

Фоточувствительные структуры с каскадными концентраторами излучения на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов металлов

И. И. Михайлов^{1✉}, И. А. Ламкин¹, А. Э. Дегтерев¹, М. М. Романович¹,
М. Д. Павлова¹, М. А. Курочкина², С. А. Тарасов¹, У. А. Кузьмина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Университет прикладных наук Бранденбурга, Бранденбург-на-Гавеле, Германия

✉ iimihalov@gmail.com

Аннотация

Введение. В настоящее время актуально повышение эффективности существующих и создание новых типов фотоприемников. К таким фотоприемникам относятся фоточувствительные структуры на основе каскадных концентраторов, принцип действия которых основан на поглощении оптического излучения с последующим переизлучением на большей длине волны и концентрировании излучения на высокоэффективный фотоприемник малой площади. Спектры поглощения и переизлучения каждого слоя каскада зависят от характеристик используемого материала. Одним из наиболее перспективных материалов для слоев каскада являются коллоидные квантовые точки (ККТ), технология производства которых позволяет точно управлять положением максимума фотолюминесценции. Актуальным является создание и исследование фоточувствительных структур с каскадными концентраторами различной формы на основе ККТ CdS, CdSe/ZnS и PbS.

Цель работы. Создание и исследование фоточувствительных структур со спектром чувствительности в широком диапазоне на основе концентраторов, содержащих массивы ККТ халькогенидов металлов, и исследование их характеристик.

Материалы и методы. Каскадные фоточувствительные структуры изготовлены на основе слоев, выполненных из полиметилметакрилата и слоев ККТ, заключенных в матрицу из полистирола.

Результаты. Приведены результаты исследования изготовленных трехслойных концентраторов с различными коллоидными квантовыми точками в каждом из слоев концентратора. Показано увеличение выходной мощности на 22 % для структуры трехслойного каскада, в котором использовались различные материалы слоев, по сравнению с аналогичной структурой, использующей однослойный концентратор.

Заключение. Исследования показали повышение эффективности фоточувствительных структур с каскадным концентратором на основе ККТ различного типа (CdS, CdSe/ZnS и PbS) в слоях каскада.

Ключевые слова: фоточувствительная структура с каскадным концентратором, фотоприемник, концентратор, коллоидные квантовые точки

Для цитирования: Фоточувствительные структуры с каскадными концентраторами излучения на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов металлов / И. И. Михайлов, И. А. Ламкин, А. Э. Дегтерев, М. М. Романович, М. Д. Павлова, М. А. Курочкина, С. А. Тарасов, У. А. Кузьмина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 78–88. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-78-88

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2022-0016 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01438-22-07).

Статья поступила в редакцию 30.12.2022; принята к публикации после рецензирования 27.03.2023; опубликована онлайн 28.04.2023

Photo-sensitive Structures with Cascade Radiation Concentrators Based on Colloidal Quantum Dots of Metal Chalcogenides

Ivan I. Mikhailov¹✉, Ivan A. Lamkin¹, Aleksander E. Degterev¹, Maria M. Romanovich¹, Marina D. Pavlova¹, Marharyta A. Kurachkina², Sergey A. Tarasov¹, Ulyana A. Kuzmina¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²University of Applied Sciences Brandenburg, Brandenburg an der Havel, Germany

✉iimihalov@gmail.com

Abstract

Introduction. The problem of increasing the efficiency of existing photodetectors and creating their new types attracts much research attention. Among new photodetector types are photosensitive structures based on cascade concentrators, whose operational principle involves the absorption of optical radiation followed by its reemission at a longer wavelength and radiation concentration onto a highly efficient small-area photodetector. The absorption and re-emission spectra of each cascade layer depend on the characteristics of the material used. Colloidal quantum dots are among the most promising materials for cascade layers due to their manufacturing technology, which provides for accurate control over the photoluminescence maximum position. It seems highly relevant to develop and to study photosensitive structures with cascade concentrators of various shapes based on CdS, CdSe/ZnS, and PbS colloidal quantum dots.

Aim. To develop photosensitive structures with a wide-range sensitivity spectrum based on concentrators containing arrays of metal chalcogenide CQDs and to study their characteristics.

Materials and methods. Cascade photosensitive structures were manufactured based on layers made of polymethyl methacrylate and layers of colloidal quantum dots embedded in a polystyrene matrix.

Results. Three-layer concentrators were manufactured with different colloidal quantum dots in each concentrator layers. A 22 % increase in the output power was observed for a three-layer cascade structure based on different cascade layer materials compared to a similar structure using a single layer concentrator.

Conclusion. The conducted studies showed an increase in the efficiency of photosensitive structures with a cascade concentrator based on colloidal quantum dots of various types (CdS, CdSe/ZnS, and PbS) in the cascade layers.

Keywords: photosensitive structure with cascade concentrator, photodetector, concentrator, colloidal quantum dots

For citation: Mikhailov I. I., Lamkin I. A., Degterev A. E., Romanovich M. M., Pavlova M. D., Kurachkina M. A., Tarasov S. A., Kuzmina U. A. Photo-sensitive Structures with Cascade Radiation Concentrators Based on Colloidal Quantum Dots of Metal Chalcogenides. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 78–88. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-78-88

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the project № FSEE-2022-0016 (state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-01438-22-07).

