ [6], перейдя, таким образом, к неорганическому материалу.

Для оценки устойчивости структуры в качестве критерия используют фактор соответствия Гольдшмидта:

$$t = \frac{r_A + r_B}{\sqrt{2}(r_B + r_X)},$$

где r_A , r_B , r_X — ионные радиусы. Из геометрии решетки (рис. 1) следует, что в идеальном кубическом кристалле $t = 1$. В диапазоне $t = 0.71–0.9$, к которому относятся галогениды свинца–цезия (см. таблицу, данные ионных радиусов взяты из [7]), возможно наблюдение других кристаллографических симметрий: кроме кубического перовскита в системе „цезий–свинец–галоген“ также обнаруживаются тетрагональная, орторомбическая и мо-

ноклиная сингонии. Этот факт отмечен еще в ранних работах Мёллера [8] при синтезе первых кристаллов CsPbCl₃ и CsPbBr₃. Долгое время исследование подобных материалов не представляло существенного практического интереса. Первые наблюдения CsPbX₃ в форме нанокристаллов, по всей видимости, связаны с исследованием квантово-размерных включений в ионных матрицах CsX : Pb и PbX₂ : Cs [9–11]. Для промышленного получения нанокристаллов CsPbX₃ перспективны методы коллоидной химии. В 2015 г. группой М.В. Коваленко была продемонстрирована возможность коллоидного синтеза квантовых точек CsPbX₃ [12].

Тройные системы Cs–Pb–X еще недостаточно изучены с позиций физико-химического анализа. Рассмотрим некоторые особенности тройных систем Cs–Pb–X методом триангуляции (рис. 1). Предварительно отложим конфигуративные точки бинарных соединений на соответствующих сторонах треугольника Гиббса. Для системы Cs–Pb подтверждено существование ряда интерметаллических соединений [13]. Точке конгруэнтного плавления (653°C) соответствует экваториальный плюмбат цезия CsPb, остальные указанные на треугольнике соединения — перитектические. Относительно двухкомпонентных систем „галоген–металл“ известны следующие галогениды цезия и свинца (II): CsCl, CsBr, CsI, PbCl₂, PbBr₂, PbI₂. Хлорид свинца (IV) PbCl₄ при малейшем нагреве распадается до PbCl₂, а PbBr₄ и PbI₄ не существуют. Бром и йод образуют координационные полигалогенидные соединения CsBr₃, CsI₃, CsI₄, лигандный координационный ион Cl₃⁻ неустойчив и его соединения с цезием неизвестны. Таким образом, ни для

Материал	r_A , пм	r_B , пм	r_X , пм	t
CsPbCl ₃			181	0.820
CsPbBr ₃	167	119	196	0.815
CsPbI ₃			220	0.807

