

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546.4'161 + 546.65'161

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10256>**Ап-конверсионная люминесценция в смешанных кристаллах  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$ , легированных ионами  $Er^{3+}$ , при возбуждении на длине волны 1532 нм**А. С. Низамутдинов<sup>1✉</sup>, С. А. Букарев<sup>2</sup>, С. В. Гушчин<sup>2</sup>, А. А. Шавельев<sup>1</sup>, М. А. Марисов<sup>1,3</sup>,  
А. А. Шакиров<sup>1</sup>, А. Г. Киямов<sup>1</sup>, А. В. Астраханцева<sup>1</sup>, А. А. Ляпин<sup>2</sup><sup>1</sup>Казанский федеральный университет,  
ул. Кремлевская, 18, Казань 420008, Российская Федерация<sup>2</sup>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,  
ул. Большевицкая, 68, Саранск 430005, Российская Федерация<sup>3</sup>Физико-технический институт им. Завойского, ФИЦ Казанского научного центра РАН,  
Сибирский проспект, 10/7, Казань 420029, Российская Федерация**Аннотация**

Повышение эффективности апконверсионных люминофоров является одной из важных задач материаловедения. В настоящей работе мы обращаемся к разупорядоченным кристаллам, а именно, твердым растворам  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$ , легированным ионами  $Er^{3+}$ , для улучшения спектральных характеристик и эффективности ап-конверсии из ближней ИК области спектра. Для исследуемых соединений измерен внешний квантовый выход ап-конверсионной люминесценции на уровне 9.4 % при плотности мощности возбуждения  $6 \text{ Вт/см}^2$  на длине волны 1532 нм при 10 ат. % легирования  $Er^{3+}$ . Также исследованные кристаллы  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  позволяют регулировать параметр коррелированной цветовой температуры в диапазоне 2384–5149 К путем изменения концентрации и плотности мощности возбуждения. Выявленные в данной работе преимущества для кристаллических соединений  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$ , такие как широкие полосы поглощения в инфракрасной области спектра, высокий внешний энергетический выход и управляемое распределение интенсивности полос люминесценции, делают их перспективными для повышения эффективности двухсторонних солнечных элементов.

**Ключевые слова:** ап-конверсионная люминесценция, внешний энергетический выход, коррелированные цветové температуры,  $Er^{3+}$ , кристаллы фторидов, твердые растворы.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030) Эксперименты по выращиванию кристаллов выполнены в рамках субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию № 0671-2020-0050.

**Для цитирования:** Низамутдинов А. С., Букарев С. А., Гушчин С. В., Шавельев А. А., Марисов М. А., Шакиров А. А., Киямов А. Г., Астраханцева А. В., Ляпин А. А. Ап-конверсионная люминесценция в смешанных кристаллах  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$ , легированных ионами  $Er^{3+}$ , при возбуждении на длине волны 1532 нм. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 387–396. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10256>

**For citation:** Nizamutdinov A. S., Bukarev S. A., Gushchin S. V., Shavelev A. A., Marisov M. A., Shakirov A. A., Kiiamov A. G., Astrakhantseva A. V., Lyapin A. A. Up-conversion luminescence in mixed crystals  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$  doped with  $Er^{3+}$  ions excited at 1532 nm. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(3): 387–396. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10256>

✉ Низамутдинов Алексей Сергеевич, e-mail: [anizamutdinov@mail.ru](mailto:anizamutdinov@mail.ru)

© Низамутдинов А. С., Букарев С. А., Гушчин С. В., Шавельев А. А., Марисов М. А., Шакиров А. А., Киямов А. Г., Астраханцева А. В., Ляпин А. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Апконверсионные материалы с повышающей конверсией, легированные редкоземельными ионами, широко используются для различных практических приложений. Эти материалы используются в качестве маркеров для обнаружения контрафактной продукции, визуализаторов лазерного излучения, твердотельных лазеров, биологических сенсоров, а также в солнечных панелях для повышения их эффективности. Фторидные матрицы характеризуются большой шириной запрещенной зоны и низкоэнергетичным спектром фоонов, что обеспечивает низкий уровень безызлучательных потерь населенности возбужденных уровней и делает их эффективными в люминесцентных и ап-конверсионных приложениях [1–4].

Одним из подходов к повышению эффективности люминофоров является исследование неупорядоченных кристаллических матриц. Во-первых, такие матрицы могут обеспечивать уширение спектральных линий, что приводит к увеличению эффективности переноса энергии между примесными ионами и эффективности ап-конверсионной люминесценции. Во-вторых, искажения кристаллической решетки могут приводить к увеличению вероятностей электронных переходов, которые относительно малы для запрещенных внутрiconфигурационных  $f-f$  переходов редкоземельных ионов. Несмотря на малые значения вероятностей,  $f-f$  переходы редкоземельных ионов широко используются, поскольку они обладают спектральными линиями в различных спектральных диапазонах. Одним из наиболее популярных люминесцентных ионов для исследования ап-конверсии является ион  $Er^{3+}$  [5, 6]. Благодаря относительно большому времени жизни возбужденных состояний и значительному проявлению процессов кросс-релаксации он обеспечивает эффективную ап-конверсию с испусканием фотонов с энергией два и выше фотонов возбуждающего излучения [7]. Высокая эффективность процесса ап-конверсии во фторидах, легированных  $Er^{3+}$ , позволяет реализовать лазерную генерацию на длинах волн около 0.55 мкм (переход  ${}^4S_{3/2} - {}^4I_{15/2}$ ) при накачке на длине волны 980 нм [8]. Также рекордное значение квантового выхода для ап-конверсионной люминесценции было измерено для пары ионов  $Er^{3+}-Yb^{3+}$  [9, 10]. Еще интереснее то, что ионы  $Er^{3+}$  позволяют возбуждать антистоксову люминесценцию при накачке на 1530 нм, где интенсивность солнечного света еще значительна, а фотоэффект в кристаллическом крем-

