

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-08-111-119

УДК 535.343.2: 535.372: 666.22

## Технология создания композитов на основе полимеров и нанокристаллов перовскитов для применений в качестве преобразователей излучения датчика искры

Илья Михайлович Плешанов<sup>1</sup>✉, Дмитрий Вячеславович Марасанов<sup>2</sup>,  
Лев Евгеньевич Зеленков<sup>3</sup>, Антон Орестович Белорус<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова-Ленина, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>[impleshanov@itmo.ru](mailto:impleshanov@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6834-2427>

<sup>2</sup>[dmitriymarasanov@bk.ru](mailto:dmitriymarasanov@bk.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>

<sup>3</sup>[lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru](mailto:lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6387-7553>

<sup>4</sup>[mop\\_92@mail.ru](mailto:mop_92@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6752-8796>

### Аннотация

**Предмет исследования.** В работе представлена технология получения нанокомпозитных полимерных структур (плёнок) и их применение в люминесцентных датчиках искры со спектральным преобразователем излучения. В качестве преобразователя излучения искры в видимую область спектра выступают нанокристаллы неорганических перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$ , внедрённые методом инкапсулирования в полимерную структуру полидиметилсилоксана. **Целью** работы является разработка технологии получения композитных структур на основе полимера полидиметилсилоксана PDMS и нанокристаллов перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$  для защиты нанокристаллов перовскитов от деградации и демонстрация принципиальной возможности использования композитных материалов в качестве преобразователей излучения волоконно-оптического датчика искры. **Метод.** В качестве методики создания композитной структуры полидиметилсилоксана- $\text{CsPbBr}_3$  использовался метод инкапсулирования нанокристаллов в полимерную матрицу. Расчёт эффективности оптической системы производился с помощью численного моделирования. **Основные результаты.** Проанализированы спектры люминесценции, поглощения и квантовый выход синтезируемых в работе неорганических перовскитов и композитных структур на основе перовскитных нанокристаллов состава  $\text{CsPbBr}_3$  и полидиметилсилоксана. Исследованы деградационные свойства композитных структур в течение 10 месяцев. По спектрам люминесценции композитных структур на основе нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  и полидиметилсилоксана были рассчитаны показатели полной ширины на уровне половины высоты спектра люминесценции. Произведено моделирование оптической системы датчика, рассчитана оптическая эффективность и показана принципиальная возможность использования композитной структуры для применения в качестве преобразователей излучения оптических датчиков искры. **Практическая значимость.** Исследуемые композитные материалы на основе нанокристаллов перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  и полидиметилсилоксана, полученные с помощью разрабатываемой технологии, могут применяться в качестве преобразователей излучения в позиционно-чувствительных волоконно-оптических датчиках искры, а также в различных оптических и оптоэлектронных устройствах.

**Ключевые слова:** полимеры, композитный материал, полидиметилсилоксан, неорганические перовскиты, люминесценция, искра, волоконно-оптические датчики, преобразователи излучения

**Ссылка для цитирования:** Плешанов И.М., Марасанов Д.В., Зеленков Л.Е., Белорус А.О. Технология создания композитов на основе полимеров и нанокристаллов перовскитов для применения в качестве преобразователей излучения датчика искры // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 8. С. 111–119. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-111-119>

Коды OCIS: 060.2380, 230.0230, 160.2540.

## Synthesis technology of composites based on polymers and perovskite nanocrystals for application as radiation converter of a spark sensor

ILYA M. PLESHANOV<sup>1✉</sup>, DMITRIY V. MARASANOV<sup>2</sup>,  
LEV E. ZELENKOV<sup>3</sup>, ANTON O. BELORUS<sup>4</sup>

<sup>1, 2</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>[impleshanov@itmo.ru](mailto:impleshanov@itmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6834-2427>

<sup>2</sup>[dmitriymarasanov@bk.ru](mailto:dmitriymarasanov@bk.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8480-2016>

<sup>3</sup>[lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru](mailto:lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6387-7553>

<sup>4</sup>[mop\\_92@mail.ru](mailto:mop_92@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6752-8796>

### Abstract

**Subject of study.** The paper presents a technology for obtaining nanocomposite polymer structures (films) and their application in luminescent spark sensors with a spectral radiation converter. CsPbBr<sub>3</sub> inorganic perovskite nanocrystals introduced by encapsulation into the polymer structure of polydimethylsiloxane act as a converter of the spark radiation into the visible region of the spectrum. **The aim of this work** is to develop a technology for obtaining the composite structures based on polydimethylsiloxane polymer and CsPbBr<sub>3</sub> perovskite nanocrystals to protect perovskite nanocrystals from degradation and to show the fundamental possibility of using the composite materials as radiation converters of the fiber-optic spark sensor. **Method.** The method of encapsulating nanocrystals in a polymer structure was used as a technique for creating the polydimethylsiloxane-CsPbBr<sub>3</sub> composite structure. The efficiency of the optical system was calculated using numerical simulation. **Main results.** The luminescence, absorption and quantum yield spectra of inorganic perovskites and composite structures based on inorganic CsPbBr<sub>3</sub> and polydimethylsiloxane perovskites are analyzed. The degradation properties of the composite structure were studied for 10 months. The full width at half maximum characteristics for the luminescence spectra of composite structures based on CsPbBr<sub>3</sub> and polydimethylsiloxane perovskite nanocrystals have been calculated. The modeling of optic sensor system has been carried out, the optical efficiency of using the composite structure has been calculated, and the fundamental possibility of using it for application as radiation converters of optical spark sensors has been shown. **Practical significance.** The studied composite materials based on CsPbBr<sub>3</sub> and polydimethylsiloxane perovskite nanocrystals obtained by means of the developed technology can be used as radiation converters in position-sensitive fiber-optic spark sensors, as well as in various other optical and optoelectronic devices.