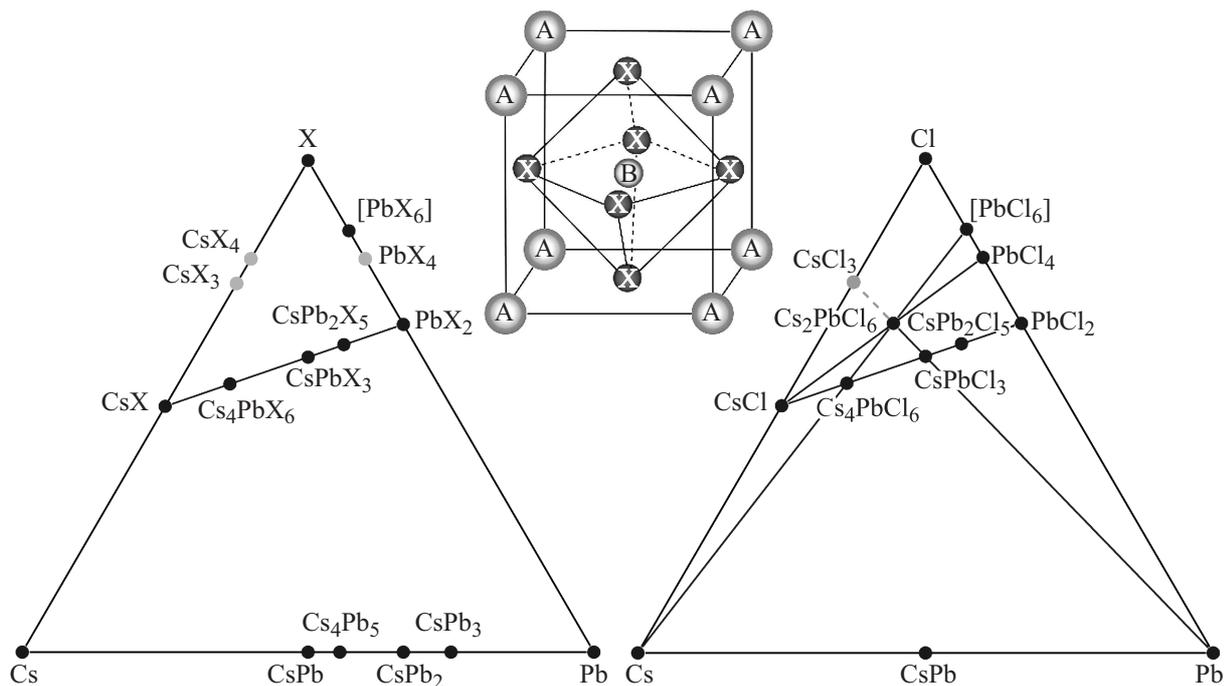


Рис. 1. Кристаллическая решетка типа перовскит ABX_3 и основные соединения трехкомпонентных систем $Cs-Pb-X$ на треугольнике Гиббса, частичная триангуляция системы на примере $CsPbCl_3$.

одного из рассматриваемых по отдельности галогенов в триангуляции не имеется разрез CsX_3-PbX_4 или CsX_4-PbX_4 , а основным разрезом, присутствующим во всех системах, является $CsX-PbX_2$. На этом разрезе лежит конфигуративная точка рассматриваемых перовскитов $CsPbX_3$, и, кроме того, точки термодинамически менее устойчивых соединений Cs_4PbX_6 и Cs_2PbX_5 .

Заметим, что учет полигалогенидов CsX_n важен относительно роста кристаллов в растворах и для создания на основе тройных соединений ячеек Гретцеля [14], а также их твердотельных аналогов. Фактически полигалогениды цезия являются координационными соединениями. К таковым относится и структурная единица $[PbX_6]^{4-}$, геометрически представляющая октаэдр из комплексообразующего иона свинца Pb^{2+} , координированного шестью атомами галогена (рис. 1). Этот нехарактерный для классического рассмотрения триангуляции элемент может играть решающую роль при росте кристаллов из растворов. Кроме того, октаэдр $[PbX_6]^{4-}$ отвечает за эффективное поглощение света и люминесценцию в материалах [15] — дисперсионные кривые, определяющие энергетический зазор материала, соответствуют электронным состояниям свинца и галогена [16].

Сравнивая треугольники Гиббса на рис. 1, можно видеть, что гипотетический разрез, выходящий из точки Cs и проходящий через конфигуративные точки, соответствующие соединениям Cs_4PbCl_6 и Cs_2PbCl_6 , попадает на конфигуративную точку $PbCl_6$. На основе этого факта может быть предложен низкотемпературный метод получения твердых растворов на основе перовски-

тов. Конфигуративная точка PbX_6 свидетельствует о том, что при использовании жидкостных методов происходит предварительная сборка структурных элементов в виде октаэдров $[PbX_6]^{4-}$, которые могут включать ионы галогена как одного, так и нескольких типов. В присутствии ионов Cs^+ происходит сборка структуры в кристаллическую решетку перовскита. Такой рост предполагает возможность наблюдения процессов замещения одного типа галогенов на другой при сравнительно низких температурах. В работе показывается возможность тонкой настройки спектров фотолюминесценции в результате процесса анионного замещения при комнатной температуре.

2. Методика эксперимента

Для синтеза нанокристаллов $CsPbX_3$ использован коллоидный метод горячей инъекции, описанный нами ранее для различных соединений $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ [17] и $A^{III}C_2^{VI}$ [18]. В качестве прекурсоров выступали олеат цезия и галогенид свинца PbX_2 , находящиеся в дисперсионной среде с высокой температурой кипения (октадецен).

