

Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2834>

Поступила в редакцию 19.02.2020

Принята к публикации 15.04.2020

Опубликована онлайн 25.06.2020

ISSN 1606-867X

eISSN 2687-0711

УДК 546.161+546.05+535.37

Исследование люминесценции твердых растворов на основе фторида иттрия, легированных иттербием и европием для фотоники

© 2020 С. В. Кузнецов^{✉а}, А. С. Низамутдинов^б, Э. И. Мадиров^б, В. А. Конюшкин^а,
А. Н. Накладов^а, В. В. Воронов^а, А. Д. Япрынцева^с, В. К. Иванов^с, В. В. Семашко^б,
П. П. Федоров^а

^аИнститут общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,
ул. Вавилова, 38, Москва 119991, Российская Федерация

^бКазанский Федеральный университет,
ул. Кремлевская, 18, Казань 420008, Российская Федерация

^сИнститут общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский пр., 31, Москва 119991, Российская Федерация

Аннотация

Подавляющая часть мирового рынка солнечных фотоэлектрических устройств основывается на кремниевых технологиях. Актуальной задачей является повышение эффективности их работы за счет использования люминесцентных покрытий, в том числе преобразующих излучение из УФ-синей области спектра в ближний инфракрасный диапазон, где кремний поглощает излучение с наибольшей эффективностью (стоксовая, или даун-конверсионная люминесценция) или из инфракрасной области спектра в ближний инфракрасный диапазон (ап-конверсионная люминесценция). Целью данного исследования были синтез и исследование спектрально-кинетических характеристик однофазных твердых растворов $Y_{1-x-y}Eu_xYb_yF_3$ и определение квантового выхода даун-конверсионной люминесценции.

Методом высокотемпературного сплавления были синтезированы однофазные образцы твердых растворов $Y_{1-x-y}Eu_xYb_yF_3$ ромбической сингонии. Для серий образцов с различным соотношением Eu^{3+}/Yb^{3+} при двойном допировании этими ионами было подтверждено образование соответствующих твердых растворов с кристаллической решеткой фазы $\beta-YF_3$. Химический состав установлен энергодисперсионным анализом и было определено, что он соответствует номинальному. Показано, что при возбуждении на длинах волн 266 и 296 нм наблюдается люминесценция как ионов Eu^{3+} , так и ионов Yb^{3+} , что свидетельствует об перспективе их использования в качестве сенсификаторов УФ излучения. При этом при возбуждении на длине волны 266 нм регистрируется люминесценция ионов Eu^{2+} . Максимальные квантовые выходы даун-конверсионной люминесценции иттербия в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн со значением 2.2 % при возбуждении на длине волны 266 нм были зарегистрированы для $YF_3:Eu:Yb$ при соотношениях $Eu^{3+}:Yb^{3+}$ 0.1:10.0 и 0.05:5.00.

Ключевые слова: фториды редкоземельных элементов, люминофоры, солнечные панели, даун-конверсионная люминесценция.

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-73-20352.

Для цитирования: Кузнецов С. В., Низамутдинов А. С., Мадиров Э. И., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Воронов В. В., Япрынцева А. Д., Иванов В. К., Семашко В. В., Федоров П. П. Исследование люминесценции твердых растворов на основе фторида иттрия, легированных иттербием и европием для фотоники. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020; 22(2): 225–231. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2834>

