

## 02 Ап-конверсионная люминесценция фторидных люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1.5 μm

© А.А. Ляпин<sup>1</sup>, П.А. Рябочкина<sup>1</sup>, С.В. Гуцин<sup>1</sup>, С.В. Кузнецов<sup>2</sup>, М.В. Чернов<sup>1</sup>,  
В.Ю. Пройдакова<sup>2</sup>, В.В. Воронов<sup>2</sup>, П.П. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,  
430005 Саранск, Россия

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
119991 Москва, Россия

e-mail: andrei\_lyapin@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2018 г.

В работе исследована ап-конверсионная люминесценция фторидных люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb, полученных методом соосаждения из водных растворов. При возбуждении на уровень <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup> зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, соответствующие электронным переходам <sup>4</sup>G<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>2</sup>H<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup> и <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> → <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> ионов Yb<sup>3+</sup>. Для люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb с различными значениями концентраций ионов Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> определены значения абсолютного квантового выхода ап-конверсионной люминесценции в видимом диапазоне спектра при возбуждении излучением в области 1.5 μm и выполнен их сравнительный анализ с аналогичными значениями для люминофора SrF<sub>2</sub>:Er. Исследование координат цветности показало, что желто-зеленое ап-конверсионное излучение люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb характеризуется цветовыми температурами 3037–3526 К при плотностях мощности падающего излучения 850 W/cm<sup>2</sup>.

DOI: 10.21883/OS.2018.10.46704.168-18

### Введение

Начиная с середины 60-х годов прошлого века, количество работ, посвященных поиску эффективных люминофоров, обеспечивающих ап-конверсионное преобразование инфракрасного лазерного излучения в излучение видимого диапазона спектра, увеличивается по экспоненциальному закону [1–3]. Экспоненциальный рост соответствующих публикаций обусловлен тем, что ап-конверсионные люминофоры находят многочисленные применения в лазерной физике, светотехнике, медицине, биологии и других областях науки и техники.

В настоящее время активно изучаются условия возбуждения и закономерности ап-конверсионной люминесценции во фторидных и оксидных люминофорах, легированных ионами Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup>, при возбуждении лазерным излучением в инфракрасной области спектра [4–7]. Данные ионы обладают энергетическими уровнями, расположенными в инфракрасной области спектра (уровни <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup> и уровень <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> ионов Yb<sup>3+</sup>), при возбуждении на которые наблюдается эффективная ап-конверсионная люминесценция в видимом диапазоне спектра.

Следует заметить, что эффективность ап-конверсионной люминесценции редкоземельных (РЗ) ионов зависит как от вида РЗ иона, так и от матрицы, в которую он вводится в процессе синтеза.

Интенсивная ап-конверсионная люминесценция наблюдается во фторидных материалах со структурой

флюорита MF<sub>2</sub>:RE (M = Ca, Sr, Ba) [8–23]. Это обусловлено тем, что данные материалы характеризуются низкой энергией фонона (~ 366 см<sup>-1</sup> SrF<sub>2</sub> [24]) и склонностью ионов активаторов к образованию кластеров даже при их малых концентрациях [14,25–28]. Низкие значения энергии фононов в материалах MF<sub>2</sub>:RE способствуют уменьшению вероятности многофононной релаксации, что обеспечивает возрастание квантового выхода люминесценции. Ассоциация РЗ ионов в кластеры приводит к уменьшению расстояния между ними и, как следствие этого, к увеличению вероятности ап-конверсионных процессов, основанных на межионном взаимодействии. К таким процессам относятся: последовательная передача энергии, кооперативные процессы и процессы кросс-релаксации.