Прекурсор цезия готовился под атмосферой высокочистого азота нагревом карбоната цезия при $150^\circ C$ в растворе олеиновой кислоты в дисперсионной среде до полного растворения соли. Прекурсор источника галогенида свинца готовился аналогично нагревом соли PbX_2 в дисперсионной среде в присутствии небольшого количества олеиновой кислоты и олеиламина в пропорции 1 : 1 при непрерывном перемешивании. Для по-

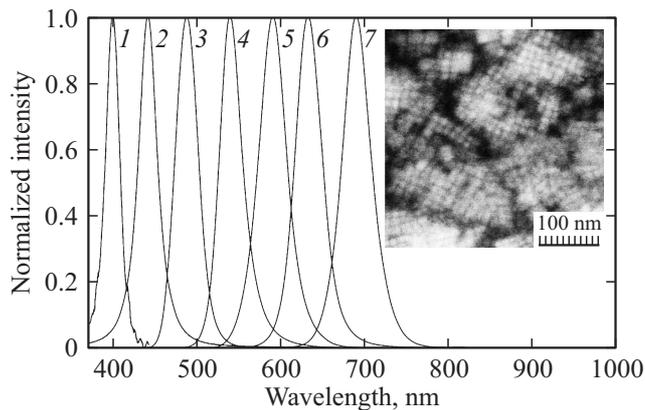


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции нанокристаллов $CsPbX_3$, синтезированных при $170^\circ C$: 1 — $CsPbCl_3$; 2 — $CsPb(Cl_{1-x}Br_x)_3$, $x = 0.5$; 3 — $CsPbBr_3$ (приведено изображение сканирующей электронной микроскопии), 4 — $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$, $x = 0.33$; 5 — $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$, $x = 0.5$; 6 — $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$, $x = 0.67$; 7 — $CsPbI_3$.

лучения твердых растворов использовались смешанные в заданной пропорции прекурсоры PbX_2 , полученные из солей соответствующих галогенидов. В полученный раствор при $170^\circ C$ проводилась инжекция источника цезия. Локальное концентрационное пересыщение мономеров во всем объеме раствора приводит к мгновенной нуклеации частиц и их последующему росту. Образование нанокристаллов происходит в течение нескольких первых секунд после инжекции.

После синтеза коллоидные растворы остужались до комнатной температуры, очищались центрифугированием в присутствии осадителя — изопропилового спирта, после чего порошки частиц редиспергировались в неполярных легколетучих растворителях — толуоле или гексане. Поверхность получаемых нанокристаллов в результате синтеза покрыта молекулами олеиламина и олеиновой кислотой, препятствующими агрегации частиц в процессе очистки и хранения.

Спектры оптической плотности образцов измерялись на спектрофотометре ПЭ-5400 УФ (190–1000 нм), спектры фотолюминесценции — при помощи спектрофлуориметра на основе монохроматора ЛОМО МДР-206 и кремниевого фотодиода. Возбуждение фотолюминесценции (ФЛ) осуществлялось маломощным (10 мВт) полупроводниковым лазером с длиной волны 405 нм. Все оптические измерения проводились при комнатной температуре.

Рентгенофазовый анализ осуществлялся на порошке нанокристаллов при помощи рентгенодифрактометра ДРОН-3 с трубкой $Cu-K\alpha$.

Электронная микроскопия образцов осуществлялась на микроскопе MIRA TESCAN при ускоряющем напряжении 10 кВ. Образцы для микроскопии представляли нанокристаллы, осажденные из коллоидного раствора на кремниевую пластину.

3. Экспериментальные результаты

В результате предварительных экспериментов было определено, что размер нанокристаллов $CsPbX_3$ определяется, в отличие от коллоидного синтеза халькогенидов металлов [17], в большей мере температурой синтеза, чем временем роста. В работе рассматривается синтез при $170^\circ C$, который в случае бромида приводит к образованию монодисперсных кубических кристаллов с длиной ребра 13 нм.

Так как процедура синтеза нанокристаллов $CsPbX_3$ идентична для хлорида, бромида и иодида, перестраивать положение полосы люминесценции технологически удобнее посредством изменения состава нанокристаллов, чем размерами частиц. На рис. 2 представлены спектры ФЛ нанокристаллов различного состава, полученных при температуре синтеза $170^\circ C$. Материалы обладают люминесценцией, наблюдаемой визуально даже при возбуждении естественным освещением и яркостью люминесценции на уровне органических красителей (квантовая эффективность наночастиц $CsPbBr_3 \sim 90\%$). Полуширина полосы ФЛ плавно уменьшается от $CsPbI_3$ к $CsPbCl_3$. Образцы проявляют люминесценцию как в виде коллоидных растворов, так и твердых пленок.