нии уже отсутствует. Как известно из литературы, эффективность ап-конверсионной люминесценции  $Er^{3+}$  при возбуждении на длине волны 1530 нм может быть даже выше, чем при возбуждении на длине волны 980 нм, что, вероятно, связано с более длительным временем жизни состояния  ${}^4I_{13/2}$  [11] и может обеспечить эффективный сбор энергии из-за более сильного сечения поглощения в спектральном диапазоне 1.5 мкм [11, 12]. Например, микрокристаллический порошок  $\beta$ -фазы  $NaYF_4$  с легированием 20 %  $Er^{3+}$  показал внешний квантовый выход 0.34 % при освещенности  $1090 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  ( $0.03 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$ ) светом с длиной волны 1522 нм, при включении в оптически прозрачную (показатель преломления аналогичен показателю преломления люминофоров) акриловую клеящую среду (массовое соотношение 0.4:0.6) поликристаллические образцы того же состава  $NaYF_4:Er^{3+}$  (20 %) внешний квантовый выход составил уже 2.5 % [13], и 6.5 % при включении в матрицу перфторциклобутана (ПФХБ) [14] с внешней квантовой эффективностью при облучении на длине волны 1523 нм.

Исследуемый материал относится к семейству фторидных матриц  $BaY_{2-x}F_8$ , характеризующихся моноклинной структурой и значительным колебательным уширением. Уже известно, что он обеспечивает значительную эффективность преобразования из ИК-диапазона спектра, например, измеренные значения внешнего квантового выхода (ВКВ) при возбуждении на 1557 нм 6.5 % и 4.1 % были достигнуты при плотности мощности освещения  $8.5 \text{ Вт}/\text{см}^2$  для образцов 30 %  $Er^{3+}$  и 20 %  $Er^{3+}$  соответственно [15]. Нами была исследована ап-конверсионная люминесценция смешанных кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$ , легированных ионами  $Er^{3+}$ , при возбуждении инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 1532 нм на энергетический уровень  ${}^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$ .

Целью данной работы является исследование эффективности преобразования света в кристаллах  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  из спектральной области энергий фотонов ниже максимумов фотоэффекта перовскита и кремния в ближний ИК и видимый диапазоны спектра. А именно, исследованы спектральные характеристики ап-конверсионной люминесценции и ее эффективность при лазерном возбуждении на энергетический уровень  ${}^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$ .

## 2. Методы исследования и характеристика материалов

Монокристаллы  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  (1 ат. %, 5 ат. %, 10 ат. %, 20 ат. %, 30 ат. %) выращены в

Казанском федеральном университете методом Бриджмена, заключающимся в перемещении тигля с расплавом из высокотемпературной зоны в низкотемпературную. Рост кристаллов осуществлялся в графитовых тиглях.

Спектры поглощения ионов  $Er^{3+}$  в исследуемых кристаллах фторидов регистрировали на двухлучевом спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 950 с двойным монохроматором. Спектры ап-конверсионной люминесценции ионов  $Er^{3+}$  регистрировали на спектрометрическом OL-770 VIS/NIR (спектральная ширина щели 100 мкм). Для возбуждения ап-конверсионной люминесценции ионов  $Er^{3+}$  до уровня  $^4I_{15/2}$  использовался волоконный лазер непрерывного действия с длиной волны около 1532 нм. Диаметр лазерного луча, падающего на образец, был измерен с помощью анализатора луча BEAMAGE-3.0 (GenTec-EO) и оказался равным  $420 \pm 10$  мкм.

Для расчета координат цветности и коррелированных цветовых температур (CCT) использовалась стандартная колориметрическая система CIE 1931 (X, Y).

Для определения внутреннего энергетического выхода ( $B_{in}$ ) ап-конверсионной люминесценции была разработана экспериментальная установка на основе интегрирующей сферы OL IS-670-LED и спектрометрического OL-770 VIS/NIR. Непрерывное лазерное излучение после кварцевого ахроматического деполаризатора фокусировалось на образец, расположенный в центре сферы. Спектральную мощность ап-конверсион-

ной люминесценции измеряли с помощью спектрометрического. Интегрирующая сфера и спектрометрический прибор были соединены оптическим волокном. Экспериментальная установка была скорректирована на спектральную чувствительность с помощью эталонной галогенной лампы Goosch & Housego с известной спектральной выходной мощностью. Мощность лазерного излучения, падающего на образец, измерялась с помощью измерителя мощности на основе интегрирующей сферы с высокой чувствительностью.