**Keywords:** polymers, composite material, polydimethylsiloxane, perovskite nanocrystals, luminescence, spark, fiber-optic sensors, radiation converters

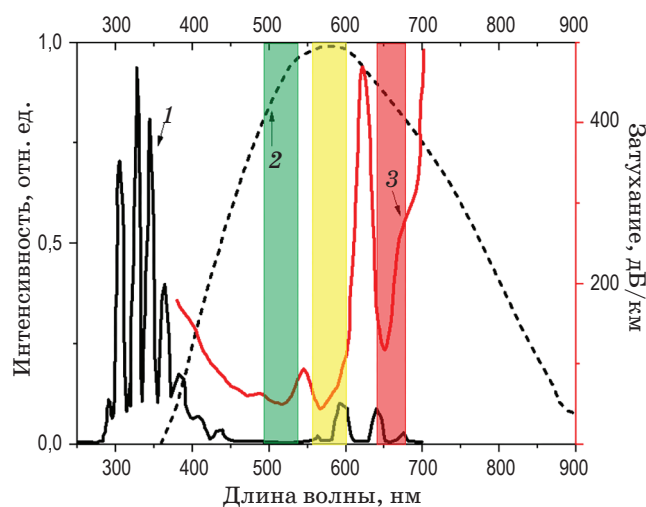
**For citation:** Pleshanov I.M., Marasanov D.V., Zelenkov L.E., Belorus A.O. Synthesis technology of composites based on polymers and perovskite nanocrystals for application as radiation converter of a spark sensor [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 8. P. 111–119. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-111-119>

OCIS codes: 060.2380, 230.0230, 160.2540.

## ВВЕДЕНИЕ

Детектирование электрической искры является важным направлением в обеспечении пожарной безопасности на различных сложных и уязвимых к возгоранию объектах. Своевременное предупреждение и обнаружение точных координат появления электрической искры способствует быстрому реагированию специалистов для устранения опасных ситуаций на различных объектах. Одним из методов обнаружения может выступать оптический метод. Преимуществами данного метода являются его быстродействие, высокая эффективность и чувствительность. Для обнаружения точных координат искры предложена принципиальная схема датчика [1, 2]. Такой датчик может определять положение искры по одной или двум координатам в зависимости от положения передающих оптических волокон. Одним из основных элементов предлагаемого датчика искрения является преобразователь излучения. Он служит для преобразования коротковолнового и ультрафиолетового излучения от искры в видимую область спектра. Преобразователь выступает в качестве чувствительного элемента позиционно-чувствительного волоконно-оптического датчика искры [1]. На сегодняшний день в качестве преобразователей искровых датчиков предлагаются различные люминесцентные стёкла [3–8]. Такие стёкла обладают высоким показателем FWHM (The full width at half maximum — полная ширина на уровне половины высоты) — более 100 нм. Благодаря разрабатываемой в работе технологии, существует принципиальная возможность обеспечить концентрацию всего преобразованного излучения в одной узкой области видимого спектра, что позволит улучшить характеристики чувствительности датчика искры, благодаря оптимальному согласованию элементов устройства.

На рис. 1 приведены спектры излучения электрической искры, относительная чувствительность поглощения кремневого фотоприёмника и затухание сигнала, передаваемого в полимерных оптических волокнах [9]. Излучение электрической искры находится в ультрафиолетовой и коротковолновой области спектра. Фотоприёмники, которые детектируют излучение в коротковолновой и ультрафиолетовой области спектра, имеют высокую



**Рис. 1.** Спектральная характеристика электрического разряда и искры в воздухе, чувствительность поглощения кремневого фотоприёмника и затухание сигнала в полимерном оптическом волокне

**Fig. 1.** Spectral characteristics of an electric discharge and a spark in air, the absorption sensitivity of a silicon photodetector, and signal attenuation in a polymer optical fiber

стоимость и низкую надёжность. Оптические волокна, которые могут передавать излучение в коротковолновой и ультрафиолетовой области спектра, имеют высокую стоимость и высокий уровень потерь. Для использования в датчике дешёвых кремневых фотоприёмников и оптических волокон необходимо преобразовать излучение искры в видимую область спектра.

Оптимальное согласование максимума чувствительности фотоприёмника и низких потерь затухания излучения в оптическом волокне обеспечивает увеличение эффективности работы датчика искры и определяется тремя областями преобразования излучения. Первая область — от 490 до 535 нм, вторая область — от 555 до 600 нм, третья область — от 640 до 675 нм.