Яркая люминесценция нанокристаллов $CsPbX_3$ в отсутствие неорганических оболочек показывает, что в сравнении с коллоидными квантовыми точками халькогенидов кадмия [17] в $CsPbX_3$ не создаются поверхностные ловушечные состояния, уровни которых лежали бы в запрещенной зоне полупроводника. Ширина полос ФЛ нанокристаллов соединений $CsPbX_3$ и твердых растворов на их основе выгодно отличается от нанокристаллов тройных соединений $A^I B^III C_2^{VI}$ ($CuInS_2$, $AgInSe_2$ и т.п.) и соответствующих четверных твердых растворов. Ионный характер связей в $CsPbX_3$, отличие в размерах и заряде ионов Cs^+ и Pb^{2+} (см. таблицу), видимо, обуславливает стехиометрический состав и упорядоченность в расположении атомов. В то же время нанокристаллы многокомпонентных халькогенидов металлов $A^I B^III C_2^{VI}$ демонстрируют существенную неоднородность в распределении катионов и анионов, приводящую к высокой плотности донорно-акцепторных состояний и широкополосной люминесценции.

В спектрах поглощения нанокристаллов $CsPbX_3$ (рис. 3) наблюдаются особенности, соответствующие экситонным состояниям, наиболее ярко проявляющиеся в нанокристаллах $CsPbCl_3$ [12]. По краю поглощения для различных материалов можно видеть, что в сравнении с хорошо исследованными в XX в. диэлектрическими оксидными перовскитами [19] галлоидные перовскиты свинца—цезия являются полупроводниками.

Методом порошковой рентгенодифрактометрии определено, что среди различных кристаллических модификаций реализуется кубическая структура перовскита (рис. 4). Источниками уширения дифракционных пиков являются малые размеры нанокристаллов и микродеформации [20]. Учитывая влияние обоих факторов, в первом

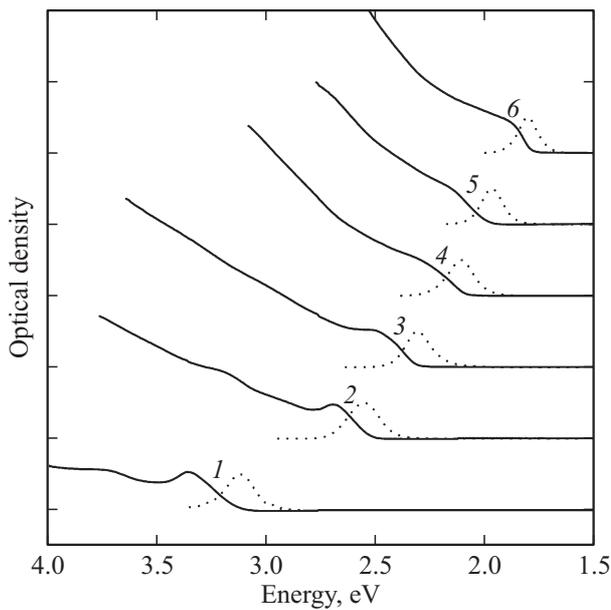


Рис. 3. Спектры оптической плотности нанокристаллов CsPbX_3 , пунктирами соотнесены спектры фотолуминесценции: 1 — CsPbCl_3 ; 2 — CsPbBr_3 ; 3 — $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$, $x = 0.33$; 4 — $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$, $x = 0.5$; 5 — $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$, $x = 0.67$; 6 — CsPbI_3 .

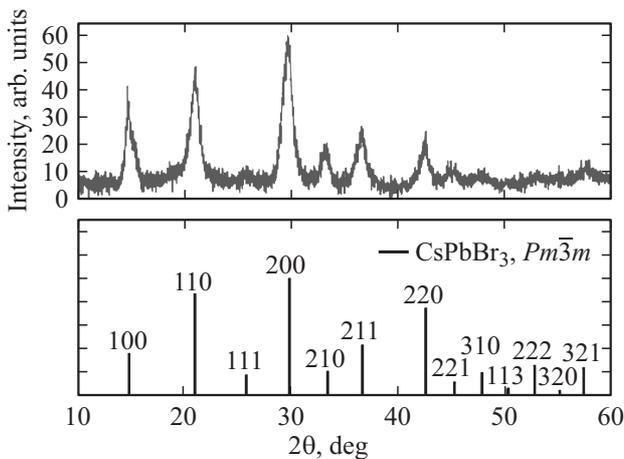


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ порошка нанокристаллов галогенидов свинца цезия на примере CsPbBr_3 .