Внешний энергетический выход ( $B_{ex}$ ) ап-конверсионной люминесценции определялся как отношение мощности ап-конверсионной люминесценции в определенном спектральном диапазоне к мощности лазерного излучения, падающего на образец.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

### 3. Результаты экспериментов

#### 3.1. Ап-конверсионная люминесценция кристаллов $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$

В соответствии с порошковыми рентгенограммами (рис. 1) для синтезированных кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$  образцы представляли собой ту же фазу, что и их гомолог  $BaY_2F_8$ , относящийся к моноклинной системе, пространственной группе  $C12/m1$  [16]. Различия в положении рефлексов очень малы, хотя для смешанного кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8$  они немного смещены в область малых углов.

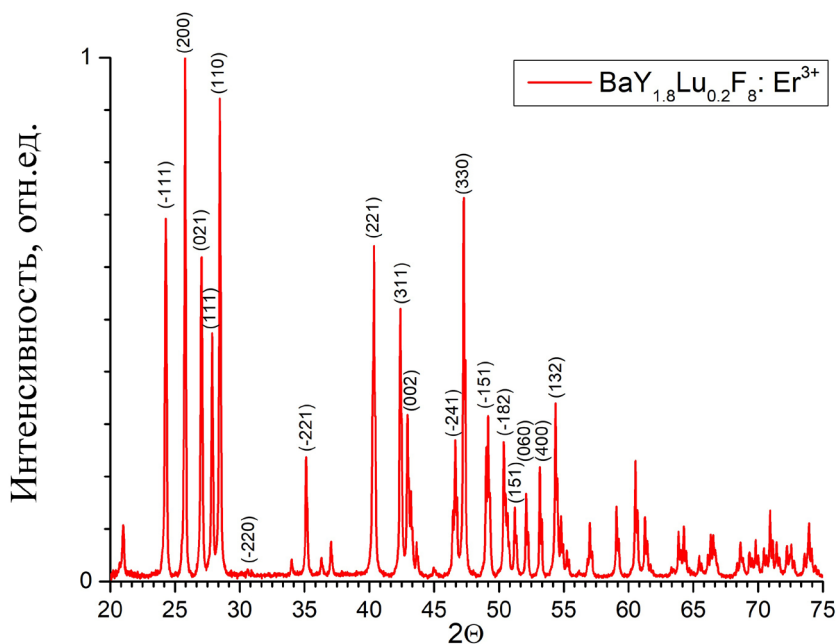


Рис. 1. Рентгенограмма кристаллического соединения  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$

Спектр поглощения кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  для электронного перехода  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$  в спектральном диапазоне 1400–1700 нм представлен на рис. 2 вместе со спектром солнечного излучения над атмосферой (спектр Солнца АМ0) и у поверхности (спектр Солнца АМ1.5) Земли. Видно, что полоса поглощения кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  значительно перекрывается со спектром солнечного излучения. Пунктирной стрелкой в спектре также показана длина волны возбуждения ап-конверсионной люминесценции на уровень  $^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$  в нашем исследовании ( $\lambda_{возб} \sim 1532$  нм).

Спектры ап-конверсионной люминесценции кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  (20 ат. %) представлены на рис. 3 и состоят из электронных переходов  $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$ . Наибольшая интенсивность люминесценции наблюдается для полосы в области 1000 нм, соответствующей  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$ .

Эволюция спектров люминесценции при изменении плотности мощности лазерного возбуждения с длиной волны 1532 нм представлена на рис. 4. Интенсивность антистоксовой люминесценции возрастает с увеличением мощно-

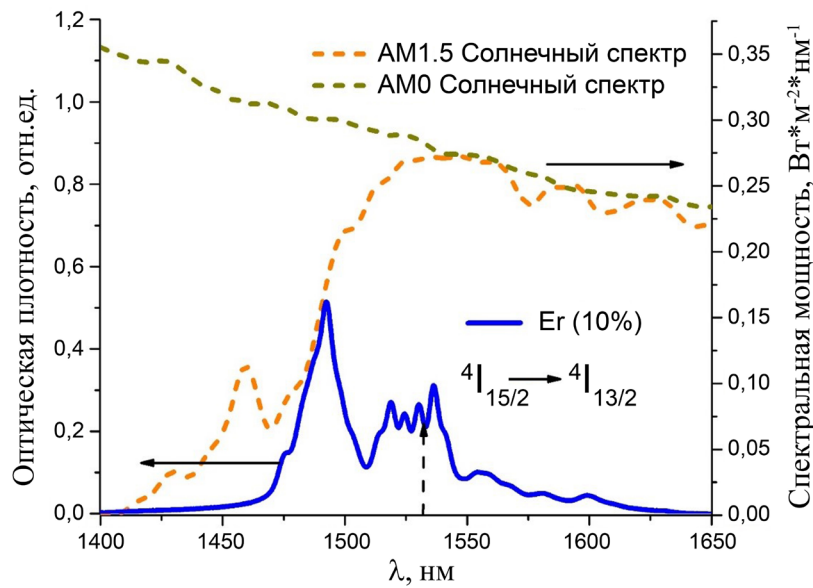


Рис. 2. Спектр поглощения кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  (10 ат. %) для перехода  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  ионов  $Er^{3+}$  и спектр солнечного излучения в атмосфере (АМ0) и на земной поверхности (АМ1.5)