Submitted 30.12.2022; accepted 27.03.2023; published online 28.04.2023

Введение. В настоящее время активно развивается оптоэлектроника. Ведутся работы по созданию и улучшению нетрадиционных фоточувствительных структур, основой которых являются органические структуры и перовскиты [1–4]. Актуальным объектом исследований, помимо прочего, являются коллоидные квантовые точки (ККТ), обладающие квантовым выходом до 93 % [5]. ККТ способны излучать и погло-

щать излучение в широком диапазоне спектра от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного [6–8]. Технология производства ККТ позволяет точно управлять положением максимума фотолюминесценции (ФЛ) и, как следствие, получать светоизлучающие и фоточувствительные структуры со спектрами ФЛ и поглощения, недостижимыми при использовании объемных полупроводников [9–13]. В [14]

Фоточувствительные структуры с каскадными концентраторами излучения

на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов металлов

Photo-sensitive Structures with Cascade Radiation Concentrators

Based on Colloidal Quantum Dots of Metal Chalcogenides

авторами предложена модель трехслойного каскадного концентратора на основе ККТ CdSe/CdS, находящихся в растворителе, и предсказана эффективность такой фоточувствительной структуры на уровне 20 %. В [15] описан созданный авторами солнечный концентратор на основе ККТ, помещенных в матрицу из тиоленна, для которого достигнуто значение квантового выхода 12.3 %. Продемонстрировано значительное уменьшение квантового выхода ККТ CdSe/CdS с 80 до 6 % в матрицах прямоугольной формы из полиметилметакрилата (ПММА) вследствие явлений, связанных с перепоглощением [16]. Одним из решений указанной проблемы может быть сокращение оптического пути и количества внутренних отражений от стенок матрицы. В настоящей статье предложены фоточувствительные структуры с трехслойными концентраторами (ТК) трапецевидной формы на основе различных типов ККТ. Показано повышение выходной мощности при использовании различных типов ККТ в слоях ТК.

Исследование. Выбор формы и материалов ТК. В [17] сообщено, что использование матриц из полистирола (ПС) и ПММА при соотношении массы ККТ к массе мономера 0.5 % не приводит к существенным потерям излучения ККТ. Указанные материалы являются фаворитами при выборе материалов для ТК. В [18] рассмотрен однослойный концентратор, в котором полное внутреннее отражение довольно велико, следовательно, значительная часть излучения ККТ будет покидать внутренний объем концентратора.

Для уменьшения потерь при выводе излучения из фоточувствительной структуры с ТК предложена структура одного слоя ТК, схема-

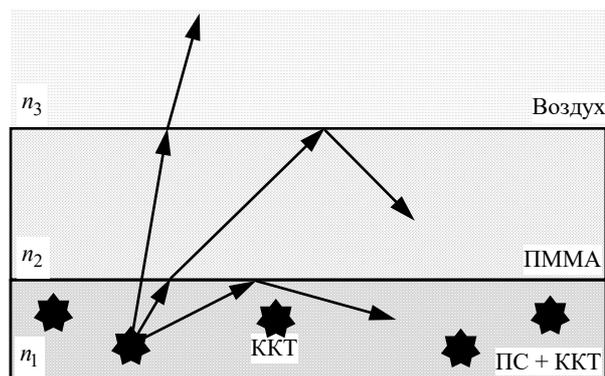


Рис. 1. Структура одного слоя ТК

Fig. 1. Structure of one layer in a three-layer concentrator

тическое изображение которой, а также ход лучей в ней, в том числе претерпевающих полное внутреннее отражение, представлены на рис. 1.

Коэффициенты преломления для ПС n_1 , ПММА n_2 и воздуха n_3 подобраны таким образом, что $n_1 > n_2 > n_3$. Это позволяет реализовать полное внутреннее отражение внутри структуры и уменьшить выход излучения от ККТ, содержащихся в матрице полистирола, в воздушную среду.

Концентратор обеспечивает не только переизлучение на требуемых длинах волн, но и концентрацию излучения на фотоприемник малой площади, располагающийся на одной из боковых граней.

Для определения наилучшей формы концентратора было изготовлено несколько типов прототипов концентраторов из ПММА (рис. 2). Образцы, изготовленные из ПММА, последовательно обрабатывались абразивными материалами М28Н–2, М14 и М7Н–01 (от крупного зерна к более мелкому), а затем полировались с применением пасты ГОИ.



Рис. 2. Три образца концентратора, изготовленных из ПММА

Fig. 2. Three concentrator samples made of polymethyl methacrylate

Чтобы выявить образец, обладающий наилучшей способностью концентрировать свет, при помощи мультиметра GDM–8245 измерялись ток короткого замыкания (КЗ) $I_{КЗ}$ и напряжение холостого хода (ХХ) $U_{ХХ}$ фотодиода BPW21R (активная область – 7.5 мм², спектральный максимум чувствительности 565 нм), который устанавливался напротив меньшей грани исследуемых образцов. Свет, испускаемый лампой накаливания, проходя через диафрагму и собирающую линзу, попадал на исследуемую структуру, расположенную на зеркальной поверхности. Испытывая акты рассеивания, преломления и отражения внутри структуры, свет попадал на меньшую грань структуры и выводился через нее на фотоприемник. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Образцы типа 3М (матовые) являются копией образцов 3-го типа, которые дополнительно обрабатывались механически для создания матовых поверхностей на нижней и верхней гранях. Матовая поверхность уменьшает интенсивность отраженного излучения от верхней принимающей грани, как следствие, внутрь структуры попадает больше света, что подтверждается результатами измерений.