✉ Кузнецов Сергей Викторович, e-mail: kouznetsovsv@gmail.com



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

подавляющая часть мирового рынка солнечных фотоэлектрических устройств основывается на кремниевых технологиях. Согласно отчету Фраунгоферского Института солнечной энергии (Fraunhofer ISE) за 2017 год, широкомасштабное использование кремния основывается на доступности и дешевизне сырья, высоком совершенстве технологии производства кремния требуемой степени чистоты, его нетоксичности для человека и окружающей среды [1]. Это связано со значительным упрощением технологии очистки дешевого кремния до приемлемого уровня чистоты [2]. С 2008 по 2017 год произошло значительное снижение стоимости солнечного электричества с 3 долл. США / Вт до 0.3 долл. США / Вт [1]. Отдельно следует отметить, что вышедшие из строя солнечные панели уже сейчас можно перерабатывать как отходы электронных компонентов (*e-waste*). Это сильно отличает их от новых интенсивно разрабатываемых органо-галогенидных материалов со структурой перовскита типа $R\text{PbX}$ (R – органический радикал, X – Br или I или их твердый раствор) [3–5]. Особо следует отметить, что большинство таких веществ менее химически устойчивы и разлагаются в течение нескольких лет, а переработка тяжелых элементов требует создания отдельных производств и существенных инвестиций.

Одним из существенных недостатков кремния является низкая эффективность преобразования (менее 25 % даже для лучших образцов [6, 7]) солнечного света в электричество. В реальности в РФ на одном из крупнейших заводов по созданию кремниевых солнечных панелей в городе Новочебоксарске достигнут КПД генерации солнечной энергии 22.5 %. Существуют различные возможности для повышения эффективности кремниевых солнечных элементов за счет использования многослойных структур, структур с различной архитектурой поверхности и люминесцентных покрытий [8, 9]. Спектр fotocувствительности и максимальная генерация электричества кремнием не совпадают со спектром Солнца [6]. Максимальная светочувствительность кремния находится в области 900–1100 нм, что совпадает со спектральным диапазоном излучения трехвалентных ионов иттербия. В результате возможно повышение эффективности солнечно-кремниевого фотоэлектрического элемента с использованием люминесцентных покрытий.

Для этих целей предлагается использовать люминофоры, которые за счет каскада различ-

ных процессов, например, ступенчатых переходов между состояниями соответствующих ионов, передачи энергии, либо за счет кооперативных процессов преобразуют излучение из УФ-синей области спектра (даун-конверсионная люминесценция) [6–11] или из ИК-области (ап-конверсионная люминесценция) [12–14] в ближний инфракрасный диапазон, где кремний поглощает излучение с наибольшей эффективностью [6].

Квантовый выход ап-конверсионной люминесценции в видимом диапазоне света или ближнем инфракрасном диапазоне света при возбуждении в диапазоне 1.5–2.0 мкм является очень низким [15–17], поскольку два низкоэнергетических ИК-фотона должны преобразовываться в один фотон в ближнем инфракрасном диапазоне света (БИК). Квантовая эффективность даун-конверсионной люминесценции выше, потому что один ультрафиолетовый или видимый фотон высокой энергии преобразуется в один или два БИК-фотона. Квантовая эффективность даун-конверсионной люминесценции во фторидных люминофорах неоднократно исследовалась для различных матриц [18, 19], но при этом не проводилась оценка квантового выхода, что важно для практических применений.

Целью данного исследования были синтез и исследование спектрально-кинетических характеристик твердых растворов $\text{Y}_{1-x-y}\text{Eu}_x\text{Yb}_y\text{F}_3$, определение квантовой эффективности и квантового выхода даун-конверсионной люминесценции иттербия в ближнем инфракрасном диапазоне.

2. Методика эксперимента

Образцы твердых растворов на основе фторида иттрия, легированные иттербием и европием, были синтезированы методом высокотемпературного сплавления. Фторид иттрия, фторид европия, фторид иттербия были 99.99 % марки чистоты (ЛАНХИТ, Россия). Образцы твердых растворов $\text{Y}_{1-x-y}\text{Eu}_x\text{Yb}_y\text{F}_3$ были синтезированы в вакуумной печи при температуре 1155 °С. Шихту помещали в вакуумную печь в графитовом тигле и постепенно нагревали до 940 °С, затем отключали вакуумную откачку, напускали смесь газов (CF_4 и Ar) и проводили плавный нагрев до температуры плавления. Полученный расплав фторировался и выдерживался при температуре процесса в течение 30 минут, затем проводилось охлаждение до комнатной температуры в течение 3 часов. Полученные образцы плавок были измельчены в агатовой ступке.