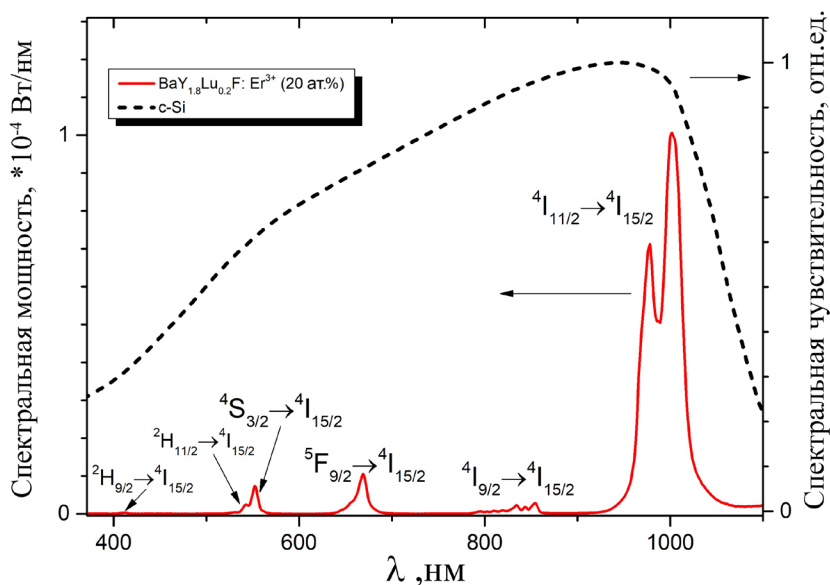
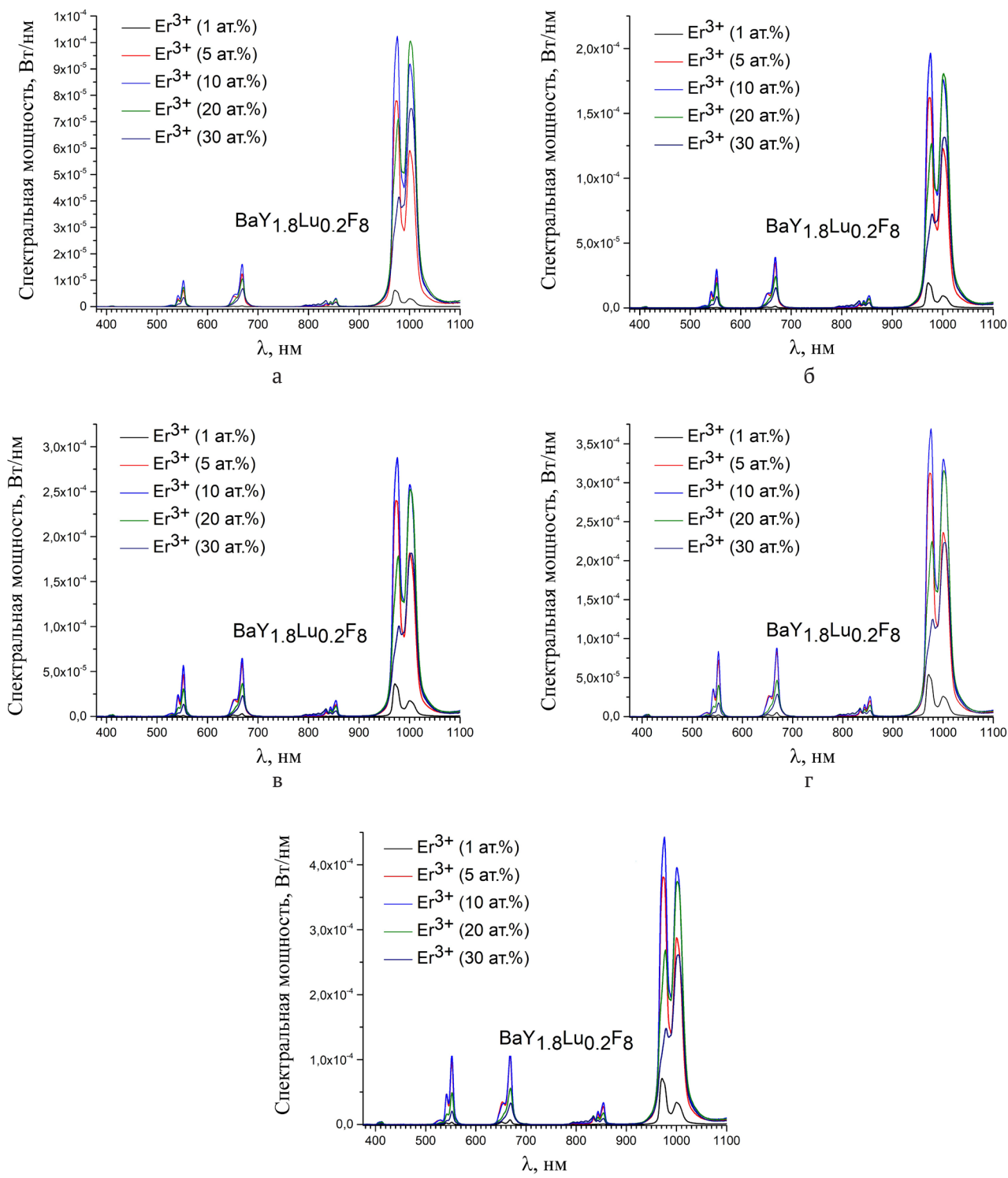