Детектирование преобразователями искрового излучения в широком диапазоне длин волн от 300 до 450 нм обеспечивается важной спектральной характеристикой, которой является поглощение. Нанокристаллы перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$ , которые могут использоваться в качестве материала для преобразователей излучения, позволяют обеспечить согласование

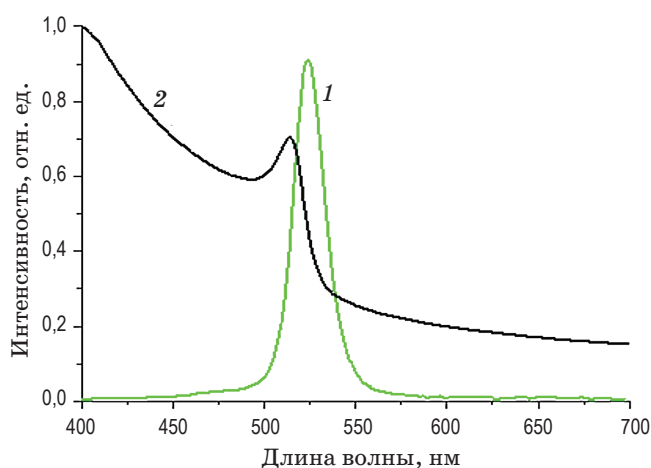
элементов датчика искры и поглощение в необходимом диапазоне длин волн от 300 до 450 нм. Однако нанокристаллы перовскитов по-прежнему подвержены врождённым дефектам структурной деградации и плохой стабильности. Целью работы является разработка метода получения композитных структур на основе полимера полидиметилсилоксана и нанокристаллов перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$  для защиты нанокристаллов перовскитов от деградации и демонстрация принципиальной возможности использования композитных материалов в качестве преобразователей излучения волоконно-оптического датчика искры.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Нанокристаллы перовскитов были получены методом горячей инъекции как описано в работе [10]. В работе методика получения композитных структур (композитных плёнок) на основе полидиметилсилоксана и нанокристаллов перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$  проводилась следующим образом. На первом этапе осуществлялось добавления 100 мкл толуольного раствора нанокристаллов неорганических перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  с концентрацией 10 мг/мл к 1 мл Sylgard 182 компонента А (основа). Далее после тщательного перемешивания к получившемуся раствору добавляли 100 мкл

Sylgard 182 компонента В (отвердитель) и тщательно перемешивали эту смесь. Формирование композитной плёнки осуществлялось с помощью метода спин-покрытие (spincoating) следующим образом: 500 мкл композитного коллоидного раствора  $\text{PDMS-CsPbBr}_3$  капали на подложку из кварцевого стекла, установленную в устройство для центрифугирования, и использовали скорость 500 и 1000 об/мин для равномерного распределения раствора на подложке. После этого кварцевая подложка с нанесённой равномерно плёнкой раствора  $\text{PDMS-CsPbBr}_3$  помещалась в печь с температурой 50 °С до полного отвердевания. Время отвердевания плёнки составляет 1 час. Для формирования композитной структуры использовались формы в виде пластин различного размера. Такие формы заполнялись полученным раствором и помещались в печь с температурой 50 °С до полного отвердевания.

В качестве спектрофотометра для измерения характеристик оптической плотности использовался двухлучевой спектрофотометр Lambda 650 PERKIN ELMER (США). Для характеристики люминесцентных свойств образцов (спектры люминесценции и возбуждения) использовалась интегрирующая сфера Hamamatsu с многоканальным приёмником излучения PMA-12.



**Рис. 2.** Нормированные спектры люминесценции (кривая 1) и оптической плотности (кривая 2) плёнки на полимерной основе с инкапсулированными нанокристаллами  $\text{CsPbBr}_3$

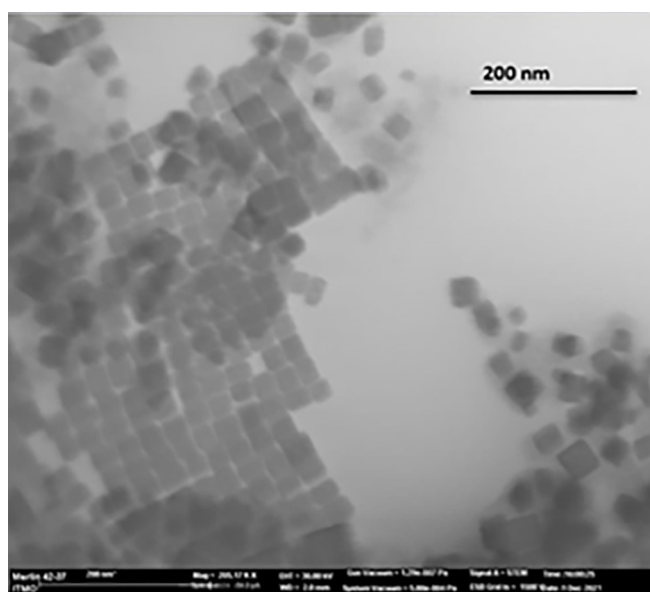
**Fig. 2.** Normalized luminescence (curve 1) and optical density (curve 2) spectra of a polymer-based film with encapsulated  $\text{CsPbBr}_3$  nanocrystals