Все образцы были исследованы рентгенофазовым анализом на дифрактометре Bruker D8 Advanced (CuK α излучение), параметры решетки рассчитывали в программе Powder 2.0 ($\Delta Q < 10$). Химический состав был оценен на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss NVision 40 с энергодисперсионным спектрометром. Спектры диффузного отражения были зарегистрированы на спектрофотометре Lambda 950 Perkin Elmer. Спектры люминесценции были зарегистрированы на спектрометре Stellarnet EPP2000 со спектральным разрешением 0.5 нм. В качестве импульсного источника возбуждения использовалась лазерная система с перестройкой длины волны на основе лазера Al₂O₃:Ti с генераторами второй и третьей гармоник (LOTIS ТП, 10 Гц, 10 нс), а также преобразователь длины волны на основе вынужденного комбинационного рассеяния в газообразном Н₂. Кинетики люминесценции регистрировали с использованием монохроматоров МДР-23 и МДР-3, в качестве фотодетектора в видимой области спектра был использован ФЭУ-100, в ИК области спектра ФЭУ-62. Временная развертка сигналов кинетики люминесценции осуществлялась цифровым осциллографом BORDO с полосой пропускания 200 МГц и динамическим диапазоном 10 бит. Прямое измерение квантового выхода стоксовой люминесценции осуществлялось при помощи интегрирующей сферы Thorlabs IS200 и спектрометра SOLAR S100, откалиброванных с использованием лампы ТРШ-2850 и оптического фильтра ЖС-16. При измерении квантового выхода люминесценции была использована методика из работы [20], предполагающая исправление спектральной характеристики системы регистрации люминесценции и калибровку опти-

ческой системы с использованием источников света с заданной интенсивностью.

3. Результаты

Рентгенограмма однофазного образца твердого раствора Y_{0.949}Eu_{0.001}Yb_{0.05}F₃, которая является типичной для всей серии образцов, представлена на рис. 1, а результаты индиферирования в ромбической сингонии (структурный тип β -YF₃) сведены в табл. 1. Образование твердого раствора подтверждается отсутствием дополнительных пиков по сравнению с соответствующими данными JCPDS и изменением параметров решетки от нелегированного образца: YF₃ ($a = 6.353 \text{ \AA}$, $b = 6.850 \text{ \AA}$, $c = 4.393 \text{ \AA}$, JCPDS card # 74-0911).

Анализ химического состава был проведен на основании энергодисперсионного анализа (табл. 1), результаты которого показали соответствие реального состава номинальному в

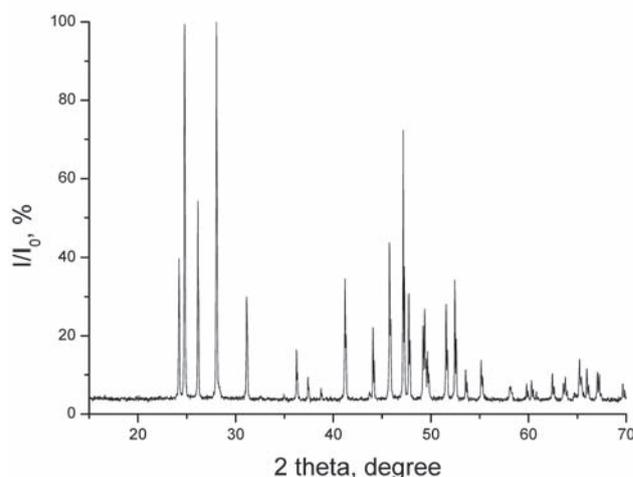


Рис. 1. Рентгенограмма образца твердого раствора Y_{0.949}Eu_{0.001}Yb_{0.05}F₃

Таблица 1. Параметры решетки и результаты энергодисперсионного анализа твердых растворов Y_{1-x-y}Eu_xYb_yF₃.