Рис. 3. Спектры ап-конверсионной люминесценции кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  (20 ат. %) и спектральная чувствительность кристаллического кремния



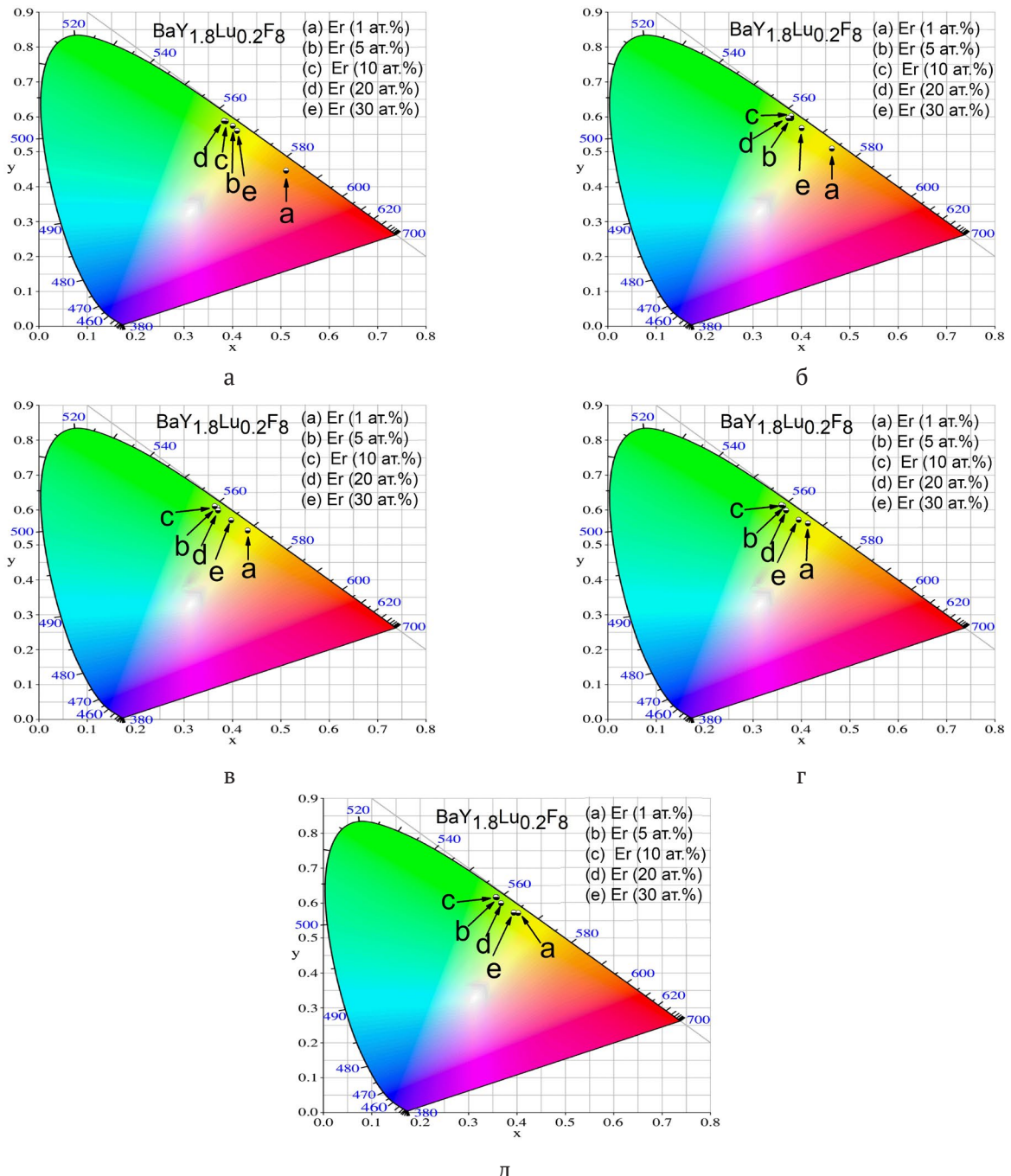
**Рис. 4.** Зависимость интенсивности ап-конверсионной люминесценции кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8 \cdot Er^{3+}$  от плотности мощности лазерного возбуждения: а) 6 Вт/см<sup>2</sup>, б) 12.7 Вт/см<sup>2</sup>, в) 19 Вт/см<sup>2</sup>, г) 25.5 Вт/см<sup>2</sup>, д) 32 Вт/см<sup>2</sup>

сти возбуждения, в исследованном диапазоне от 6 Вт/см<sup>2</sup> до 32 Вт/см<sup>2</sup> наблюдаются изменения формы спектров, которые обсуждаются далее.