В настоящее время исследованию процессов ап-конверсионной люминесценции в различных материалах, в том числе в MF<sub>2</sub>:RE, посвящено значительное количество работ. Как было показано в работах [29–31], люминофор SrF<sub>2</sub>:Er,Yb обладает высоким квантовым выходом ап-конверсионной люминесценции при возбуждении на уровень <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> ионов Yb<sup>3+</sup>. Однако ап-конверсионная люминесценция ионов Er<sup>3+</sup> люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb при возбуждении на уровень <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup> ранее не исследовалась. В соответствии с этим целью настоящей работы являлось исследование ап-конверсионной люминесценции ионов Er<sup>3+</sup> для концентрационной серии люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er,Yb при возбуждении на уровень <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов Er<sup>3+</sup>. Солегирирова-

ние люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}$  ионами  $\text{Yb}^{3+}$  представляло интерес прежде всего с практической точки зрения на предмет поиска эффективных ап-конверсионных материалов, способных визуализировать лазерное излучение как в области  $1.5 \mu\text{m}$ , так и в области  $1 \mu\text{m}$ .

Для выявления влияния ионов  $\text{Yb}^{3+}$  на характеристики ап-конверсионных люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$  были изучены абсолютный квантовый выход люминесценции, цветовые координаты при возбуждении излучением в области  $1.5 \mu\text{m}$  и проведен их сравнительный анализ с аналогичными характеристиками для  $\text{SrF}_2 : \text{Er}$ .

## Характеристика объектов и методов исследования

Твердые растворы на основе фторида стронция были синтезированы методом соосаждения из водных растворов по методике, представленной в [29,32–34]. Небольшое отличие заключалось в том, что проводилось капельное добавление водного раствора фторида аммония ( $0.16 \text{ mol}$ ), взятого с 7% избытком, в раствор нитратов стронция и РЗ элементов ( $0.08 \text{ mol}$ ). В результате были получены взвеси порошков, которые подвергали трехстадийной отмывке от непрореагировавших нитратов с контролем отмывки посредством теста с дифениламиноом. Как было нами установлено ранее [29–31,34,35], использование фторида аммония приводит к образованию твердого раствора с общей формулой  $\text{Sr}_{1-x-y}\text{R}_x(\text{NH}_4)_y\text{F}_{2+x-y}$ , который после термообработки разлагается с получением целевого твердого раствора  $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$  и фторирующего агента HF. С помощью данного подхода воспроизводимо синтезируются однофазные твердые растворы с флюоритовой структурой на основе фторида стронция, обладающие интенсивной ап-конверсионной люминесценцией [31].

Для регистрации спектров отражения ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  в исследуемых люминофорах использовался сканирующий двулучевой спектрофотометр с двойным монохроматором Perkin Elmer Lambda 950.

Спектры ап-конверсионной люминесценции в видимой и инфракрасной областях спектра ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  были зарегистрированы на спектрометре Horiba FHR 1000. В качестве источника возбуждения использовался волоконный лазер, излучающий на длине волны  $1531.8 \text{ nm}$ . Диаметр падающего пучка лазерного излучения, сфокусированного на образец, составил  $200 \mu\text{m}$ .

Для измерения абсолютного квантового выхода использовалась методика, описанная в работах [36,37]. Для реализации этой методики была собрана установка, состоящая из интегрирующей сферы OL IS-670-LED, спектрометра OL-770 UV/VIS и спектрометра M833 (Solar LS). Мощность лазерного излучения, падающего на исследуемый и эталонный образцы, измерялась с помощью измерителя мощности 11 РМК-30Н-Н5.

Все измерения были проведены при комнатной температуре.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен спектр отражения люминофора  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$  в спектральном диапазоне  $300\text{--}1700 \text{ nm}$ , на котором четко просматриваются полосы поглощения, соответствующие переходам из основного состояния  $^4I_{15/2}$  на возбужденные мультиплеты  $^4G_{11/2}$ ,  $^2H_{9/2}$ ,  $^4F_{3/2}$ ,  $^4F_{5/2}$ ,  $^4F_{7/2}$ ,  $^2H_{11/2}$ ,  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{9/2}$ ,  $^4I_{9/2}$ ,  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ , и полоса поглощения, соответствующая переходу  $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$ . Регистрация спектров ап-конверсионной люминесценции осуществлялась при возбуждении на уровень  $^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Длина волны излучения возбуждения на уровень  $^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  на рис. 1 отмечена стрелкой.