Номинальный состав	Y _{1-x-y} Eu _x Yb _y F ₃			Состав по EDX
	Параметры решетки, Е			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
YF ₃ :Eu(0.05 мол.%):Yb(1.0 мол.%)	6.365(1)	6.859(2)	4.3909(7)	YF ₃ :Eu(0.2 мол.%):Yb(2.1 мол.%)
YF ₃ :Eu(0.1 мол.%):Yb(5.0 мол.%)	6.345(2)	6.839(3)	4.384(1)	YF ₃ :Eu(0.4 мол.%):Yb(6.4 мол.%)
YF ₃ :Eu(0.1 мол.%):Yb(1.0 мол.%)	6.342(2)	6.838(2)	4.3862(9)	YF ₃ :Eu(0.2 мол.%):Yb(1.9 мол.%)
YF ₃ :Eu(0.05 мол.%):Yb(10.0 мол.%)	6.339(2)	6.834(2)	4.384(1)	YF ₃ :Eu(*)Yb(12.9 мол.%)
YF ₃ :Eu(0.05 мол.%):Yb(5.0 мол.%)	6.348(1)	6.842(2)	4.3859(9)	YF ₃ :Eu(0.1 мол.%):Yb(7.1 мол.%)
YF ₃ :Eu(0.1 мол.%):Yb(10.0 мол.%)	6.3597(8)	6.851(1)	43891(6)	YF ₃ :Eu(0.1 мол.%):Yb(13.7 мол.%)

* – концентрация европия была не была определена, так как она ниже предела обнаружения методом энергодисперсионного анализа.

пределах ошибки определения, составляющей ± 0.5 мол. %.

Для образцов YF_3 , легированных ионами Eu и Yb , была зарегистрирована люминесценция ионов Eu^{3+} как при возбуждении в характерный для европия переход в области 399 нм, так и при возбуждении в УФ области спектра (296 и 266 нм). На представленных на рис. 2 соответствующих спектрах видны характерные для Eu^{3+} переходы ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_n$ (691, 650, 615, 590 нм), ${}^5\text{D}_1 - {}^7\text{F}_n$ (568, 556, 537, 526 нм), ${}^5\text{D}_2 - {}^7\text{F}_n$ (511, 489, 464 нм) [21]. Кроме того, при возбуждении на 266 нм наблюдается достаточно интенсивная и широкая полоса люминесценции с максимумом в области 430 нм, что мо-

жет соответствовать межконфигурационным переходам $5d-4f$ ионов Eu^{2+} [22]. Важным является, что люминесценция ионов Yb^{3+} наблюдалась лишь при возбуждении на 266 и 296 нм (рис. 2), причем в первом случае она оказалась интенсивнее.

Кинетики люминесценции ионов Eu^{3+} на длине волны 615 нм и Yb^{3+} на длине волны 1020 нм при возбуждении на длине волны 266 нм для матрицы YF_3 представлены на рис. 3. Затухание люминесценции носит неэкспоненциальный характер, в том числе для ионов Yb^{3+} при увеличении концентрации Eu^{3+} . При этом кинетику затухания люминесценции Eu^{3+} можно разделить на быструю компоненту, которая укорачивается