приближении можно считать, что интегральная ширина результирующего пика β определяется как сумма:

$$\beta = \beta_S + \beta_D,$$

где β_S и β_D — полуширины рефлексов, обусловленные эффектами размера и микродеформаций в отдельности:

$$\beta_S = \frac{\lambda}{D \cos \theta}, \quad \beta_D = 4\varepsilon \cdot \text{tg} \theta,$$

λ — длина волны источника рентгеновского излучения ($\text{Cu-K}\alpha$), D — средний размер нанокристаллов,

ε — среднее значение величины микродеформаций межплоскостного расстояния ($\Delta d/d$).

Разделить эффекты можно, основываясь на различной зависимости интегральной полуширины пиков от угла отражения. Считая, что и функция уширения за счет размеров и функция уширения за счет микроискажений решетки являются функциями Лоренца (для гауссовых функций используются квадратичные величины), рассмотрим зависимость $\beta \cos \theta$ от $\sin \theta$:

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta.$$

Наклон линейной зависимости дает величину 4ε , а пересечение с осью ординат — величину λ/D . Найденные приближенные значения соответствуют $D \approx 10$ нм, $\varepsilon = 0.5\text{--}2\%$. Имеющиеся данные, к сожалению, не позволяют достоверно определить степень анизотропии микронапряжений. Средний размер, получаемый из данных рентгенофазового анализа, соотносится с данными электронной микроскопии (рис. 2, фотография на вставке), показывающей, что система представляет кубические нанокристаллы с длиной грани 13 нм, имеющие тенденцию при осаждении упорядочиваться со стыковой грань к грани (100). Упорядочению нанокристаллов способствует малая дисперсия размеров. Зазор между нанокристаллами обусловлен стабилизирующими молекулами олеиламина и олеиновой кислоты. В сравнении с квантовыми точками CdSe/ZnS , обладающими обычно сферической формой, в кубической геометрии нанокристаллов CsPbX_3 можно видеть преимущество относительно переноса носителей заряда от одного кристалла к другому — вместо точечного контакта шарообразных наночастиц, контакт плоскостей „куб к кубу“ обеспечивает лучшие условия транспорта.

Одной из особенностей галогидных перовскитов является быстрый анионный обмен (anion exchange) [12] — образование твердых растворов за счет контакта галогенида свинца—цезия и источника другого галогена. В случае рассматриваемых перовскитов процесс происходит при нормальных условиях. Для исследования динамики анионного смешения концентрированный, предварительно очищенный от продуктов реакции, коллоидный раствор наночастиц CsPbBr_3 был смешан с соизмеримым количеством прекурсора PbI_2 . После смешивания непрерывно измерялась ФЛ раствора. Визуально люминесценция в течение 1 ч сменилась с зеленого на красный цвет. На рис. 5 представлена динамика изменения спектра ФЛ, энергетического положения максимума ФЛ и полуширины линии (FWHM). Зависимости можно разбить на два участка с точкой перегиба при одном и том же времени 120 с (при уменьшении концентрации частиц и прекурсора противоположного галогенида это время уменьшается).

1) На первом (быстром) этапе происходит резкое уменьшение среднего значения энергии испускаемых фотонов и одновременное резкое увеличение полуширины сигнала ФЛ.

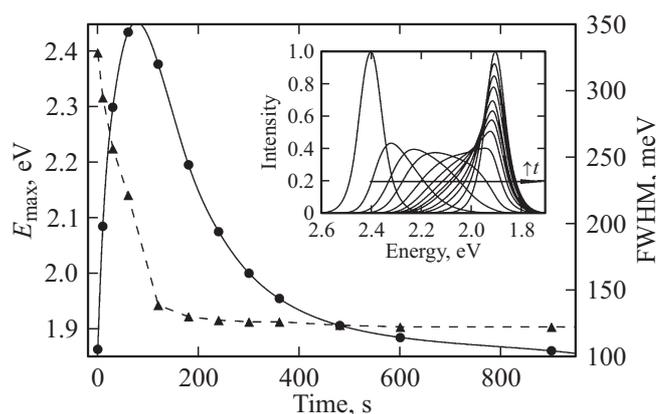


Рис. 5. Динамика изменения спектров фотолюминесценции в процессе анионного смешения Br–I: треугольники — временная зависимость энергии соответствующей максимальной интенсивности ФЛ, точки — временная зависимость полуширины линии ФЛ. На вставке — перестройка спектра люминесценции с течением времени в результате анионного замещения.