Спектры ап-конверсионной люминесценции, обусловленные переходами  $^4G_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  для люминофора  $\text{SrF}_2 : \text{Er}(5\%), \text{Yb}(1\%)$ , зарегистрированные при указанном выше способе возбуждения, приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что относительная интенсивность люминесценции, соответствующая красной области спектра (переход  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ ), больше интенсивности спектральных линий в зеленой и синей областях спектра (переходы  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  и  $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  соответственно). На рис. 3 показана диаграмма энергетических уровней ионов  $\text{Er}^{3+}$ , на которой указаны абсорбционный переход  $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  и оптические переходы между энергетическими уровнями ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , соответствующие антистоксовой люминесценции.

Для применения ап-конверсионных люминофоров в различных областях науки и техники требуется знание количественных характеристик материала: квантового выхода люминесценции, координат цветности и цветовых температур. Определение этих характеристик в процессе исследования необходимо для выбора оптимального состава люминофора.

Зависимости интенсивности люминесценции в видимом спектральном диапазоне для люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$  с различными значениями концентрации ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , полученные с помощью интегрирующей сферы, показаны на рис. 4. Из анализа спектров видно, что отношение интенсивностей линий в спектрах люминесценции, обусловленных переходами  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  и  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ , не изменяется для всех выбранных значений концентраций ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ .

Результаты измерения квантового выхода ап-конверсионной люминесценции для люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$ , а также результаты их сравнения с аналогичными значениями для люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}$  [23] представлены в таблице. Из анализа данных таблицы следует, что солегирирование порошков  $\text{SrF}_2$  ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  не приводит к уменьшению квантового выхода люминес-

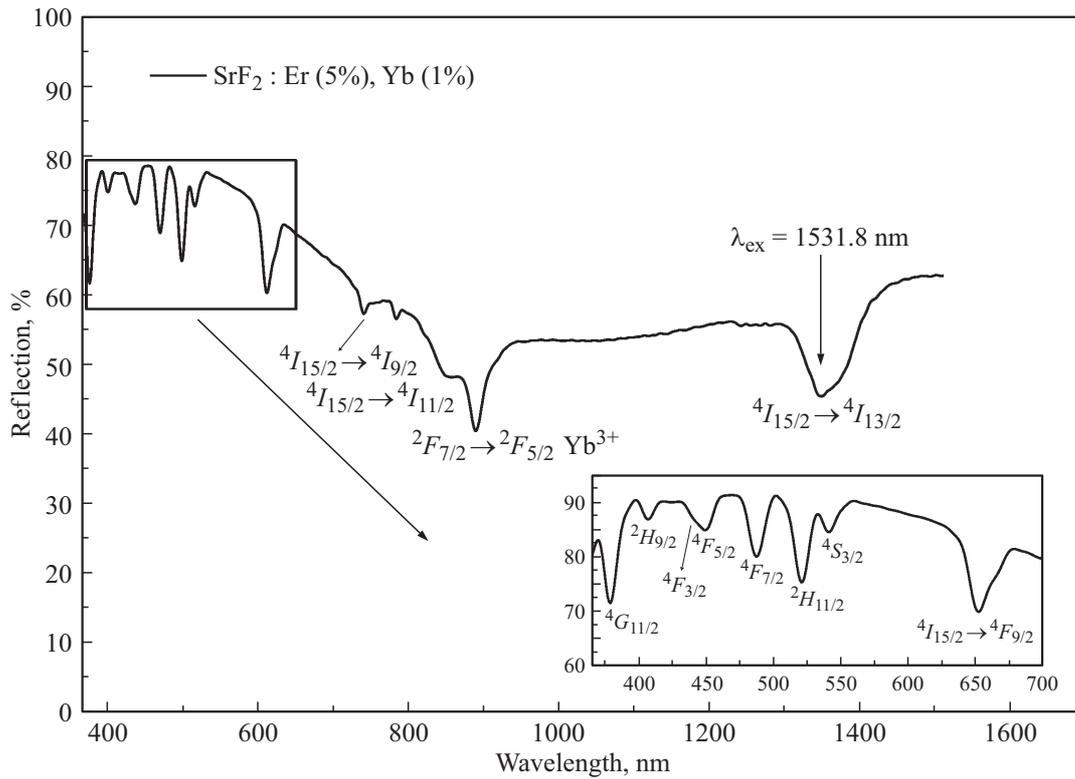


Рис. 1. Спектр отражения люминофора SrF<sub>2</sub>:Er(5%), Yb(1%) в спектральном диапазоне 300–1700 nm при T = 300 K.