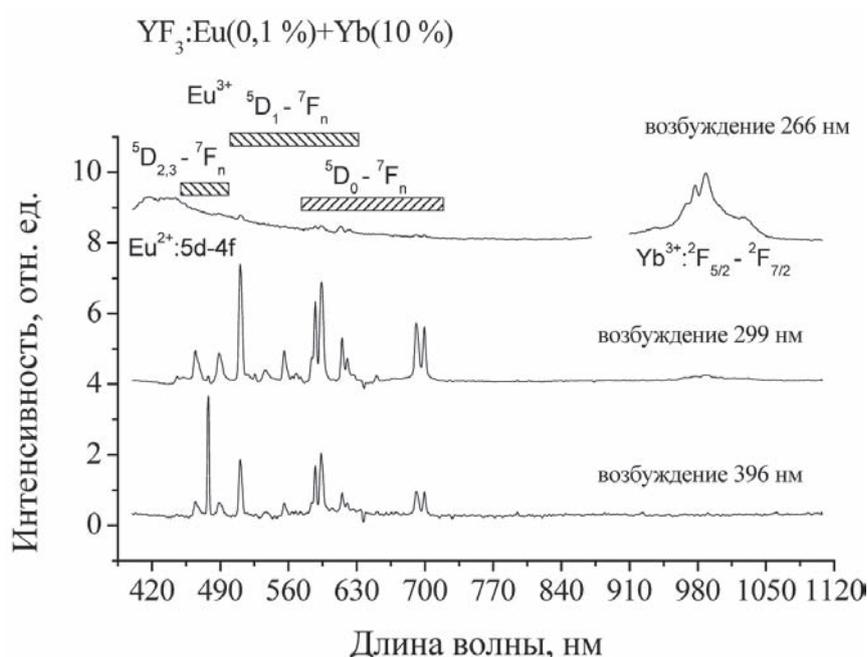


Рис. 2. Спектры люминесценции образцов $\text{YF}_3:\text{Eu}:\text{Yb}$ при возбуждении на длинах волн 399, 296, 266 нм

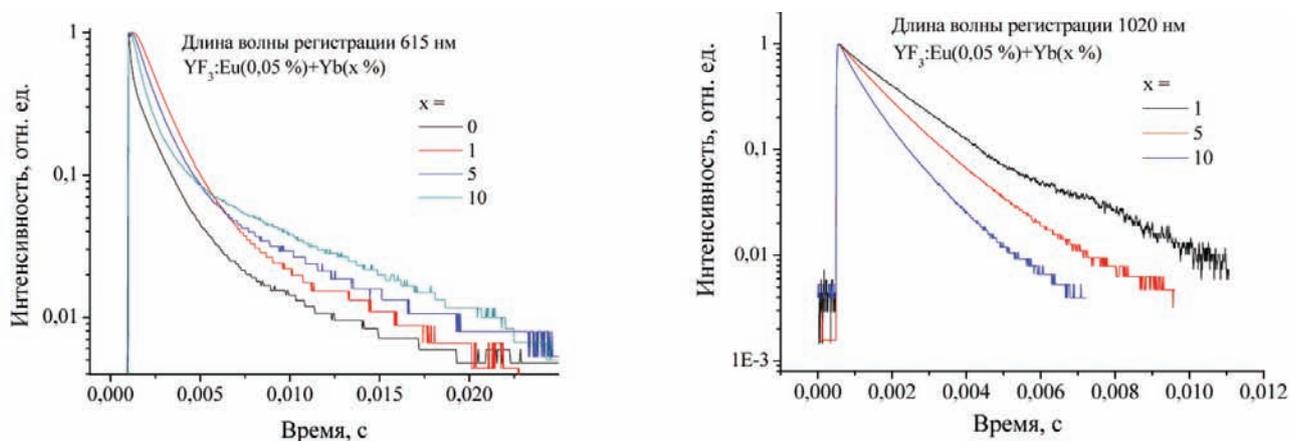


Рис. 3. Кинетики люминесценции ионов Eu^{3+} и Yb^{3+} в образцах YF_3 при возбуждении на длине волны 266 нм

при увеличении концентрации Yb^{3+} и медленную, которая становится дольше. По-видимому, быстрой компоненте соответствует излучательное время жизни люминесценции Eu^{3+} , которое испытывает тушение за счет передачи энергии ионам Yb^{3+} . В то время как медленная компонента обусловлена каким-либо каналом подпитки населенности состояния $^5\text{D}_0$ ионов Eu^{3+} . Для оценки времени жизни люминесценции было использовано среднее время жизни, вычисленное по формуле (1) [23]:

$$t_{\text{avg}} = \frac{\int t \cdot I(t) dt}{\int I(t) dt}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – зависимость интенсивности люминесценции от времени, t – время.