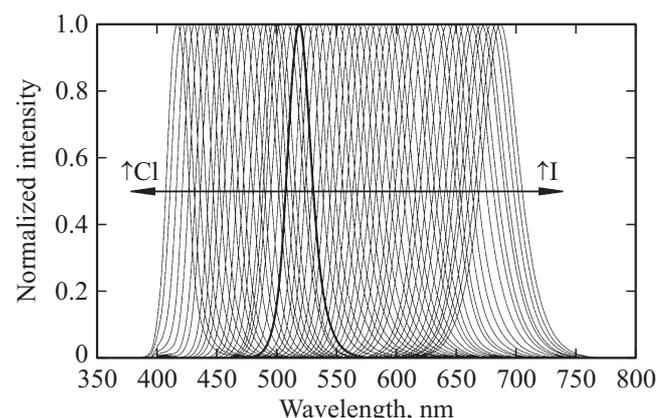


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции серии образцов $CsPb(Cl_{1-x}Br_x)_3$ и $CsPb(Br_{1-x}I_x)_3$, полученных в результате анионного замещения.

2) На втором этапе энергия эмиссии медленно уменьшается, но уже с другой скоростью, а характер изменения полуширины меняется на обратный и полуширина быстро падает до значений, близких к исходным.

Результаты можно описать следующей простой моделью: на первом этапе превалирует диффузия ионов замещающего галогена в растворе до поверхности нанокристалла, а на втором этапе — диффузия ионов по твердой фазе нанокристаллов. Пренебрегая малым временем быстрой диффузии в жидкости, грубая оценка коэффициента диффузии иона галогена в нанокристалле дает порядок 10^{-15} cm^2/c .

На рис. 6 показан практический результат перестройки спектров ФЛ для 60 образцов при постсинтетической обработке растворов $CsPbBr_3$ в случае различного добавления исходных прекурсоров: как источника иода, так

и источника хлора. Показана непрерывная перестройка в видимом диапазоне с шагом 5 нм.

4. Заключение

Таким образом, в результате работы показана перестройка спектра фотолюминесценции нанокристаллов галогенидов свинца–цезия во всем видимом диапазоне, как в результате синтеза при соответствующем соотношении исходных компонентов, так и при постростовой обработке.

Описанный эффект анионного замещения обладает как определенными технологическими достоинствами, так и негативными последствиями. С одной стороны, можно синтезировать материал определенного состава и постсинтетически при комнатной температуре изменять величину энергетического зазора или использовать эффект анионного замещения как чувствительный метод определения концентрации галогенов в неполярных растворах. С другой стороны, контакт слоев, состоящих из различных галогенидов, приводит к диффузионному усреднению состава.

Синтез материалов для солнечной энергетики и оптоэлектроники может производиться в промышленных масштабах при помощи поточного реактора [21,22]. Получение кубических квантовых точек также представляет интерес для создания различных эталонных образцов микроскопических измерений, альтернативным методом оценки размеров которых будут служить оптические измерения.

Важное физическое отличие неорганических перовскитов $CsPbX_3$ от гибридных материалов типа $CH_3NH_3PbX_3$ состоит в том, что Cs^+ является центрально-симметричной частицей, в то время как $CH_3NH_3^+$ — нескомпенсированный диполь, взаимодействующий с распространяющимися по кристаллической решетке свободными носителями заряда, что может приводить к различным временам жизни носителей заряда и частотным характеристикам сравниваемых материалов. Эти вопросы представляются важными для исследования нового класса ионных полупроводников галоидных перовскитов и требуют дополнительного рассмотрения.

Авторы выражают благодарность С.А. Кирилловой за помощь в рентгенофазовом анализе порошков и П.А. Сомову за исследование образцов методами сканирующей электронной микроскопии.