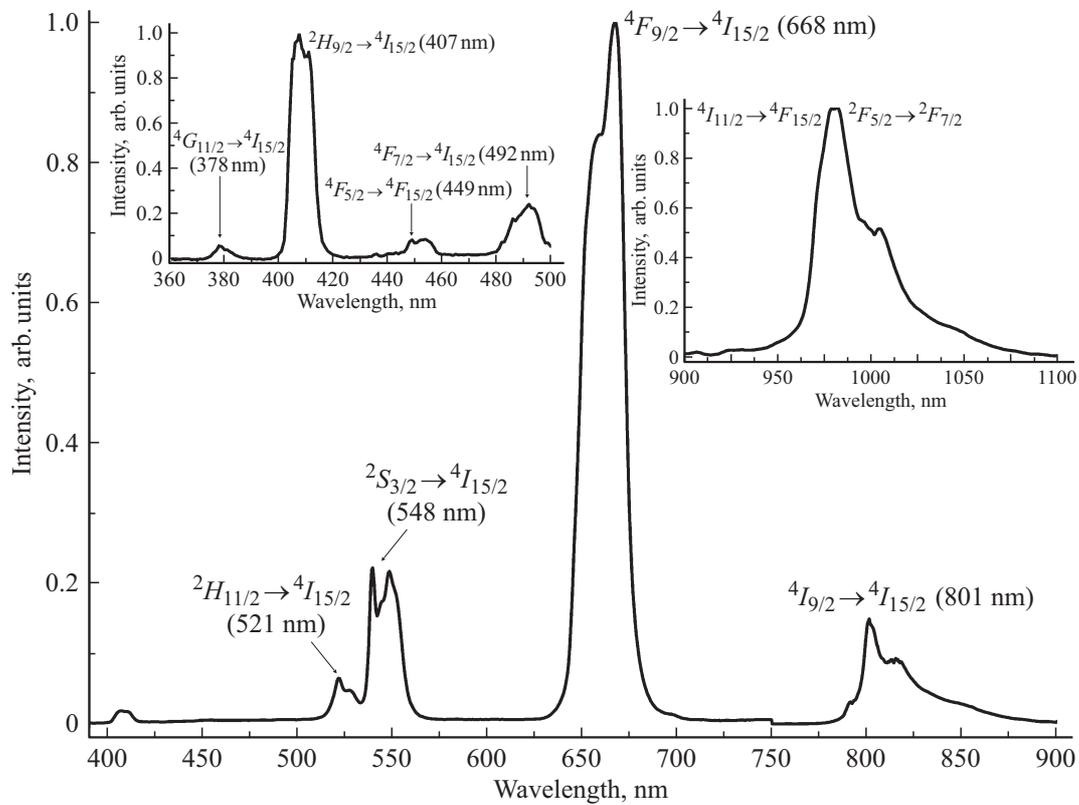
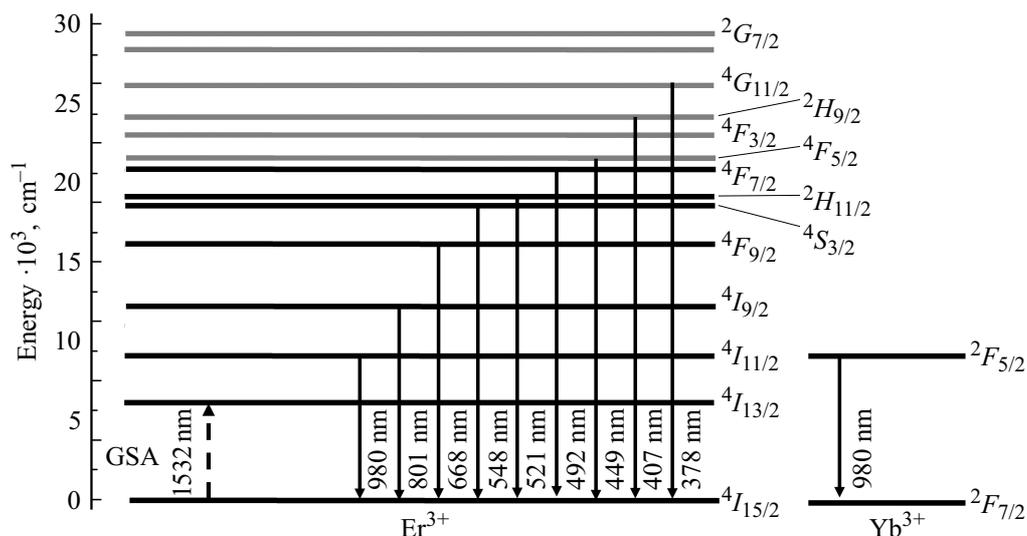