Затем на поверхность образцов из ПММА (верхняя и нижняя грани) была нанесена тонкая пленка ПС, предварительно растворенного в толуоле. Результаты исследования структуры с ПММА представлены в табл. 2. Видно, что образцы 3-го типа (матовые) индуцируют в фотоприемнике наибольшие значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

Табл. 1. Показания фотоприемника для исследуемых образцов

Tab. 1. Photodetector readings for test samples

Параметр	Тип образца			
	1	2	3	3М
$I_{КЗ}$, мкА	0.23	0.15	0.21	0.32
$U_{ХХ}$, мВ	329.43	321.08	325.17	335.88

Табл. 2. Показания фотоприемника для исследуемых образцов с пленкой полистирола

Tab. 2. Photodetector readings for test samples with a polystyrene film

Параметр	Тип образца		
	1	2	3М
$I_{КЗ}$, мкА	0.31	0.17	0.35
$U_{ХХ}$, мВ	333.67	323.13	341.03

Для повышения эффективности fotocувствительных структур с каскадным концентратором важно, чтобы полимерные структуры были максимально прозрачными и практически без потерь пропускали излучение на следующий каскад. Для определения прозрачности образцов при помощи спектрометра быстрого сканирования HR4000CG–UV–NIR были измерены спектральные зависимости коэффициента пропускания $K_{tr} = P_{tr}/P_{ir}$, где P_{tr} и P_{ir} – прошедший и падающий потоки излучения соответственно (рис. 3). Из представленных зависимостей следует, что при лучшей концентрации излучения профилированные образцы проигрывают в прозрачности. Этот факт может значительно повлиять на выходные характеристики следующих каскадов. Таким образом, можно сделать вывод, что образцы типа 1 (трапецевидной формы) лучше

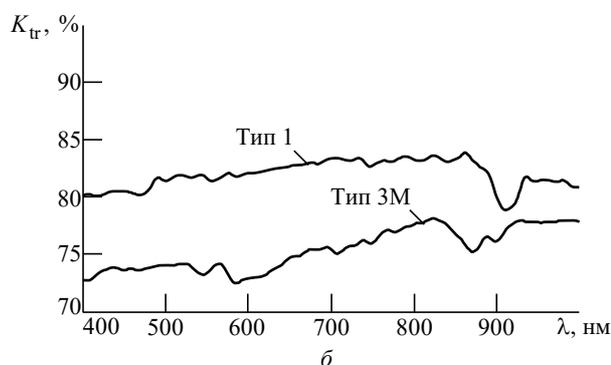
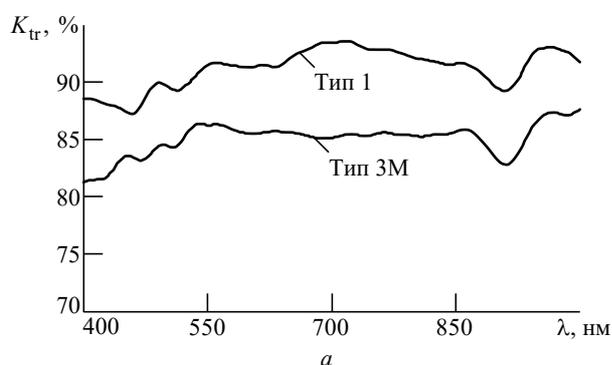


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента пропускания структур типов 1 и 3М (а – изготовленных из ПММА; б – изготовленных из ПММА–ПС–ПММА)

Fig. 3. Spectral dependences of the transmittance of structures 1 and 3M (a – made of polymethyl methacrylate; б – made of polymethyl methacrylate – polystyrene – polymethyl methacrylate)

других подходят для разрабатываемой фоточувствительной структуры.

На основе описанных результатов предложена модель структуры с ТК (рис. 4). В каждом из слоев в матрицах из ПС помещены ККТ различного типа, имеющие разный состав, определяющий спектры поглощения и фотолюминесценции. Концентрация света, попавшего на структуру сверху, достигается за счет многократного переотражения от граней концентратора и переизлучения в массиве ККТ, равномерно распределенных в рабочем слое концентратора, с последующей фокусировкой на фотоприемнике малой площади, расположенном напротив наименьшей грани структуры.

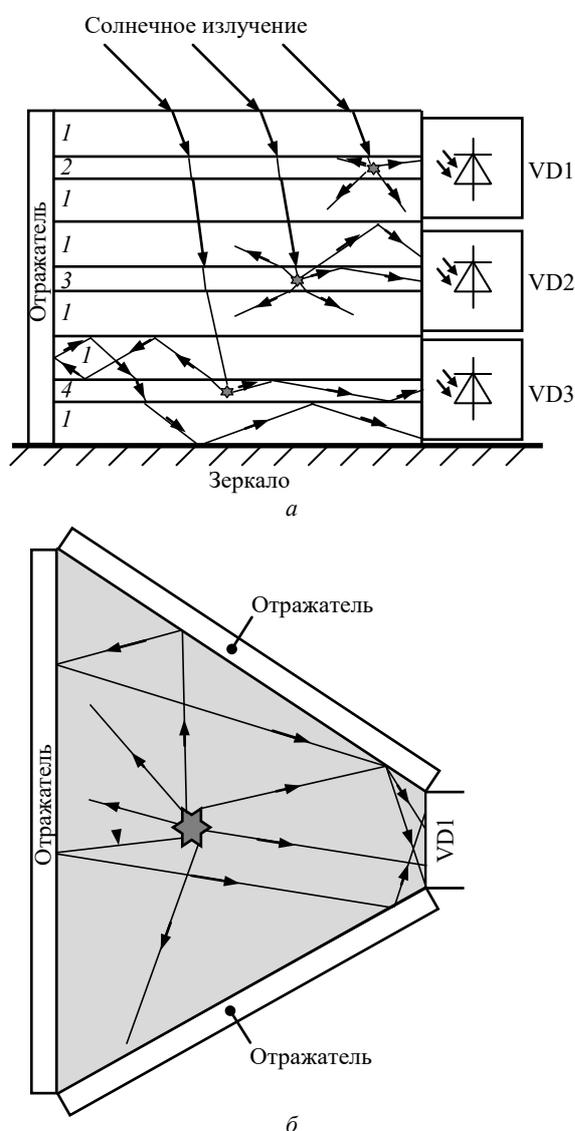


Рис. 4. Модель каскадной фоточувствительной структуры на основе ККТ: *a* – разрез, *б* – вид сверху

Fig. 4. Model of a cascade photosensitive structure based on colloidal quantum dot: *a* – sectional View, *b* – top View

Предварительно ККТ с определенной плотностью растворялись в толуоле, затем смешивались с полистиролом, предварительно также растворенном в толуоле. В качестве торцевых отражателей использована тонкая алюминиевая фольга.