Наибольшая интенсивность люминесценции для всех электронных переходов ионов  $Er^{3+}$  в диапазоне 300–1100 нм наблюдается у образца с концентрацией ионов  $Er^{3+}$  10 ат. %. Интенсивность ап-конверсионной люминесценции ионов  $Er^{3+}$  увеличивается с увеличением концент-

рации до 10 ат. %, затем наблюдается концентрационное тушение для образцов с концентрацией 20 ат. % и 30 ат. %. Такая концентрационная зависимость наблюдалась для всех значений плотности мощности возбуждения.

Исследованы параметры ССТ и координаты цветности излучения ап-конверсионных люминофоров  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$ . На рис. 5 показано положение на хроматической диаграмме ап-кон-



**Рис. 5.** Хроматическая диаграмма ап-конверсионной люминесценции кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1532 нм и плотностью мощности 6 Вт/см<sup>2</sup> (а), 12.7 Вт/см<sup>2</sup> (б), 19 Вт/см<sup>2</sup> (в), 25.5 Вт/см<sup>2</sup> (г) и 32 Вт/см<sup>2</sup> (д)

версионной люминесценции исследуемых кристаллов при возбуждении лазерным излучением с плотностью мощности 6 Вт/см<sup>2</sup>, 12.7 Вт/см<sup>2</sup>, 19 Вт/см<sup>2</sup>, 25.5 Вт/см<sup>2</sup> и 32 Вт/см<sup>2</sup>. Значения температур ССТ и цветности представлены в табл. 1.

Параметры ССТ и координаты цветности излучения фторидных люминофоров зависят от плотности мощности возбуждения и концентрации редкоземельных ионов. Для образца  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  (20 ат. %) наблюдается зелено-желтая эмиссия с ССТ 4767–5002 К при плотности мощности возбуждения 6–32 Вт/см<sup>2</sup>. По мере

увеличения плотности мощности возбуждения увеличивается и ССТ.

При увеличении концентрации ионов  $Er^{3+}$  от 1 ат. % до 30 ат. % параметр ССТ возрастает до концентрации 10 ат. % в интервале 2384–4767 К, а затем снова снижается до 4304 К при плотности мощности возбуждения 6 Вт/см<sup>2</sup>. Наблюдаемый характер роста ССТ с ростом концентрации ионов  $Er^{3+}$  проявляется для всех исследованных плотностей мощности возбуждения. Зависимость ССТ от концентрации редкоземельных ионов и плотности мощности возбуждения представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Значения ССТ, координаты цветности, внутренний и внешний энергетический выход ап-конверсионной люминесценции в кристаллах  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$

	$BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$ (1 %)	$BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$ (5 %)	$BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$ (10 %)	$BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$ (20 %)	$BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$ (30 %)
Внутренний $V_{en}$ (6 Вт/см <sup>2</sup> ), %	2.3	17.8	20.4	10.7	6.9
Внутренний $V_{en}$ (12.7 Вт/см <sup>2</sup> ), %	3.2	19.4	19.0	9.9	6.2
Внутренний $V_{en}$ (19 Вт/см <sup>2</sup> ), %	4.5	20.5	19.5	9.3	5.7
Внутренний $V_{en}$ (25.5 Вт/см <sup>2</sup> ), %	5.1	20.2	19.0	8.9	5.4
Внутренний $V_{en}$ (32 Вт/см <sup>2</sup> ), %	5.6	18.7	18.3	8.6	5.1
Внешний $V_{en}$ (6 Вт/см <sup>2</sup> ), %	0.4	6.4	9.4	9.0	6.5
Внешний $V_{en}$ (12.7 Вт/см <sup>2</sup> ), %	0.6	6.9	9.3	8.3	5.8
Внешний $V_{en}$ (19 Вт/см <sup>2</sup> ), %	0.7	7.1	9.3	7.8	5.4
Внешний $V_{en}$ (25.5 Вт/см <sup>2</sup> ), %	0.8	7.1	9.1	7.4	5.1
Внешний $V_{en}$ (32 Вт/см <sup>2</sup> ), %	0.9	7.0	8.9	7.1	4.8
ССТ (6 Вт/см <sup>2</sup> ), К	2384	4469	4767	4704	4304
ССТ (12.7 Вт/см <sup>2</sup> ), К	3339	4827	4943	4912	4453
ССТ (19 Вт/см <sup>2</sup> ), К	3922	4992	5073	4959	4511
ССТ (25.5 Вт/см <sup>2</sup> ), К	4249	5087	5141	4985	4553
ССТ (32 Вт/см <sup>2</sup> ), К	4441	5149	5181	5002	4575
Координаты цветности (6 Вт/см <sup>2</sup> )	X=0.5107 Y=0.4507	X=0.4010 Y=0.5786	X=0.3866 Y=0.5918	X=0.3824 Y=0.5928	X=0.4096 Y=0.5644
Координаты цветности (12.7 Вт/см <sup>2</sup> )	X=0.4630 Y=0.5136	X=0.3792 Y=0.6006	X=0.3718 Y=0.6070	X=0.3734 Y=0.6003	X=0.4009 Y=0.5719
Координаты цветности (19 Вт/см <sup>2</sup> )	X=0.4316 Y=0.5454	X=0.3689 Y=0.6110	X=0.3635 Y=0.6151	X=0.3704 Y=0.6030	X=0.3974 Y=0.5751
Координаты цветности (25.5 Вт/см <sup>2</sup> )	X=0.4137 Y=0.5660	X=0.3627 Y=0.6167	X=0.3590 Y=0.6191	X=0.3686 Y=0.6033	X=0.3947 Y=0.5762
Координаты цветности (32 Вт/см <sup>2</sup> )	X=0.4025 Y=0.5760	X=0.3586 Y=0.6208	X=0.3564 Y=0.6215	X=0.3676 Y=0.6042	X=0.3934 Y=0.5774