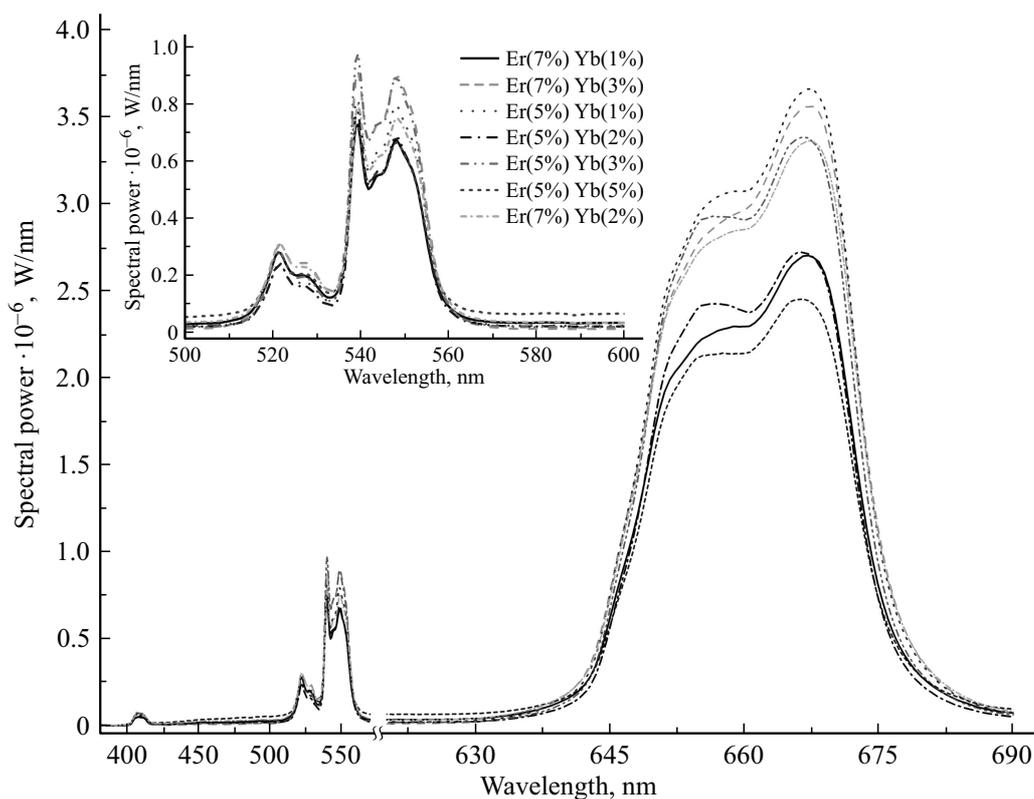