Оцененные средние времена жизни люминесценции показывают, что концентрационное тушение в значительной степени проявляется для ионов Yb^{3+} (табл. 2). При этом уменьшение времени жизни люминесценции в ИК области при увеличении количества ионов Eu^{3+} незначительно, что свидетельствует о незначительном влиянии передачи энергии обратно на ионы Eu^{3+} для матрицы YF_3 , механизм которой описан в работе [24].

С помощью интегрирующей сферы были определены значения квантового выхода люминесценции ионов Yb^{3+} (QY) при возбуждении образцов в области 266 нм (табл. 3). Максимальные значения зарегистрированы для соотношений Eu и Yb 0.1:10.0 и 0.05:5.00 для YF_3 (QY = 2.2 %).

4. Заключение

Методом высокотемпературного сплавления были синтезированы однофазные образцы твер-

дых растворов $\text{Y}_{1-x-y}\text{Eu}_x\text{Yb}_y\text{F}_3$ с различным количеством катионов Eu^{3+} и Yb^{3+} . Порошкообразные образцы этих кристаллов были охарактеризованы методами рентгеновской дифрактометрии, энергодисперсионного анализа и оптической люминесцентной спектроскопии. Для всех образцов подтверждено соответствие структурному типу $\beta\text{-YF}_3$. Монотонное изменение параметров решетки свидетельствует об образовании твердых растворов той же фазы, при этом отклонение реального состава от номинального не превышало ± 0.5 мол.%. Исследование люминесценции образцов, допированных одновременно ионами Eu^{3+} и Yb^{3+} , показало характерные для этих соединений спектры люминесценции ионов Eu^{3+} и Yb^{3+} , причем при возбуждении на длинах волн 266 и 296 нм регистрируется люминесценция обоих ионов. Также показано, что при возбуждении на длине волны 266 нм появляется широкая полоса люминесценции с центром около 430 нм, которая может быть обусловлена $5d-4f$ переходами ионов Eu^{2+} . Это приводит к тому, что кинетики затухания люминесценции ионов Eu^{3+} значительно отличаются от экспоненциальных. В кинетиках люминесценции можно выделить короткую компоненту, время жизни которой уменьшается при увеличении количества ионов Yb^{3+} , и длинную, время жизни которой увеличивается. Наиболее вероятно, что имеет место передача энергии от ионов Eu^{3+} к ионам Yb^{3+} . С использованием интегрирующей сферы был измерен квантовый выход люминесценции ионов Yb^{3+} при возбуждении на длине волны 266 нм. Максимальные квантовые выходы даун-конверсионной люминесценции были зарегистрированы для соотношений Eu и Yb 0.10:10.00 и 0.05:5.00 для YF_3 (QY = 2.2 %).

Таблица 2. Среднее время жизни люминесценции при регистрации на длине волны 615 нм и 1020 нм в образцах $\text{YF}_3:\text{Eu}:\text{Yb}$ при возбуждении 266 нм

YF_3							
Длина волны регистрации	615 нм	615 нм	1020 нм	615 нм	1020 нм	615 нм	1020 нм
Состав	Yb 1.0 мол.%		Yb 5.0 мол.%		Yb 10.0 мол.%		
Eu 0.05 мол.%	2.6±0,1 мс	2.3±0.1 мс	1.7±0.1 мс	3.0±0.1 мс	1.3±0.1 мс	3.7±0,1 мс	1.0±0.1 мс
Eu 0.1 мол.%	2.8±0.1 мс	2,1±0.1 мс	1.6±0.1 мс	2,7±0.1 мс	1.3±0.1 мс	3.5±0.1 мс	1.1±0.1 мс

Таблица 3. Квантовый выход люминесценции Yb^{3+} образцах $\text{YF}_3:\text{Eu}:\text{Yb}$ при возбуждении 266 нм