Список литературы

- [1] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka. *J. Am. Chem. Soc.*, **131** (17), 6050 (2009).
- [2] <http://www.nrel.gov>. The National Renewable Energy Laboratory's (NREL) URL: (10.12.2016)
- [3] B.R. Sutherland, E.H. Sargent. *Nature Photonics*, **10** (5), 295 (2016).
- [4] G. Niu, X. Guo, L. Wang. *J. Mat. Chem. A*, **3** (17), 8970 (2015).

- [5] J. Yang, B.D. Siempelkamp, E. Mosconi, F. De Angelis, T.L. Kelly. *Chem. Mater.*, **27** (12), 4229 (2015).
- [6] R.E. Beal, D.J. Slotcavage, T. Leijtens, A.R. Bowering, R.A. Belisle, W.H. Nguyen, G.F. Burkhard, E.T. Hoke, M.D. McGehee. *J. Phys. Chem. Lett.*, **7** (5), 746 (2016).
- [7] R.D. Shannon. *Acta Cryst.*, **A32**, 751 (1976).
- [8] C.K. Moller. *Nature*, **182** (4647), 1436 (1958).
- [9] M. Nikl, K. Nitsch, K. Polák, E. Mihókova, S. Zazubovich, G.P. Pazzi, P. Fabeni, L. Salvini, R. Aceves, M. Barbosa-Flores, R. Perez Salas, M. Gurioli, A. Scacco. *J. Luminesc.*, **72**, 377 (1997).
- [10] V. Babin, P. Fabeni, M. Nikl, G.P. Pazzi, I. Sildos, N. Zazubovich, S. Zazubovich. *Chem. Phys. Lett.*, **314** (1), 31 (1999).
- [11] П.Г. Баранов, Н.Г. Романов, А.Г. Бадалян, Д.О. Толмачев, В.Л. Преображенский. *Письма ЖЭТФ*, **82** (11), 822 (2005).
- [12] 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** (6), 3692 (2015).
- [13] Н.П. Лякишев. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* (М., Машиностроение, 1997) с. 221.
- [14] B. O'regan, M. Gratzel. *Nature*, **353** (6346), 737 (1991).
- [15] A. Bohun, J. Dolejší, Č. Barta. *Czechoslovak J. Phys.*, **20** (7), 03 (1970).
- [16] V.K. Ravi, G.B. Markad, A. Nag. *ACS Energy Lett.*, **1** (4), 665 (2016).
- [17] *Наночастицы, наносистемы и их применение*. Ч. 1. *Коллоидные квантовые точки*, под ред. В.А. Мошникова, О.А. Александровой (Уфа, Аэтерна, 2015).
- [18] Д.С. Мазинг, А.И. Шульга, Л.Б. Матюшкин, О.А. Александрова, В.А. Мошников. *Оптика и спектроскопия*, **122** (1), 122 (2017). In English: D.S. Mazing, A.I. Shul'ga, L.B. Matyushkin, O.A. Aleksandrova, V.A. Moshnikov. *Opt. Spectrosc.*, **122** (1), 110 (2017).
- [19] P. Granger, V.I. Parvulescu, S. Kaliaguine, W. Prellier. *Perovskites and Related Mixed Oxides: Concepts and Applications* (Wiley, 2016).
- [20] С.В. Цыбуля, С.В. Черепанова. *Введение в структурный анализ нанокристаллов* (Новосибирск, НГУ, 2009).
- [21] Л.Б. Матюшкин, О.А. Рыжов, О.А. Александрова, В.А. Мошников. *ФТП*, **50** (6), 859 (2016). In English: L.B. Matyushkin, O.A. Ryzhov, O.A. Aleksandrova, V.A. Moshnikov. *Semiconductors*, **50** (6), 844 (2016).
- [22] О.А. Рыжов, Л.Б. Матюшкин, В.А. Мошников, О.А. Александрова. Патент Rus 166323 от 24.12.2015.

Редактор Г.А. Оганесян

Photoluminescence of perovskite CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) nanocrystals

L.B. Matyushkin, V.A. Moshnikov

St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract The synthesis, structural and photoluminescent properties of cesium lead halide cube-shaped perovskite nanocrystals with different composition are described. The possibility of the photoluminescence spectrum maximum tuning in the wavelength range of 400–700 nm is shown. The effect of CsPb(Cl_{1-x}Br_x)₃ and CsPb(Br_{1-x}I_x)₃ nanocrystals postsynthetic anion mixing at room temperature is also investigated.