Рис. 2. Спектры ап-конверсионной люминесценции ионов Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> для люминофоров SrF<sub>2</sub>:Er(5%), Yb(1%) при T = 300 K.



**Рис. 3.** Схема энергетических уровней ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  с указанием переходов, для которых зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции, и перехода  $4I_{15/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ , на который осуществлялось возбуждение люминесценции [17,23].



**Рис. 4.** Спектральная мощность ап-конверсионной люминесценции для люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$  при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 нм.

ценции при возбуждении лазерным излучением в области  $1.5 \mu\text{m}$ , несмотря на появление дополнительного канала потерь в виде люминесценции ионов  $\text{Yb}^{3+}$ , соответствующей переходу  $2F_{5/2} \rightarrow 2F_{7/2}$ . Это можно объяснить тем, что процесс безызлучательной передачи энергии между ионами  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  обеспечивает эффективное участие ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в заселении верхних энергетических

уровней ионов  $\text{Er}^{3+}$ , переходы с которых на нижние энергетические уровни данных ионов обеспечивают люминесценцию в видимой области спектра.

При варьировании концентрации ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  значение квантового выхода для исследованных люминофоров  $\text{SrF}_2 : \text{Er}, \text{Yb}$  изменяется незначительно. Данный факт, по-видимому, связан с особенностями формирова-

Абсолютный квантовый выход, координаты цветности и цветные температуры излучения люминофоров  $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Yb}$  и  $\text{SrF}_2:\text{Er}$ .

Состав $\text{SrF}_2:\text{RE}$	$\Phi_{\text{УС}}, \%$	X	Y	T, K
Er (7%), Yb (1%)	0.17	0.451	0.493	3393
Er (7%), Yb (2%)	0.17	0.454	0.479	3270
Er (7%), Yb (3%)	0.18	0.455	0.512	3431
Er (5%), Yb (1%)	0.20	0.471	0.481	3037
Er (5%), Yb (2%)	0.14	0.455	0.493	3329
Er (5%), Yb (3%)	0.19	0.456	0.501	3366
Er (5%), Yb (5%)	0.15	0.435	0.475	3526
Er (8.8%)	0.19	0.407	0.553	4305

ния в данных люминофорах кластеров из РЗ ионов ( $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ), взаимодействие между которыми приводит к процессам возникновения ап-конверсионной люминесценции.

Обобщая результаты, представленные выше, можно заключить, что люминофор  $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Yb}$  способен эффективно преобразовывать лазерное излучение как в области  $1 \mu\text{m}$  [29–31,35], так и в области  $1.5 \mu\text{m}$ .

Наряду с квантовым выходом важными характеристиками излучения люминофоров являются координаты цветности и цветные температуры. В таблице представлены координаты цветности и цветные температуры для люминофоров  $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Yb}$  с различными значениями концентраций ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Представленные в таблице результаты свидетельствуют о том, что исследованные люминофоры обеспечивают свечение с цветовой температурой 3037–3526 К.

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследования ап-конверсионной люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  для концентрационной серии люминофоров  $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Yb}$  при возбуждении лазерным излучением в области  $1.5 \mu\text{m}$ . Спектры ап-конверсионной люминесценции соответствуют переходам  ${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^2H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$ .

Значение абсолютного квантового выхода ап-конверсионной люминесценции в видимом диапазоне спектра при возбуждении излучением в области  $1.5 \mu\text{m}$  для люминофоров с различными значениями концентраций ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  изменяется незначительно и является близким по величине для люминофора  $\text{SrF}_2:\text{Er}$ .

Данный факт, который, по-видимому, связан с особенностями образования кластеров из РЗ ионов в материалах  $\text{MF}_2:\text{RE}$  (где  $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$ ), свидетельствует о том, что солегирирование  $\text{SrF}_2:\text{Er}$  ионами  $\text{Yb}^{3+}$  не приводит к уменьшению эффективности преобразования лазерного излучения в области  $1.5 \mu\text{m}$  и в то же время позволяет

также визуализировать лазерное излучение и в области  $1 \mu\text{m}$ .

Исследование координат цветности показало, что ап-конверсионное излучение люминофоров  $\text{SrF}_2:\text{Er}, \text{Yb}$  характеризуется цветовыми температурами 3037–3526 К при плотности мощности падающего излучения  $850 \text{ W/cm}^2$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-10163).