Для создания эффективной фоточувствительной структуры с каскадным концентратором очень важно, чтобы спектры поглощения и фотолюминесценции ККТ в разных слоях перекрывались как можно меньше. В разработанных структурах во входном (верхнем) слое использованы ККТ на основе CdSe, излучающие в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, в следующем слое использованы ККТ на основе CdSe/ZnS, излучающие в видимом диапазоне, в нижнем слое внедрены ККТ на основе PbS, излучающие в инфракрасном (ИК) диапазоне. Выбор ККТ обусловлен следующим:

- поглощением в широком диапазоне от УФ до ИК;
- высоким квантовым выходом ККТ;
- уменьшением потерь на самопоглощение за счет того, что каждый следующий слой излучает на длине волны, которая не поглощается предыдущим.

На рис. 5 показаны нормированные на максимум интенсивности излучения ККТ $\overline{\text{Phl}}_{\text{max}}$ спектры фотолюминесценции

$$\overline{\text{Phl}}(\lambda) = \text{Phl}(\lambda) / \text{Phl}_{\text{max}}$$

Максимумы фотолюминесценции ККТ на основе CdS расположены на длине волны 380 нм (*a*); ККТ на основе CdSe/ZnSC – на длине волны 650 нм (*б*); ККТ на основе PbS – на длине волны 1000 нм (*в*).

На этом же рисунке представлены поглощения ККТ

$$\text{Abs}(\lambda) = \ln(I_0/I),$$

где I_0, I – поток излучения, падающий на образец и прошедший через него соответственно.

В результате экспериментов измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоприемников, расположенных с торцов каждого слоя двух различных типов фоточувствительных структур с каскадным концентратором. В первом случае образцы состояли из трех идентичных слоев, содержащих в себе ККТ на основе CdSe/ZnS, обладающих наибольшим

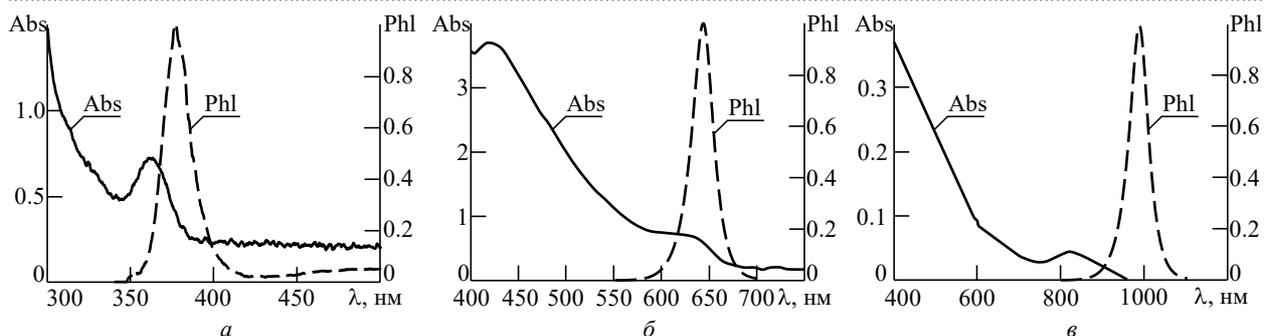


Рис. 5. Спектры поглощения и фотолюминесценции ККТ на основе: *a* – CdS; *б* – CdSe/ZnS; *в* – PbS

Fig. 5. Absorption and photoluminescence spectra of colloidal quantum dots based on: *a* – CdS; *б* – CdSe/ZnS; *в* – PbS

среди трех видов ККТ квантовым выходом 80 %. Во втором случае фоточувствительные структуры состояли из трех слоев, содержащих в себе массивы различных ККТ на основе CdS, CdSe/ZnS и PbS. Целью экспериментов было сравнение эффективности преобразования света в электрическую энергию фоточувствительными структурами с ТК, содержащими ККТ одного и разных типов. Для измерения электрической мощности напротив торцов слоев тройного концентратора устанавливались фотоприемники.

Вырабатываемая мощность рассчитывалась по ВАХ как точка, где произведение тока и напряжения имело наибольшее значение. На рис. 6 приведены результаты измерений вольт-амперных характеристик в фотогальваническом режиме включения фотоприемников.

При исследовании конструкции фоточувствительных структур с каскадными концентраторами на основе ККТ и использовании в качестве отражателей тонкой алюминиевой фольги максимальная мощность, полученная

как сумма всех максимумов мощности, измеренных с каждого каскада в отдельности, составила 3.61 мкВт (1.07 мкВт сформированы каскадом с ККТ на основе CdS, 1.25 мкВт – с ККТ на основе CdSe/ZnS и 1.29 мкВт – с ККТ на основе PbS). Для аналогичной трехкаскадной конструкции на ККТ на основе CdSe/ZnS получена выходная мощность 2.96 мкВт (1.51, 0.87 и 0.58 мкВт с отдельных каскадов). Таким образом, выходная мощность трехкаскадной структуры с ККТ разного типа на 22 % превышает аналогичный параметр аналогичной структуры с ККТ одного типа.