### 3.2. Энергетический выход ап-конверсионной люминесценции $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$

Внутренний и внешний энергетический выход являются важными характеристиками при оценке применения кристаллических соединений  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er$  для повышения эффективности солнечных элементов и защиты ценных бумаг. Внутренний энергетический выход ап-конверсионной люминесценции в диапазоне 400–1100 нм определялся как отношение мощности излучения к поглощенной мощности возбуждения для кристаллов с концентрацией ионов  $Er^{3+}$  1 ат. %, 5 ат. %, 10 ат. %, 20 ат. % и 30 ат. % соответственно. Результаты измерений при возбуждении различными плотностями мощности представлена в табл. 1. Видно, что максимальное значение выхода соответствует образцу с концентрацией ионов  $Er^{3+}$  10 ат. %.

Максимальное значение внешнего энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции составило 9.4 % при плотности мощности возбуждения 6 Вт/см<sup>2</sup> для кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  (10 ат. %), которое оказалось выше, чем для  $BaY_2F_8:Er$  из литературы [15] и на уровне солегированного  $Yb^{3+}$  люминофора  $BaF_2:Er,Yb$  [10].

### 4. Заключение

В настоящей работе исследованы ап-конверсионные люминесцентные характеристики концентрационного ряда кристаллов  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$ , выращенных методом Бриджмена. Исследуемые кристаллы показали интенсивную ап-конверсионную люминесценцию при возбуждении ионов  $Er^{3+}$  до  $^4I_{15/2}$  уровня лазерным излучением с длиной волны 1532 нм. Спектры люминесценции состояли из электронных переходов  $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$ .

Максимальное значение внешнего энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции составило 9.4 % при плотности мощности возбуждения 6 Вт/см<sup>2</sup> для состава  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  (10 ат. %), который, по-видимому, оказался оптимальным. Максимальное значение внутреннего энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции составило 20.4 % при плотности мощности возбуждения 6 Вт/см<sup>2</sup> для кристалла  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  (10 ат. %).

Также исследованные кристаллы  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$  позволяют управлять формой спектров ап-конверсионной люминесценции. Изменяя концентрацию и плотность мощности

возбуждения, удалось получить ап-конверсионное излучение с параметрами ССТ в диапазоне 2384–5149 К.

Выявленные в данной работе преимущества для кристаллических соединений  $BaY_{1.8}Lu_{0.2}F_8:Er^{3+}$ , такие как широкие полосы поглощения в инфракрасной области спектра, высокий внешний энергетический выход и управляемое распределение интенсивности полос люминесценции, делают их перспективными для повышения эффективности двухсторонних солнечных элементов.

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### 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

- Lüthi S. R., Pollnau M., Güdel H. U., Hühner M. P. Near-infrared to visible upconversion in  $Er^{3+}$ -doped  $Cs_3Lu_2Cl_9$ ,  $Cs_3Lu_2Br_9$ , and  $Cs_3Y_2I_9$  excited at 1.54  $\mu m$ . *Physical Review B*. 1999;60(1): 162–178. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.162>
- Wang Y., Ohwaki J. New transparent vitroceraamics codoped with  $Er^{3+}$  and  $Yb^{3+}$  for efficient frequency upconversion. *Applied Physics Letters*. 1993;63(24): 3268–3270. <https://doi.org/10.1063/1.110170>
- Александров А. А., Маякова М. Н., Воронов В. В., Поминова Д. В., Кузнецов С. В., Баранчиков А. Е., Константинович И. В., Лысакова Е. И., Фёдоров П. П. Синтез ап-конверсионных люминофоров на основе фторида кальция. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(1): 3–10. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2524>
- Singh R., Madirov E., Busko D., Hossain I. M., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Kuznetsov S. V., Farooq A., Gharibzadeh S., Paetzold U. W., Richards B. S., Turshatov A. Harvesting sub-bandgap photons via upconversion for perovskite solar cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2021;13(46): 54874–54883. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c13477>
- Van Den Hoven G. N., Snoeks E., Polman A. Upconversion in Er-implanted  $Al_2O_3$  waveguides. *Journal of Applied Physics*. 1996;79(3): 1258–1266. <https://doi.org/10.1063/1.361020>
- Lyapin A. A., Gushchin, S. V., Kuznetsov S. V., Ryabochkina P. A., Ermakov A. S., Proydakova V. Yu., Voronov V. V., Fedorov P. P., Artemov S. A., Yaprntsev A. D., Ivanov V. K. Infrared-to-visible upconversion



luminescence in  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  powders upon excitation of the  $^4\text{I}_{13/2}$  level. *Optical Materials Express*. 2018;8(7): 1863–1869. <https://doi.org/10.1364/OME.8.001863>