$\text{YF}_3:\text{Yb}:\text{Eu}$			
Состав	Yb 1.0 мол.%	Yb 5.0 мол.%	Yb 10.0 мол.%
Eu 0.05 мол.%	1.0 %	2.2 %	1.6 %
Eu 0.10 мол.%	1.0 %	1.1 %	2.2 %

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

- Weber E. R. Photovoltaics moving into the terawatt age. In: *Proc. SPIE 10368, Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion VIII*. 2017;10368: 1036803. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2277978>
- Seibt M., Kveder V. Gettering Processes and the Role of Extended Defects. In: *Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications*. John Wiley & Sons, Ltd; 2012. pp. 127–188. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118312193.ch4>
- Turkevych I., et al. Strategic advantages of reactive polyiodide melts for scalable perovskite photovoltaics. *Nature Nanotechnology*. 2019;14(1): 57–63. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0304-y>
- Abdollahi Nejand B., et al. Vacuum-assisted growth of low-bandgap thin films (FA 0.8 MA 0.2 Sn 0.5 Pb 0.5 I 3) for all-perovskite tandem solar cells. *Advanced Energy Materials*. 2020;10(5): 1902583. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201902583>
- Im J. H., et al. 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell. *Nanoscale*. 2011;3(10): 4088–4093. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1NR10867K>
- Huang X., Sanyang H., Wei H., Xiaogang L. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chemical Society Reviews*. 2013;42(1): 173–201. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2CS35288E>
- Trupke T., Green M. A., Würfel P. Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons. *Journal of Applied Physics*. 2002;92(3): 1668–1674. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1492021>
- Yao H., Shen H., Tang Q. Highly luminescent up/down conversion thin films prepared by a room temperature process. *Thin Solid Films*. 2019;683: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.05.010>
- Loiko P. A., Khaidukov N. M., Mendez-Ramos J., Vilejshikova E. V., Skoptsov N. A., Yumashev K. V. Up- and down-conversion emissions from Er³⁺ doped K₂YF₅ and K₂YbF₅ crystals. *Journal of Luminescence*. 2016;170: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.10.016>
- Li L., Lou C., Cao H., Diao H., Karunakaran S. K. Enhancing concentrator monocrystalline Si solar cells by down conversion Ce³⁺-Yb³⁺ co-doped YAG phosphors. *Applied Physics Letters*. 2018;113(10): 101905. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5043221>
- Serrano D., Braud A., Doualan J.-L., Camy P., Benayad A., Menard V., Moncorge R. Ytterbium sensitization in KY₃F₁₀: Pr³⁺, Yb³⁺ for silicon solar cells efficiency enhancement. *Optical Materials*. 2011;33(7): 1028–1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.07.023>
- Fischer S., Ivaturi A., Jakob P., Krämer K. W., Martin-Rodriguez R., Meijerink A., Goldschmidt J. C. Upconversion solar cell measurements under real sunlight. *Optical Materials*. 2018;84: 389–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.05.072>
- Kuznetsov S., Ermakova Y., Voronov V., Fedorov P., Busko D., Howard I. A., Turshatov A. Up-conversion quantum yields of SrF₂:Yb³⁺, Er³⁺ sub-micron particles prepared by precipitation from aqueous solution. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018;6(3): 598–604. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7TC04913G>
- Fischer S., Ivaturi A., Jakob P., Krdmer K. W., Martin-Rodriguez R., Meijerink A., Richards B., Goldschmidt J. C. Upconversion solar cell measurements under real sunlight. *Optical Materials*. 2018;84: 389–395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.05.072>
- Lyapin A. A., Gushchin S. V., Kuznetsov S. V., Ryabochkina P. A., Ermakov A. S., V Proydakova. Yu., Voronov V. V., Fedorov P. P., Artemov S. A., Yaprntsev A. D., Ivanov V. K. Infrared-to-visible up-conversion luminescence in SrF₂:Er powders upon excitation of the ⁴I_{13/2} level. *Optical Materials Express*. 2018;8(7): 1863–1869. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.8.001863>
- Рожнова Ю. А., Кузнецов С. В., Воронов В. В., Федоров П. П. Синтез ап-конверсионных люминофоров на основе фторида стронция, легированного Ho³⁺ и Er³⁺, для визуализаторов двухмикронного излучения. *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2016;18(3): 408–413. Режим доступа: <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/150/107>
- Александров А. А., Маякова М. Н., Воронов В. В., Поминова Д. В., Кузнецов С. В., Баранчиков А. Е., Иванов В. К., Лысакова Е. И., Фёдоров П. П. Синтез ап-конверсионных люминофоров на основе фторида кальция. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(1): 3–10. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2524>
- Van Der Ende B. M., Aarts L., Meijerink A. Near-infrared quantum cutting for photovoltaics. *Advanced Materials*. 2009;21(30): 3073–3077. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200802220>
- Piper W. W., DeLuca J. A., Ham F. S. Cascade fluorescent decay in Pr³⁺-doped fluorides: Achievement of a quantum yield greater than unity for emission of visible light. *Journal of Luminescence*. 1974;8(4): 344–348. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-2313\(74\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0022-2313(74)90007-6)
- Yasyrkina D. S., Kuznetsov S. V., Ryabova A. V., Pominova D. V., Voronov V. V., Ermakov R. P., Fedorov P. P. Dependence of quatum yield of up-conversion luminescence on the composition of fluorite-type