Результат эксперимента показал преимущество использования фоточувствительных структур с каскадным концентратором, содержащим в своем составе ККТ различного типа, перед структурами, содержащими ККТ одного типа. Причины этого явления можно объяснить, опираясь на рис. 7, на котором приведены спектры пропускания структур двух типов: *a* – двухслойной фоточувствительной структуры с кас-

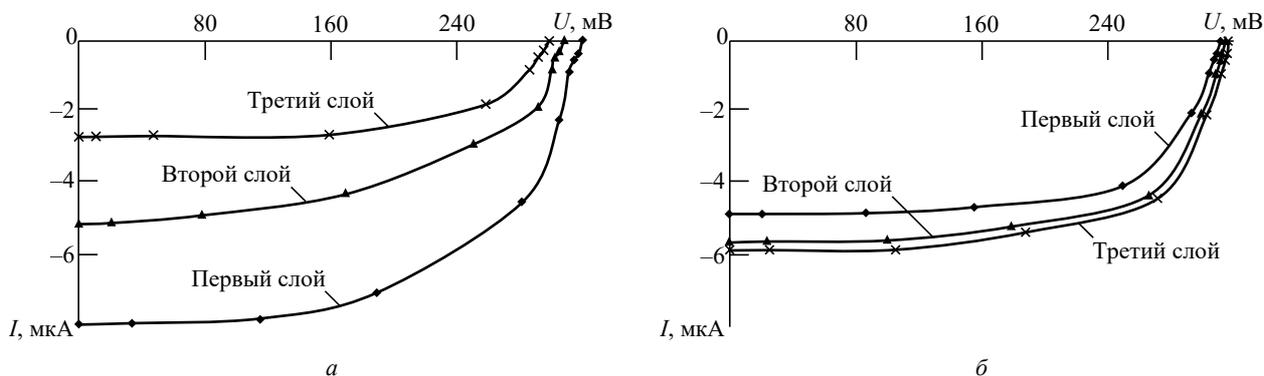


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики фотоприемников ФД-24К, расположенных в различных слоях ТК: *a* – содержащего ККТ на основе CdSe/ZnS во всех слоях; *б* – содержащего ККТ на основе CdS в первом слое, на основе CdSe/ZnS во втором и на основе PbS в третьем слое. Маркеры указывают произведенные измерения

Fig. 6. Volt-ampere characteristics of photodetectors ФД-24К located in different layers of a three-layer concentrator: *a* – containing colloidal quantum dots based on CdSe/ZnS in all layers; *б* – containing colloidal quantum dots based on CdS in first layer, on CdSe/ZnS in second layer and on PbS in third layer. The markers indicate the measurements taken

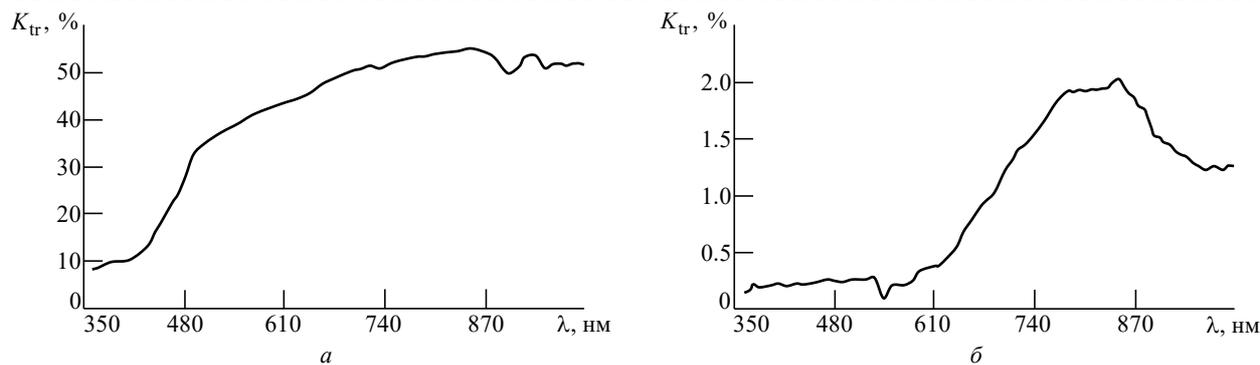


Рис. 7. Спектры пропускания фоточувствительных структур с каскадным концентратором: *a* – двухслойной на основе CdS с концентрацией 0.7 мг/мл и CdSe/ZnS с концентрацией 0.5 мг/мл; *б* – трехслойной на основе CdS с концентрацией 0.7 мг/мл, CdSe/ZnS с концентрацией 0.5 мг/мл и PbS с концентрацией 0.5 мг/мл

Fig. 7. Transmission spectra of photosensitive structures with a cascade concentrator: *a* – two-layer based on CdS with a concentration of 0.7 mg/ml and CdSe/ZnS with a concentration of 0.5 mg/ml; *b* – three-layer based on CdS with a concentration of 0.7 mg/ml, CdSe/ZnS with a concentration 0.5 mg/ml and PbS with a concentration of 0.5 mg/ml

кадным концентратором на основе CdS с концентрацией 0,7 мг/мл и CdSe/ZnS с концентрацией 0.5 мг/мл; *б* – трехслойной фоточувствительной структуры с каскадным концентратором на основе CdS с концентрацией 0.7 мг/мл; CdSe/ZnS – 0,5 мг/мл и PbS – 0.5 мг/мл (указана концентрация растворенных в толуоле ККТ).

Фотоны с высоким значением энергии гораздо лучше поглощаются ККТ на основе CdS, поэтому в следующем слое концентратора на основе CdSe/ZnS число поглощений высокоэнергетичных квантов света уменьшается. Это приводит к меньшему числу релаксационных переходов с большой потерей энергии. Соответственно, в фоточувствительных структурах с каскадным концентратором на ККТ разного типа меньше потери на термализацию нанокристалла, а значит, выше эффективность преобразования первичного излучения.