7. Rubin J., Brenier A., Moncorge R., Pedrini C. Excited-state absorption and energy transfer in  $\text{Er}^{3+}$ -doped  $\text{LiYF}_4$ . *Journal of Luminescence*. 1986;36(1): 39–47. [https://doi.org/10.1016/0022-2313\(86\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0022-2313(86)90029-3)

8. Brede R., Heumann E., Koetke J, Danger T., Huber G., Chai B. Green up-conversion laser emission in Er-doped crystals at room temperature. *Applied Physics Letters*. 1993;63(15): 2030–2031. <https://doi.org/10.1063/1.110581>

9. Kaiser M., Würth C., Kraft M., Hyppänen I., Soukka T., Resch-Genger U. Power-dependent upconversion quantum yield of  $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  nano- and micrometer-sized particles—measurements and simulations. *Nanoscale*. 2017;9(28): 10051–10058. <https://doi.org/10.1039/c7nr02449e>

10. Madirov E. I., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Fedorov P. P., Bergfeldt T., Busko D., Howard I. A., Richards B. S., Kuznetsov S. V., Turshatov A. An up-conversion luminophore with high quantum yield and brightness based on  $\text{BaF}_2:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$  single crystals. *Journal of Materials Chemistry C*. 2021;9(10): 3493–3503. <https://doi.org/10.1039/d1tc00104c>

11. Liu Y., Zhou Z., Zhang S., Zhao E., Ren J., Liu L., Zhang J. Mechanisms of upconversion luminescence of  $\text{Er}^{3+}$ -doped  $\text{NaYF}_4$  via 980 and 1530 nm excitation. *Nanomaterials*. 2021;11(10): 2767. <https://doi.org/10.3390/nano11102767>

12. Ivanova S., Pellé F. Strong 1.53  $\mu\text{m}$  to NIR–VIS–UV upconversion in Er-doped fluoride glass for high-efficiency solar cells. *Journal of the Optical Society of America B*. 2009;26(10): 1930–1937. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.26.001930>

13. Shalav A., Richards B. S., Trupke T. Application of  $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$  up-converting phosphors for enhanced near-infrared silicon solar cell response. *Applied Physics Letters*. 2005;86(1): 013505-1–013505-3. <https://doi.org/10.1063/1.1844592>

14. Ivaturi A., MacDougall, Sean K. W., Martín-Rodríguez R., Quintanilla M., Marques-Hueso J., Krämer, Karl W., Meijerink A., Richards, Bryce S. Optimizing infrared to near infrared upconversion quantum yield of  $\beta\text{-NaYF}_4:\text{Er}^{3+}$  in fluoropolymer matrix for photovoltaic devices. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(1): 013505. <https://doi.org/10.1063/1.4812578>

15. Boccolini A., Faoro R., Favilla E., Veronesi S., Tonelli M.  $\text{BaY}_2\text{F}_8$  doped with  $\text{Er}^{3+}$ : An upconverter material for photovoltaic application. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(6): 064904. <https://doi.org/10.1063/1.4817171>

16. Kaminskii A. A., Sobolev B. P., Sarkisov S. E., Denisenko G. A., Ryabchenkov V. V., Fedorov V. A., Uvarova T. V. Physicochemical aspects of the synthesis of  $\text{BaLn}_2\text{F}_8\text{-Ln}^{3+}$  single crystals. Spectroscopy and stimulated emission of these crystals. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.* 1982;18(3): 482–497. (In Russ.)

### Информация об авторах

*Низамутдинов Алексей Сергеевич*, к. ф.-м. н., с. н. с. научно-исследовательской лаборатории Баланс С, доцент кафедры квантовой электроники и радиоспектроскопии, Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация).

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

*Гуцин Сергей Вячеславович*, аспирант, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Саранск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1680-337X>  
serg.guschin1703@gmail.com

*Букарев Сергей Александрович*, аспирант, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Саранск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2781-5974>  
bukarevsa@yandex.ru

*Шавельев Алексей Андреевич*, м. н. с. научно-исследовательской лаборатории Баланс С, м. н. с. научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники, Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5700-6989>  
alexey.shavelev@gmail.com

*Марисов Михаил Александрович*, к. ф.-м. н., с. н. с. Казанского физико-технического института, с. н. с. научно-исследовательской лаборатории магнитной радиоспектроскопии и квантовой электроники, Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8425-7046>  
m.a.marisov@gmail.com

*Шакиров Айнур Адыхамович*, м. н. с. Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация)

<https://orcid.org/0000-0002-6140-3714>  
shakirov\_1995@mail.ru

*Киямов Айрат Газинурович*, к. ф.-м. н., с. н. с., Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5376-7000>  
airatphd@gmail.com

*Астраханцева Анна Витальевна*, лаборант-исследователь, Казанский федеральный университет (Казань, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1670-3064>

[anya4324@gmail.com](mailto:anya4324@gmail.com)

*Ляпин Андрей Александрович*, к. ф.-м. н., доцент, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (Саранск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6963-9801>

[andrei\\_lyapin@mail.ru](mailto:andrei_lyapin@mail.ru)

*Поступила в редакцию 27.05.2022; одобрена после рецензирования 01.07.2022; принята к публикации 15.07.2022; опубликована онлайн 25.09.2022.*