## Список литературы

- [1] Bloembergen N. // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. N 3. P. 84–85. doi 10.1103/PhysRevLett.2.84
- [2] Auzel F. // Chem. Rev. 2004. V. 104. N 1. P. 139–174. doi 10.1021/cr020357g
- [3] Ovsyankin V.V., Feofilov P.P. // Sov. Phys. JETP Lett. 1966. V. 3. N 12. P. 322–323.
- [4] Gnach A., Bednarkiewicz A. // Nanotoday. 2012. V. 7. N 6. P. 532–563. doi 10.1016/j.nantod.2012.10.006
- [5] Rodriguez Burbano D.C., Naccache R., Capobianco J.A. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2015. V. 47. P. 273–347. doi 10.1016/B978-0-444-63481-8.00273-6
- [6] Rodriguez-Sevilla P., Rodriguez-Rodriguez H., Pedroni M., Speghini A., Bettinelli M., Garcia Sole J.A., Jaque D., Haro-Gonzalez P. // Nanolett. 2015. V. 15. N 8. P. 5068–5074. doi 10.1021/acs.nanolett.5b01184
- [7] Clarke C., Liu D., Wang F., Liu Y., Chen C., Ton-That C., Xu X., Jin D. // Nanoscale 2018. V. 10. N 14. P. 6270–6276. doi 10.1039/C7NR08979A
- [8] Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Chabushkin A.N., Ushakov S.N., Fedorov P.P. // J. Lumin. 2015. V. 167. P. 120–125. doi 10.1016/j.jlumin.2015.06.011
- [9] Fedorov P.P., Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Voronov V.V., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Chernov M.V., Mayakova M.N., Pominova D.V., Uvarov O.V., Baranchikov A.E., Ivanov V.K., Pynenkov A.A., Nishchev K.N. // J. Fluorine Chem. 2017. V. 202. P. 9–18. doi 10.1016/j.jfluchem.2017.08.012
- [10] Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N., Fedorov P.P. // Quantum Electron. 2014. V. 44. N 6. P. 602–605. doi 10.1070/QE2014v044n06ABEH015423
- [11] Lyapin A.A., Kuznetsov S.V., Ryabochkina P.A., Merculov A.P., Chernov M.V., Ermakova Yu.A., Luginina A.A., Fedorov P.P. // Laser Phys. Lett. 2017. V. 14. N 7. P. 076003. doi 10.1088/1612-202X/aa7418
- [12] Verber C.M., Grieser D.R., Jones W.H. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 7. P. 2767–2769. doi 10.1063/1.1660621
- [13] Bullock S.R., Reddy B.R., Venkateswarlu P., Nash-Stevenson S.K. // J. Opt. Soc. Am. B. 1997. V. 14. N 3. P. 553–559. doi 10.1364/JOSAB.14.000553
- [14] Seelbinder M.B., Wright J.C. // Phys. Rev. B. 1979. V. 20. N 10. P. 4308–4320. doi 10.1103/PhysRevB.20.4308
- [15] Tang S.H., Zhang H.Y., Kuok M.H., Kee S.C. // Phys. Stat. Sol. B-Basic Res. 1991. V. 168. N 1. P. 351–360. doi 10.1002/pssb.2221680134
- [16] Ivanova S., Pellé F., Tkachuk A., Joubert M.-F., Guyot Y., Gapontzev V.P. // J. Lumin. 2008. V. 128. N 5. P. 914–917. doi 10.1016/j.jlumin.2007.11.031