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из лучших кандидатов, подходящих на роль преобразователя коротковолнового излучения — нанокристаллы свинцово-галогенидных перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$  [11–14]. Этот прямозонный люминесцентный материал обладает очень высоким квантовым выходом (до 95% в растворе, 30–60% в твёрдой фазе), поглощением в широком диапазоне от короткого ультрафиолетового излучения и вплоть до экситонного поглощения у самого края запрещённой зоны в области 505 нм, что обусловлено его природой дефектов, а также обладает люминесценцией с максимумом в области 525 нм, что соответствует максимуму поглощения большого количества фотодетекторов.

Нанокристаллы перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$  были получены методом горячей инъекции. Данные просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения представлены на рис. 3. Размеры боковых граней





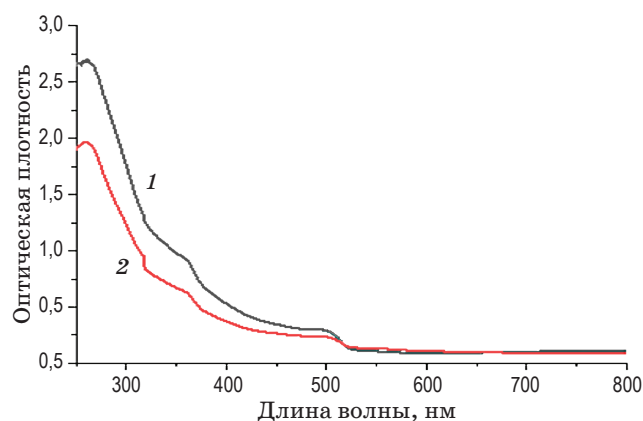
**Рис. 3.** Данные просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения нанокристаллов неорганических перовскитов состава  $\text{CsPbBr}_3$

**Fig. 3.** High-resolution transmission electron microscopy data of inorganic perovskite nanocrystals of  $\text{CsPbBr}_3$  composition

нанокристаллов перовскитов составляют примерно 20 нм.

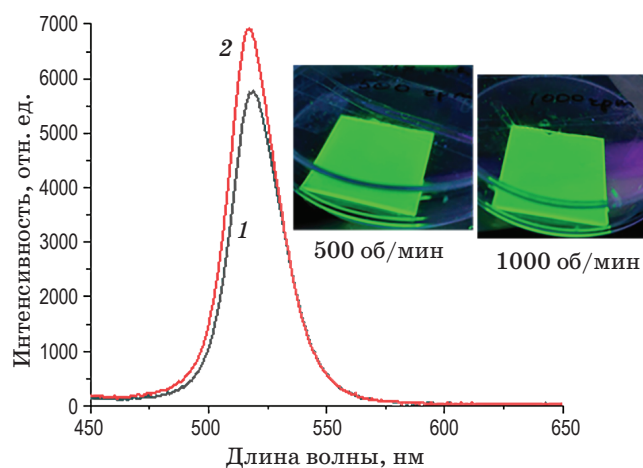
Использование наноразмерного перовскитного материала обусловлено тем, что, благодаря пространственным ограничениям, носители заряда не имеют возможности разойтись и безызлучательно рекомбинировать и/или диссипировать энергию, таким образом, основным вкладом в эмиссию является высокоэффективный экситонный механизм. Однако неорганические перовскиты подвержены деградации при хранении в условиях влажного воздуха. Данный недостаток удалось исключить путём использования полимерного защитного слоя на основе полидиметилсилоксана (PDMS). К достоинствам этого полимера можно отнести высокую гидрофобность, низкую газопроницаемость и прозрачность в широком спектральном диапазоне. Оптические характеристики полученной композитной структуры представлены на рис. 4 и 5. Длина волны возбуждения люминесценции составляет 365 нм.

Полученные композитные структуры (500 об/мин и 1000 об/мин) имеют максимум полосы люминесценции на длине волны 518 нм, показатель FWHM, равный 24,3 и 23,4 нм, по-



**Рис. 4.** Спектр оптической плотности композитной плёнки с нанокристаллами перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на подложке из кварцевого стекла при 500 об/мин (кривая 1) и 1000 об/мин (кривая 2)

**Fig. 4.** Optical density spectrum of a composite film with  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals on a quartz glass substrate at 500 rpm (curve 1) and 1000 rpm (curve 2)