Заключение. В статье представлены результаты исследований влияния формы фоточувствительных структур с каскадными кон-

центраторами на их характеристики. Наилучшими характеристиками обладают структуры трапецевидной формы. Для реализации эффекта полного внутреннего отражения внутри ячеек ТК была изготовлена слоистая структура ПММА/ПС + ККТ/ПММА. Для оценки влияния спектров поглощения и фотолюминесценции ККТ на эффективность разрабатываемых структур были изготовлены образцы трехслойных структур двух типов. Первый содержал ККТ одного типа на основе CdSe/ZnS, имеющего максимум фотолюминесценции на длине волны 650 нм, второй – ККТ на основе CdS (максимум фотолюминесценции на длине волны 380 нм), CdSe/ZnS (650 нм) и PbS (1000 нм) в отдельных слоях. Второй образец показал увеличение входной мощности по сравнению с первым на 22 %. Показана целесообразность дальнейших исследований в области фоточувствительных структур с каскадными концентраторами на основе ККТ халькогенидов металлов.

Авторский вклад

Михайлов Иван Игоревич – создание экспериментальных образцов; редактирование статьи; анализ литературы.

Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой; планирование работ; редактирование статьи.

Дегтерев Александр Эдуардович – исследование характеристик ККТ; редактирование статьи; анализ литературы.

Романович Мария Михайловна – исследование ВАХ экспериментальных структур; редактирование статьи.

Павлова Марина Дмитриевна – анализ литературы; редактирование статьи.

Курочкина Маргарита Анатольевна – исследование характеристик ККТ; анализ литературы; редактирование статьи.

Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и планирование научных исследований; редактирование статьи.

Кузьмина Ульяна Анатольевна – анализ литературы; редактирование статьи.

Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Ivan I. Mikhailov, creation of experimental samples; article editing; literature analysis.

Ivan A. Lamkin, scientific work management; work planning; article editing.

Aleksander E. Degterev, study of colloidal quantum dots (CQD) characteristics; article editing; literature analysis.

Maria M. Romanovich, study of volt-ampere characteristics of the experimental structures; article editing.

Marina D. Pavlova, literature analysis; article editing.

Marharyta A. Kurachkina, study of CQD characteristics; literature analysis; article editing.

Sergey A. Tarasov, problem setting and research planning; article editing.

Ulyana A. Kuzmina, literature analysis; article editing.

All authors participated in the discussion of the results and in the preparation of the article.

Список литературы

1. Influence of the Formation Parameters of Phthalocyanine: Fullerene Nanocomposite Layer on the Photoelectric Characteristics of ZnPc: C60/C60 Structures / M. D. Pavlova, A. E. Degterev, I. A. Lamkin, S. A. Tarasov // *Semiconductors*. 2020. Vol. 54, № 13. P. 1800–1804. doi: 10.1134/S1063782620130114
2. Ways to Slow down the Degradation and Enhance the Stability of Perovskite Solar Cells / A. E. Degterev, M. M. Romanovich, I. I. Mikhailov, I. A. Lamkin, S. A. Tarasov // *Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021)*, St Petersburg, 26–29 Jan. 2021. IEEE, 2021. P. 1301–1304. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396607
3. Charles U. A., Ibrahim M. A., Teridi M. A. M. Electrodeposition of organic–inorganic tri-halide perovskites solar cell // *J. of Power Sources*. 2018. Vol. 378. P. 717–731. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.075
4. Optimized thin-film organic solar cell with enhanced efficiency / W. Farooq, M. A. Musarat, J. Iqbal, S. A. A. Kazmi, A. D. Khan, W. S. Alaloul, A. O. Vaarimah, A. F. Elnaggar, S. S. M. Ghoneim, N. R. Ghaly // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 23. P. 13087. doi: 10.3390/su132313087
5. Calculation of relative fluorescence quantum yield and Urbach energy of colloidal CdS QDs in various easily accessible solvents / D. Kandi, S. Mansingh, A. Behera, K. Parida // *J. of Luminescence*. 2021. Vol. 231. № 117792. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117792
6. Yifat Y., Ackerman M., Guyot-Sionnest P. Mid-IR colloidal quantum dot detectors enhanced by optical nano-antennas // *Appl. Physics Lett.* 2017. Vol. 110, № 4. P. 041106. doi: 10.1063/1.4975058
7. Kojima T., Sugimoto H., Fujii M. Size-Dependent Photocatalytic Activity of Colloidal Silicon Quantum Dot // *J. of Physical Chemistry C*. 2018. Vol. 122, № 3. P. 1874–1880. doi: 10.1021/acs.jpcc.7b10967
8. Low-Cost Solution-Processed MoS₂ Quantum Dots-Based Deep UV Photodetector for Monitoring Disinfection // P. K. Gupta, U. Pandey, B. N. Pal, A. Pandey // *IEEE Trans. on Electron Devices*. 2022. Vol. 69, № 5. P. 2474–2480. doi: 10.1109/TED.2022.3161885
9. Organic light-emitting Diodes with colloidal quantum Dots in the active Layer // A. E. Degterev, I. I. Mikhailov, I. A. Lamkin, S. A. Tarasov // 6th Intern. School and Conf. "Saint Petersburg OPEN 2019": Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, Saint Petersburg, 22–25 Apr. 2019. *J. of Physics: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1410. P. 012115. doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012115
10. Николенко Л. М., Разумов В. Ф. Коллоидные квантовые точки в солнечных элементах // *Успехи химии*. 2013. Т. 82, № 5. С. 429–448.
11. Colloidal quantum Dot based Photonic Devices / N. Okoye, D. Goldberg, S. Husaini, Y. Fein, V. M. Menon // *IEEE Winter Topicals, WTM 2011, Keystone, CO, USA*, 10–12 Jan. 2011. P. 51–52. doi: 10.1109/PHOTWTM.2011.5730041
12. Korbutyak D. V., Kalytchuk S. M., Geru I. I. Colloidal CdTe and CdSe quantum Dots: Technology of preparing and optical properties // *J. of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2009. Vol. 4, № 1. P. 174–179. doi: 10.1166/jno.2009.1019
13. Матюшкин Л. Б., Мошников В. А. Технология получения коллоидных квантовых точек, плазмонных наночастиц и гибридных структур на их основе // *Материалы пятой междунар. конф. стран СНГ "Золь-гель синтез и исследование неорганических соединений, гибридных функциональных материалов и дисперсных систем"*, СПб., 27–31 авг. 2018. С. 37–38.
14. A new Approach to modelling Quantum Dot Concentrators / A. J. Chatten, K. W. J. Barnham, B. F. Buxton, N. J. Ekins-Daukesa, M. A. Malick // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2003. Vol. 75, № 3–4. P. 363–371.
15. High-performance luminescent solar Concentrators based on the Core/shell CdSe/ZnS Quantum Dots composed into thiol-ene Polymer / X. Cao, Z. Zheng, Y. Zhang, G. Gu, J. Miao, R. Huang, D. Hou, Y. Tian, X. Zhang // *J. of Luminescence*. 2022. Vol. 252. P. 119368. doi: 10.1016/j.jlumin.2022.119368
16. Gallagher S. J., Norton B., Eames P. C. Quantum Dot solar Concentrators: Electrical conversion efficiencies and comparative concentrating Factors of fabricated Devices // *Solar Energy*. 2007. Vol. 81, № 6. P. 813–821. doi: 10.1016/j.solener.2006.09.011
17. Шамилов Р. Р., Галяметдинов Ю. Г. Композиты полиметилметакрилата на основе квантовых точек CdSe и CdSe/CdS, синтезированных в водно-этанольной среде // *Вестн. Казанского технол. унта*. 2013. Т. 16, № 15. С. 322–324.