solid solution $\text{NaY}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Er}_y\text{F}_4$. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013;4(5): 648–656. Available at: <http://nanojournal.ifmo.ru/en/articles-2/volume4/4-5/physics/paper07/>

21. Ding M., Lu C., Cao L., Song J., Ni Y., Xu Z. Facile synthesis of $\beta\text{-NaYF}_4\text{:Ln}^{3+}$ (Ln = Eu, Tb, Yb/Er, Yb/Tm) microcrystals with down- and up-conversion luminescence. *Journal of Materials Science*. 2013;48(14): 4989–4998. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7285-x>

22. Tao F., Wang Z., Yao L., Weili C., Li X. Synthesis and photoluminescence properties of truncated octahedral Eu-Doped YF_3 submicrocrystals or nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007;111(8): 3241–3245. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp065905z>

23. Свешников Б. Я., Широков В. В. О зависимости измерений средней длительности и выхода люминесценции в процессе тушения от закона взаимодействия молекул. *Оптика и спектроскопия*. 1962;12(5): 576–581.

24. Кузнецов С. В., Низамутдинов А. С., Пройдакова В. Ю., Мадиров Э. И., Воронов В. В., Япрынецев А. Д., Иванов В. К., Гориева В. Г., Марисов М. А., Семашко В. В., Федоров П. П. Синтез и исследование люминесценции твердых растворов $\text{Sr}_{1-x-y}\text{Yb}_x\text{Eu}_y\text{F}_{2+x+y}$ для фотоники. *Неорганические материалы*. 2019;55(10): 1092–1100. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002337X19100087>

Информация об авторах

Кузнецов Сергей Викторович, к. х. н., в. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: kouznetzovsv@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7669-1106>.

Низамутдинов Алексей Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент, Казанский федеральный университет; Казань, Российская Федерация; e-mail: anizamut-

dinov@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1559-6671>.

Мадиров Эдуард Ильдарович, аспирант, Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация; e-mail: ed.madirov@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7092-8523>.

Конюшкин Василий Андреевич, к. т. н., заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6028-8937>.

Накладов Андрей Николаевич, м. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4060-8091>.

Воронов Валерий Вениаминович, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: voronov@lst.gpi.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5029-8560>.

Япрынецев Алексей Дмитриевич, аспирант, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8166-2476>.

Иванов Владимир Константинович, д. х. н., чл.-корр. РАН, директор Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: van@igic.ras.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2343-2140>.

Семашко Вадим Владимирович, д. ф.-м. н., профессор, Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4967-1991>.

Фёдоров Павел Павлович, д. х. н., зав. отдела, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: ppfedorov@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2918-3926>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.