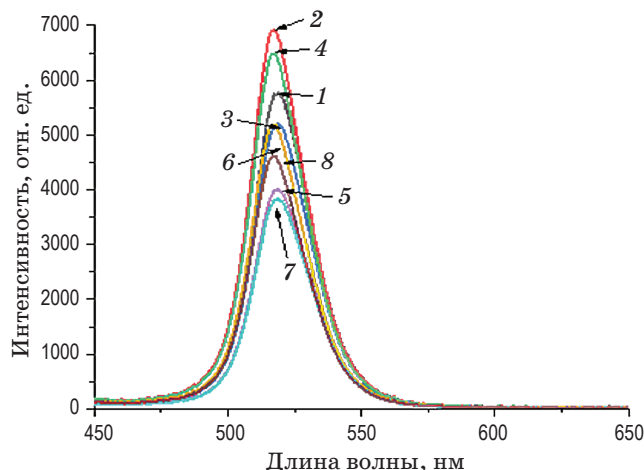
**Рис. 5.** Спектр фотолюминесценции композитной плёнки с нанокристаллами перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на подложке из кварцевого стекла при 500 об/мин (кривая 1) и 1000 об/мин (кривая 2) (вставка: фотографии образцов при 500 и 1000 об/мин), возбуждение 365 нм

**Fig. 5.** Photoluminescence spectrum of a composite film with  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals on a quartz glass substrate at 500 rpm (curve 1) and 1000 rpm (curve 2) (inset: photographs of samples at 500 and 1000 rpm), excitation 365 nm

глощение в широком диапазоне видимого и ультрафиолетового спектра и квантовый выход фотолюминесценции (QY) 43,1% и 49,5% соответственно. Данные оптические характеристики

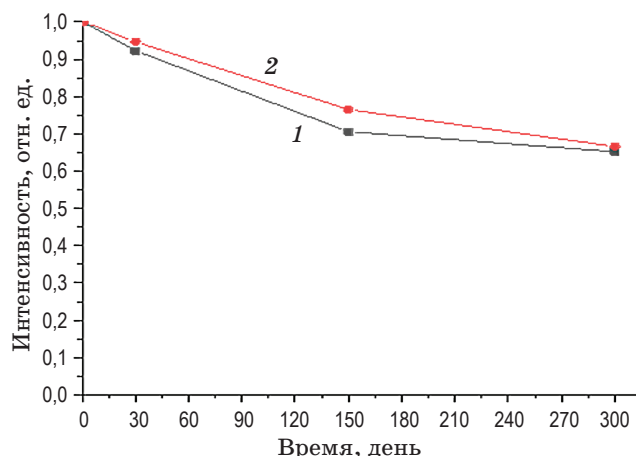
полностью удовлетворяют критериям для использования в качестве преобразователей излучения волоконно-оптических датчиков искры. На рис. 6 представлены оптические характеристики интенсивности люминесценции и числовые показатели квантового выхода фотолюминесценции. Измерения проводились в первый день, через 1 месяц, 5 месяцев и 10 месяцев. Квантовый выход композитной плёнки с нанокристаллами перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на подложке из кварцевого стекла при 500 об/мин и 1000 об/мин после 1 месяца 40,8% и 46,6%, после 5 месяцев 31,5% и 38,2%, после 10 месяцев хранения составил 28,7% и 33,1%.

Полученные композитные структуры со временем подвергаются деградации. За 10 месяцев при комнатной температуре 20 °C и влажности 45% квантовая эффективность образца PDMS/ $\text{CsPbBr}_3$  (1000 об/мин) снизилась на 33,3%, а образца PDMS/ $\text{CsPbBr}_3$  (500 об/мин) на 34,5%, за 1 месяц — на 5,5% и 5,3% соответственно. Это связано с негативным влиянием влажности окружающей среды и кислорода на перовскитные структуры [15, 16]. На рис. 7 представлен график ослабления интенсивности



**Рис. 6.** Спектр фотолюминесценции композитной плёнки с нанокристаллами перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на подложке из кварцевого стекла при 500 об/мин и 1000 об/мин (измерения в первый день (кривая 1 и 2), через 1 месяц (кривая 3 и 4), 5 месяцев (кривая 5 и 6) и 10 месяцев (кривая 7 и 8))

**Fig. 6.** Photoluminescence spectrum of a composite film with  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals on a quartz glass substrate at 500 rpm and 1000 rpm (measurements on the first day (curves 1 and 2), in 1 month (curves 3 and 4), in 5 months (curve 5 and 6) and in 10 months (curve 7 and 8))



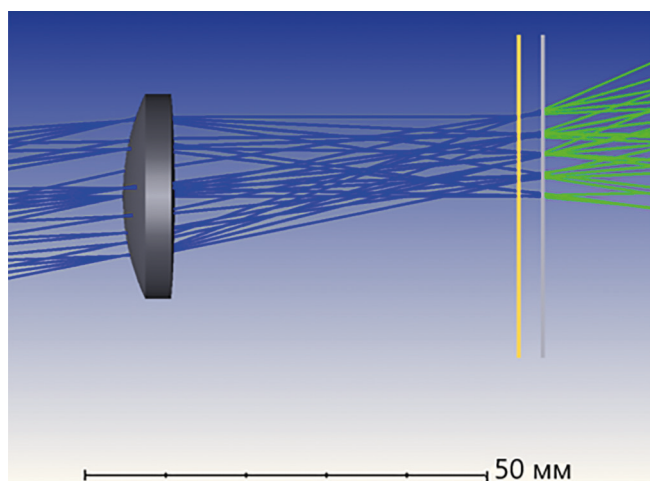
**Рис. 7.** Ослабление интенсивности излучения композитной плёнки с нанокристаллами перовскитов  $\text{CsPbBr}_3$  на подложке из кварцевого стекла от времени хранения при 500 об/мин (кривая 1) и 1000 об/мин (кривая 2)

**Fig. 7.** Attenuation of the emission intensity of a composite film with  $\text{CsPbBr}_3$  perovskite nanocrystals on a quartz glass substrate due to storage time at 500 rpm (curve 1) and 1000 rpm (curve 2)

излучения образцов относительно единицы от времени их хранения.