18. Verbunt P. P. C., Debije M. G. Progress in luminescent solar concentrator research: solar energy for the built environment // Electronic Conf. Proc. Linköping. 2011. Vol. 56. P. 2751–2758. doi: 10.3384/ecp110572751

Информация об авторах

Михайлов Иван Игоревич – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2013), магистр-инженер; ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – электроника, фотоника; солнечная энергетика; органические светодиоды; коллоидные квантовые точки.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: iimihalov@gmail.com

Ламкин Иван Анатольевич – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 85 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; контакты металл-полупроводник; вакуумная технология.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ialamkin@etu.ru

Дегтерев Александр Эдуардович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирант 3-го года обучения, ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 29 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aedegterev@etu.ru

Романович Мария Михайловна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирантка 3-го года обучения, ассистент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 19 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; агрофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: mmromanovich@etu.ru

Павлова Марина Дмитриевна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), аспирантка 2-го года обучения кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; органические фоточувствительные структуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: mdpavlova@etu.ru

Курочкина Маргарита Анатольевна – кандидат физ.-мат. наук (2017), научный сотрудник Университета прикладных наук Бранденбурга. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – фотоника; микрофлюидика; композиты; сенсоры; лазерная модификация поверхности.

Адрес: Университет прикладных наук Бранденбург, ул. Магдебургер, д. 50, Бранденбург-на-Гавеле, 14770, Германия
E-mail: marharyta.kurachkina@th-brandenburg.de

Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; светоизлучающие и фоточувствительные приборы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: satarasov@etu.ru

Кузьмина Ульяна Анатольевна – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2021), аспирантка 2-го года обучения кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: uakuzmina@stud.eltech.ru