- [17] Pollack S.A., Chang D.B., Moise N.L. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 12. P. 4077–4086. doi 10.1063/1.337486
- [18] Pollack S.A., Chang D.B. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 6. P. 2885–2893. doi 10.1063/1.341572
- [19] Jouart J.P., Mary G. // J. Lumin. 1990. V. 46. N 1. P. 39–45. doi 10.1016/0022-2.
- [20] P. 881–890. doi 10.1063/1.1671139
- [21] Du X., Wang X., Meng L., Bu Y., Yan X. // Nanoscale Res. Lett. 2017. V. 12. P. 163. doi 10.1186/s11671-017-1929-8
- [22] Liu H., Lu W., Wang H., Rao L., Yi Z., Zeng S., Hao J. // Nanoscale. 2013. V. 5. N 13. P. 6023–6029. doi 10.1039/c3nr00999h
- [23] 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., Yaprlyntsev A.D., Ivanov V.K. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8. N 7. P. 1863–1869. doi 10.1364/OME.8.001863
- [24] Richman I. // J. Chem. Phys. 1964. V. 41. N 9. P. 2836–2837. doi 10.1063/1.1726360
- [25] Fedorov P.P., Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Osiko V.V. // J. Fluorine Chem. 2011. V. 132. N 12. P. 1012–1039. doi 10.1016/j.jfluchem.2011.06.025
- [26] Mujaji M., Jones G.D., Syme R.W.G. // Phys. Rev. B. 1992. V. 46. N 22. P. 14398–14410. doi 10.1103/PhysRevB.46.14398
- [27] Kazanskii S.A., Ryskin A.I., Nikiforov A.E., Zaharov A.Yu., Ougrumov M.Yu., Shakurov G.S. // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. N 1. P. 014127. doi 10.1103/PhysRevB.72.014127
- [28] Greis O., Haschke J.M. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 1982. V. 5. P. 387–460. doi 10.1016/S0168-1273(82)05008-9
- [29] Rozhnova Yu.A., Kuznetsov S.V., Luginina A.A., Voronov V.V., Ryabova A.V., Pominova D.V., Ermakov R.P., Usachev V.A., Kononenko N.E., Baranchikov A.E., Ivanov V.K., Fedorov P.P. // Mat. Chem. Phys. 2016. V. 172. P. 150–157. doi 10.1016/j.matchemphys.2016.01.055
- [30] Fedorov P.P., Kuznetsov S.V., Osiko V.V. Elaboration of Nanofluorides and Ceramics for Optical and Laser Applications. Photonic and Electronic Properties of Fluoride Materials. Elsevier, 2016. P. 7. doi 10.1016/B978-0-12-801639-8.00002-7
- [31] Kuznetsov S.V., Ermakova Yu.A., Voronov V.V., Fedorov P.P., Busko D., Howard I.A., Richards B.S., Turshatov A. // J. Mat. Chem. C. 2018. V. 6. N 3. P. 598–604. doi 10.1039/C7TC04913G
- [32] Федоров П.П., Кузнецов С.В., Маякова М.Н., Воронов В.В., Ермаков Р.П., Баранчиков А.Е., Осико В.В. // Журн. неорган. химии. 2011. Т. 56. № 10. С. 1604–1610.
- [33] Маякова М.Н., Лугинина А.А., Кuznetsov S.V., Voronov V.V., Ermakov R.P., Baranchikov A.E., Ivanov V.K., Karban O.V., Fedorov P.P. // Mendeleev Commun. 2014. V. 24. N 6. P. 360–362. doi 10.1016/j.mencom.2014.11.017
- [34] Rozhnova Yu.A., Luginina A.A., Voronov V.V., Ermakov R.P., Kuznetsov S.V., Ryabova A.V., Pominova D.V., Arbenina V.V., Osiko V.V., Fedorov P.P. // Mat. Chem. Phys. 2014. V. 148. P. 201–207. doi 10.1016/j.matchemphys.2014.07.032
- [35] Pak A.M., Ermakova Yu.A., Kuznetso S.V., Ryabova A.V., Pominova D.V., Voronov V.V. // J. FluorineChem. 2017. V. 194. P. 16–22. doi 10.1016/j.jfluchem.2016.12.002
- [36] Kobayashi A. Absolute Measurements of Photoluminescence Quantum Yields of Organic Compounds Using an Integrating Sphere. Gunma University, 2010. 109 p.
- [37] Gao G., Busko D., Kauffmann-Weiss S., Turshatov A., Howard I.A., Richards B.S. // J. Mater. Chem. 2017. V. 5. N 42. P. 11010–11017. doi 10.1039/C6TC05322J