Из анализа квантовой эффективности образцов можно сделать вывод о том, что в течение 30 дней деградация композитных структур на основе перовскитов и PDMS незначительная. Следовательно полимерная оболочка выполняет свои функции по защите нанокристаллов перовскитов от воздействия окружающей среды и положительно влияет на сохранение квантовой эффективности образцов.

Для демонстрации применения исследуемой композитной структуры в качестве преобразователя излучения была проведена качественная оценка эффективности сбора оптического излучения от искры на преобразователе излучения при различных углах падения излучения от искры с помощью программного обеспечения ZEMAX Opticstudio [17]. На рис. 8 представлена промоделированная оптическая схема оптической части позиционно-чувствительного люминесцентного датчика искры со спектральным преобразователем излучения [1]. Моделирование производилось для длины волны излучения 365 нм при точечном источнике излучения. Углы падения излучения взяты в соответствии с заявленными ранее характеристиками [1].



**Рис. 8.** Оптическая схема волоконно-оптического датчика искры с люминесцентным преобразователем

**Fig. 8.** Optical scheme of a fiber-optic spark sensor with a luminescent converter

Эффективность оптической системы при разных углах падения от электрической искры

Efficiency of the optical system at different angles of incidence from an electric spark

Угол падения, °	$\eta_L$ , %	$T$ , %	$\eta_{gen}$ , %
0	98,2	80,1	78,65
5	98,6	80,1	78,98
10	98	80,1	78,50
15	97,1	80,1	77,77
20	96,3	80,1	77,13

В качестве собирающего элемента используется тонкая линза из материала N-BK7. Используемый оптический фильтр имеет спектр пропускания в ультрафиолетовой и коротковолновой области спектра.

Показатели эффективности линзы ( $\eta_L$ ), полученные после прохождения излучения через неё с помощью моделирования в ZEMAX.

Пропускание светофильтра ( $T$ ) было взято из его спектральной характеристики и промоделировано в ZEMAX. Далее, было произведено математическое моделирование и получены результаты общей эффективности ( $\eta_{gen}$ ) оптической системы, представленные в таблице.

При увеличении угла падения излучения от искры ухудшается эффективность оптической системы. Полученные оптические характеристики являются приемлемыми для возбуждения люминесценции образцов и преобразования излучения от искры в видимый диапазон спектра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод получения композитных материалов на основе PDMS и нанокристаллов перовскитов состава CsPbBr<sub>3</sub>. Сформированы рекомендации по выбору технологических параметров метода получения композитных материалов. Получены композитные структуры PDMS/CsPbBr<sub>3</sub> (500 rpm) и PDMS/CsPbBr<sub>3</sub> (1000 rpm), исследованы их оптические характеристики: максимумы полос люминесценции на длине волны ~518 нм, показатели FWHM — 24,3 и 23,4 нм, квантовый выход фотолюминесценции — 43,1% и 49,5% и спектры поглощения. Полученные в данной работе характеристики композитных материалов соответствуют необходимым показателям для использования их в качестве преобразователей ультрафиолетового излучения в волоконно-оптических датчиках искры. Произведена качественная оценка эффективности сбора света оптической системы на преобразователе излучения, представленным в виде исследуемого композитного материала, которая составила от 77 до 78% в зависимости от угла падения излучения от искры. Показана принципиальная возможность использования неорганических нанокристаллов перовскитов, как эффективных люминофоров.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров А.И., Плешанов И.М. Датчик искрения // Патент РФ № 2715477. 2020. URL: [https://new.fips.ru/registers-docview/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2715477&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-docview/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2715477&TypeFile=html)
2. Сидоров А.И., Лисенкова А.Е., Цепич В.П., Горяинов В.С. Позиционно-чувствительный датчик искры со спектральным преобразованием излучения //

## REFERENCES

1. Sidorov A.I., Pleshanov I.M. Spark sensor // RF Patent No. 2715477. 2020 URL: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2715477&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2715477&TypeFile=html)
2. Sidorov A.I., Lisenkova A.E., Tsepich V.P., Goryainov V.S. Position-sensitive spark sensor with spectral conversion of radiation // Journal of Optical



- Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 9. С. 82–87. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-09-82-87>
3. Zhao J., Yang Z., Yu C., Qiu J., Song Z. Preparation of ultra-small molecule-like Ag nano-clusters in silicate glass based on ion-exchange process: energy transfer investigation from molecule-like Ag nano-clusters to  $\text{Eu}^{3+}$  ions // *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 341. P. 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.028>
  4. Marasanov D.V., Mironov L.Yu., Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V. Luminescence and energy transfer mechanisms in photo-thermo-refractive glasses co-doped with silver molecular clusters and  $\text{Eu}^{3+}$  // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. V. 22. № 40. P. 23342–23350. <https://doi.org/10.1039/D0CP02786C>
  5. Mironov L.Y., Marasanov D.V., Ulshina M.D., Sgibnev Y.M., Kolesnikov I.E., Nikonorov N.V. The role of thermally activated quenching and energy migration in luminescence of silver clusters in glasses // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2022. V. 126(32). P. 13863–13869. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c04521>
  6. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Investigation of the role of silver species on spectroscopic features of  $\text{Sm}^{3+}$ -activated sodium-aluminosilicate glasses via  $\text{Ag}^+/\text{Na}^+$  ion exchange // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4807313>
  7. Sgibnev Y., Asamoah B., Nikonorov N., Honkanen S. Tunable photoluminescence of silver molecular clusters formed in  $\text{Na}^+/\text{Ag}^+$  ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glass matrix // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 226. P. 117411. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117411>
  8. Бабкина А.Н., Кипрушкина Т.С., Ширшнев П.С., Никонов Н.В. Люминесцентный термохромизм в стекле с молекулярными кластерами меди // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 7. С. 58–63.
  9. Никонов Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособ., курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 130 с.
  10. Krieg F., Quy K. Ong, Burian M., Rainò G., Naumenko D., Amenitsch H., Süess A., Grotevent M.J., Krumeich F., Bodnarchuk M.I., Shorubalko I., Stellacci F., Kovalenko M.V. Stable ultraconcentrated and ultra-dilute colloids of  $\text{CsPbX}_3$  ( $X = \text{Cl}, \text{Br}$ ) nanocrystals using natural lecithin as a capping ligand // *Journal of the American Chemical Society*. 2019. V. 141 (50). P. 19839–19849. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b09969>
  11. Belorus A.O., Pleshanov I.M., Doru-Tovt N.V. Influence of technological conditions on photoluminescent properties of halide perovskite nanocrystals // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1482. № 1. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1482/1/012011>
  12. Zhao H., Zhou Y., Benetti D., Ma D., Rosei F. Perovskite quantum dots integrated in large-area luminescent solar concentrators // *Nano energy*. 2017. V. 37. P. 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.05.030>
  13. Dursun I., Shen C., Parida M.R., Pan J., Sarmah S.P., Priante D., Bakr O.M. Perovskite nanocrystals as a color converter for visible light communication // *Acs Photonics*. 2016. V. 3(7). P. 1150–1156. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.6b00187>
  14. Yan F., Tan S.T., Li X., Demir H.V. Light generation in lead halide perovskite nanocrystals: LEDs, color converters, lasers, and other applications // *Small*. 2019. V. 15(47). P. 1902079. <https://doi.org/10.1002/smll.201902079>
  - Technology. 2020. V. 87. № 9. P. 562–565. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000562>
  3. Zhao J., Yang Z., Yu C., Qiu J., Song Z. Preparation of ultra-small molecule-like Ag nano-clusters in silicate glass based on ion-exchange process: energy transfer investigation from molecule-like Ag nano-clusters to  $\text{Eu}^{3+}$  ions // *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 341. P. 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.028>
  4. Marasanov D.V., Mironov L.Yu., Sgibnev Y.M., Nikonorov N.V. Luminescence and energy transfer mechanisms in photo-thermo-refractive glasses co-doped with silver molecular clusters and  $\text{Eu}^{3+}$  // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. V. 22. № 40. P. 23342–23350. <https://doi.org/10.1039/D0CP02786C>
  5. Mironov L.Y., Marasanov D.V., Ulshina M.D., Sgibnev Y.M., Kolesnikov I.E., Nikonorov N.V. The role of thermally activated quenching and energy migration in luminescence of silver clusters in glasses // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2022. V. 126(32). P. 13863–13869. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c04521>
  6. Li L., Yang Y., Zhou D., Yang Z., Xu X., Qiu J. Investigation of the role of silver species on spectroscopic features of  $\text{Sm}^{3+}$ -activated sodium-aluminosilicate glasses via  $\text{Ag}^+/\text{Na}^+$  ion exchange // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4807313>
  7. Sgibnev Y., Asamoah B., Nikonorov N., Honkanen S. Tunable photoluminescence of silver molecular clusters formed in  $\text{Na}^+/\text{Ag}^+$  ion-exchanged antimony-doped photo-thermo-refractive glass matrix // *Journal of Luminescence*. 2020. V. 226. P. 117411. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117411>
  8. Babkina A.N., Kiprushkina T.S., Shirshnev P.S., Nikonorov N.V. Luminescence thermochromism in glass with copper-containing molecular clusters // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83(7). P. 434–437. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000434>
  9. Nikonorov N.V., Sidorov A.I. Materials and technologies of fiber optics: special optical fibers: textbook. a manual, a course of lectures. St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. 130 p.
  10. Krieg F., Quy K. Ong, Burian M., Rainò G., Naumenko D., Amenitsch H., Süess A., Grotevent M.J., Krumeich F., Bodnarchuk M.I., Shorubalko I., Stellacci F., Kovalenko M.V. Stable ultraconcentrated and ultra-dilute colloids of  $\text{CsPbX}_3$  ( $X = \text{Cl}, \text{Br}$ ) nanocrystals using natural lecithin as a capping ligand // *Journal of the American Chemical Society*. 2019. V. 141 (50). P. 19839–19849. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b09969>
  11. Belorus A.O., Pleshanov I.M., Doru-Tovt N.V. Influence of technological conditions on photoluminescent properties of halide perovskite nanocrystals // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1482. № 1. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1482/1/012011>
  12. Zhao H., Zhou Y., Benetti D., Ma D., Rosei F. Perovskite quantum dots integrated in large-area luminescent solar concentrators // *Nano energy*. 2017. V. 37. P. 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.05.030>
  13. Dursun I., Shen C., Parida M.R., Pan J., Sarmah S.P., Priante D., Bakr O.M. Perovskite nanocrystals as a color converter for visible light communication // *Acs Photonics*. 2016. V. 3(7). P. 1150–1156. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.6b00187>
  14. Yan F., Tan S.T., Li X., Demir H.V. Light generation in lead halide perovskite nanocrystals: LEDs, color converters, lasers, and other applications // *Small*. 2019. V. 15(47). P. 1902079. <https://doi.org/10.1002/smll.201902079>