References

1. Pavlova M. D., Degterev A. E., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Influence of the Formation Parameters of Phthalociane: Fullerene Nanocomposite Layer on the Photoelectric Characteristics of ZnPc:C60/C60 Structures. *Semiconductors*. 2020, vol. 54, no. 13, pp. 1800–1804. doi: 10.1134/S1063782620130114
2. Degterev A. E., Romanovich M. M., Mikhailov I. I., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Ways to Slow Down the Degradation and Enhance the Stability of Perovskite Solar Cells. *Proc. of the 2021 IEEE Conf. of Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2021)*, Saint Petersburg, 26–29 Jan. 2021, pp. 1301–1304. doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396607
3. Charles U.A., Ibrahim M.A., Teridi M.A.M. Electrodeposition of Organic–Inorganic Tri-Halide Perovskites Solar Cell. *J. of Power Sources*. 2018, vol. 378, pp. 717–731. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.075
4. Farooq W., Musarat M. A., Iqbal J., Kazmi S. A. A., Khan A. D., Alaloul W. S., Baarimah A. O., Elnaggar A. F., Ghoneim S. S. M., Ghaly N. R. Optimized Thin-Film Organic Solar Cell with Enhanced Efficiency. *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 23, p. 13087. doi: 10.3390/su132313087
5. Kandi D., Mansingh S., Behera A., Parida K. Calculation of Relative Fluorescence Quantum Yield and Urbach Energy of Colloidal CdS QDs in Various Easily Accessible Solvents. *J. of Luminescence*. 2021, vol. 231, p. 117792. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117792
6. Yifat Y., Ackerman M., Guyot-Sionnest P. Mid-IR Colloidal Quantum Dot Detectors Enhanced by Optical Nano-Antennas. *Applied Physics Lett.* 2017, vol. 110, no. 4, p. 041106. doi: 10.1063/1.4975058
7. Kojima T., Sugimoto H., Fujii M. Size-Dependent Photocatalytic Activity of Colloidal Silicon Quantum Dot. *Journal of Physical Chemistry C*. 2018, vol. 122, no. 3, pp. 1874–1880. doi: 10.1021/acs.jpcc.7b10967
8. Gupta P. K., Pandey U., Pal B. N., Pandey A. Low-Cost Solution-Processed MoS₂ Quantum Dots-Based Deep UV Photodetector for Monitoring Disinfection. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2022, vol. 69, no. 5, pp. 2474–2480. doi: 10.1109/TED.2022.3161885
9. Degterev A. E., Mikhailov I. I., Lamkin I. A., Tarasov S. A. Organic Light-Emitting Diodes with Colloidal Quantum Dots in the Active Layer. *J. of Physics: Conf. Series: 6th Intern. School and Conf. "Saint Petersburg OPEN 2019": Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, Saint Petersburg, 22–25 Apr. 2019, vol. 1410, p. 012115. doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012115
10. Nikolenko L.M., Razumov V.F. Colloidal Quantum Dots in Solar Cells. *Russian Chemical Reviews*. 2013, vol. 82, no. 5, pp. 429–448. doi: 10.1070/RC2013v082n05ABEH004337
11. Okoye N., Goldberg D., Husaini S., Fein Y., Menon V.M. Colloidal Quantum Dot Based Photonic Devices. *IEEE Winter Topicals, WTM 2011, Keystone, CO*, 10–12 Jan. 2011, pp. 51–52. doi: 10.1109/PHOTWTM.2011.5730041
12. Korbutyak D. V., Kalytchuk S. M., Geru I. I. Colloidal CdTe and CdSe Quantum Dots: Technology of Preparing and Optical Properties. *J. of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2009, vol. 4, no. 1, pp. 174–179. doi: 10.1166/jno.2009.1019
13. Matyushkin L. B., Moshnikov V. A. *Tekhnologiya polucheniya kolloidnykh kvantovykh toчек, plazmonnykh nanochastice i gibridnykh struktur na ih osnove* [Technology for Obtaining Colloidal Quantum Dots, Plasmonic Nanoparticles and Hybrid Structures Based on Them]. *Proc. of the 5th Intern. Conf. of the CIS Countries "Sol-gel Synthesis and Study of Inorganic Compounds, Hybrid Functional Materials and Disperse Systems"*, St Petersburg, 27–31 Aug. 2018, pp. 37–38. (In Russ.)
14. Chatten A. J., Barnham K. W. J., Buxton B. F., Ekins-Daukesa N. J., Malik M. A. A New Approach to Modelling Quantum Dot Concentrators. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2003, vol. 75, no. 3–4, pp. 363–371.
15. Cao X., Z. Zheng, Zhang Y., Gu G., Miao J., Huang R., Hou D., Tian Y., Zhang X. High-Performance Luminescent Solar Concentrators Based on the Core/Shell CdSe/ZnS Quantum Dots Composed into Thiol-Ene Polymer. *J. of Luminescence*. 2022, vol. 252, p. 119368. doi: 10.1016/j.jlumin.2022.119368
16. Gallagher S. J., Norton B., Eames P. C. Quantum Dot Solar Concentrators: Electrical Conversion Efficiencies and Comparative Concentrating Factors of Fabricated Devices. *Solar Energy*. 2007, vol. 81, no. 6, pp. 813–821. doi: 10.1016/j.solener.2006.09.011
17. Shamilov R. R., Galyametdinov Yu. G. *Kompozity polimetilmetakrilata na osnove kvantovykh toчек CdSe i CdSe/CdS, sintezirovannykh v vodno-etanol'noj srede* [Polymethylmethacrylate Composites Based on CdSe and CdSe/CdS Quantum Dots Synthesized in an Aqueous–Ethanol Medium]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013, vol. 16, no. 15, pp. 322–324. (In Russ.)
18. Verbunt P. P. C., Debije M. G. Progress in Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy For The Built Environment. *Linköping, Electronic Conf. Proc.* 2011, vol. 56, pp. 2751–2758. doi: 10.3384/ecp110572751

Information about the authors

Ivan I. Mikhailov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2013), Assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; organic light-emitting diodes; colloidal quantum dots.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: iimihalov@gmail.com

Фоточувствительные структуры с каскадными концентраторами излучения на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов металлов
Photo-sensitive Structures with Cascade Radiation Concentrators Based on Colloidal Quantum Dots of Metal Chalcogenides

Ivan A. Lamkin, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 85 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; physics and optics of semiconductors; metal-semiconductor contacts; vacuum technology.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ialamkin@etu.ru

Alexander E. Degterev, Master in Electronics and Nanoelectronics (2020), Postgraduate Student, Assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 29 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aedegterev@etu.ru

Maria M. Romanovich, Master in Electronics and Nanoelectronics (2020), Postgraduate Student, Assistant of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 19 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; agrophotonics.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: mmromanovich@etu.ru

Marina D. Pavlova, Master in Electronics and Nanoelectronics (2019). Postgraduate Student of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy organic photosensitive structures.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: mdpavlova@etu.ru

Marharyta A. Kurachkina, PhD (Phys.-Math.) (2017), Researcher of the Department of Technology of University of Applied Sciences Brandenburg (Germany). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: photonics; microfluidics; composites; sensors; laser surface modification.
Address: University of Applied Sciences Brandenburg, 50, Magdeburger St., Brandenburg an der Havel 14770, Germany
E-mail: marharyta.kurachkina@th-brandenburg.de

Sergey A. Tarasov, Dr Sci. (Eng.) (2016), Head of the Department of Photonics of. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy; physics and optics of semiconductors; light-emitting and photosensitive devices.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: satarasov@etu.ru

Ulyana A. Kuzmina, Master in Electronics and Nanoelectronics (2021), Postgraduate Student of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solar energy organic photosensitive structures.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: uakuzmina@stud.eltech.ru