15. Ouyang Y., Li Y., Zhu P., Li Q., Gao Y., Tong J., Wang J. Photo-oxidative degradation of methylammonium lead iodide perovskite: mechanism and protection // *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. V. 7(5). P. 2275–2282. <https://doi.org/10.1039/C8TA12193A>
16. Zhou Y., Zhao Y. Chemical stability and instability of inorganic halide perovskites // *Energy & Environmental Science*. 2018. V. 12(5). P. 1495–1511. <https://doi.org/10.1039/C8EE03559H>
17. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Влияние геометрических факторов на эффективность регистрации электрической искры волоконным датчиком с люминесцентной оболочкой // *Оптический журнал*. 2020. № 2. P. 76–81. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-02-76-81>
15. Ouyang Y., Li Y., Zhu P., Li Q., Gao Y., Tong J., Wang J. Photo-oxidative degradation of methylammonium lead iodide perovskite: mechanism and protection // *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. V. 7(5). P. 2275–2282. <https://doi.org/10.1039/C8TA12193A>
16. Zhou Y., Zhao Y. Chemical stability and instability of inorganic halide perovskites // *Energy & Environmental Science*. 2018. V. 12(5). P. 1495–1511. <https://doi.org/10.1039/C8EE03559H>
17. Agafonova D.S., Sidorov A.I. Effect of geometrical factors on the efficiency with which an electric spark is recorded using a fiber sensor with luminescent cladding // *Journal of Optical Technology*. 2020. V. 87(2). P. 127–131. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000127>

#### АВТОРЫ

**Илья Михайлович Плешанов** — аспирант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57205490625, <http://orcid.org/0000-0001-6834-2427>, [pim93@mail.ru](mailto:pim93@mail.ru)

**Дмитрий Вячеславович Марасанов** — канд. физ.-мат. наук, инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57195673419, <http://orcid.org/0000-0001-8480-2016>, [Dmitriymarasanov@bk.ru](mailto:Dmitriymarasanov@bk.ru)

**Лев Евгеньевич Зеленков** — канд. хим. наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 23986551800, <http://orcid.org/0000-0001-6387-7553>, [lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru](mailto:lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru)

**Антон Орестович Белорус** — канд. техн. наук, научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова-Ленина, 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56662496700, <http://orcid.org/0000-0002-6752-8796>, [mop\\_92@mail.ru](mailto:mop_92@mail.ru)

#### AUTHORS

**Ilya M. Pleshanov** — Graduate Student, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57205490625, <http://orcid.org/0000-0001-6834-2427>, [pim93@mail.ru](mailto:pim93@mail.ru)

**Dmitriy V. Marasanov** — PhD in Physics and Mathematics, Engineer, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57195673419, <http://orcid.org/0000-0001-8480-2016>, [Dmitriymarasanov@bk.ru](mailto:Dmitriymarasanov@bk.ru)

**Lev E. Zelenkov** — PhD in Physics and Mathematics, Engineer, Scientific Researcher, ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 23986551800, <http://orcid.org/0000-0001-6387-7553>, [lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru](mailto:lev.zelenkov@metalab.ifmo.ru)

**Anton O. Belorus** — PhD, Scientific Researcher, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 56662496700, <http://orcid.org/0000-0002-6752-8796>, [mop\\_92@mail.ru](mailto:mop_92@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 24.01.2023

Одобрена после рецензирования 11.04.2023

Принята к печати 26.06.2023

The article was submitted to the editorial office 24.01.2023

Approved after review 11.04.2023

Accepted for publication 26.06.2023