

02

Ап-конверсионная люминесценция твердых растворов $\text{CaF}_2\text{—SrF}_2\text{—HoF}_3$ при возбуждении на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+}

© М.К. Бубнов¹, С.А. Букарев¹, С.В. Гуцин¹, В.А. Конюшкин², С.В. Кузнецов^{2,3}, А.А. Ляпин^{1¶}, А.Н. Накладов², П.А. Рябочкина¹, В.В. Воронов², П.П. Федоров²

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, 430005 Саранск, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

³ Казанский федеральный университет, 420008 Казань, Россия

¶ e-mail: andrei_lyapin@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

В окончательной редакции 26.12.2022 г.

Принята к публикации 10.01.2023 г.

Исследованы спектры ап-конверсионной люминесценции монокристаллов $\text{CaF}_2\text{—SrF}_2\text{—HoF}_3$, выращенных методом вертикальной направленной кристаллизации, при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 нм на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+} . При данных условиях возбуждения определены количественные характеристики ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} : энергетический выход и координаты цветности. Рассмотрена возможность повышения эффективности кремниевых солнечных батарей за счет ап-конверсионного преобразования ИК излучения в кристаллах $\text{CaF}_2\text{—SrF}_2\text{—HoF}_3$.

Ключевые слова: ап-конверсионная люминесценция, редкоземельные ионы, фториды, энергетический выход люминесценции.

DOI: 10.21883/OS.2023.03.55384.4085-22

Введение

Солнечные батареи являются безопасным, экологически чистым и дешевым источником энергии. В настоящее время они применяются в космических аппаратах, портативной электронике, для энергообеспечения зданий, в электромобилях и т.д. Однако следует заметить, что современные солнечные батареи преобразовывают в фототок только часть излучения солнечного спектра. Край длинноволнового преобразования для батарей на основе кристаллического кремния, арсенида галлия и перовскитов составляет около 1100, 870 и 820 нм соответственно [1]. В результате потери в преобразовании кремниевыми батареями солнечного излучения составляют около 20% [1]. В работах [2–5] предложены варианты повышения эффективности солнечных батарей за счет ап-конверсионного преобразования инфракрасного (ИК) излучения материалами, расположенными на обратной стороне панели. Ап-конверсионные материалы поглощают ИК излучение, прошедшее через панель, и преобразуют его в излучение видимого и ближнего ИК диапазонов спектра, которое повторно преобразуется солнечной батареей в фототок.

В настоящее время в литературе широко обсуждается вопрос повышения эффективности солнечных батарей за счет дополнительного ап-конверсионного преобразования солнечного излучения в области 1.4–1.6 мкм в фототок с помощью материалов, легированных ионами Er^{3+} [6–18]. Данные материалы обладают широкой по-

лосой поглощения в спектральной области 1.4–1.6 мкм (переход $^4I_{15/2}\text{—}^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+}) и интенсивной ап-конверсионной люминесценцией в спектральном диапазоне 400–1100 нм при возбуждении на уровень $^4I_{13/2}$, которая хорошо соответствует максимуму спектральной чувствительности кремниевых солнечных батарей. В работах [6–18] были широко представлены результаты исследования ап-конверсионной люминесценции различных фторидных, оксидных, оксисульфидных ($\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}$, BaY_2F_8 , CaF_2 , SrF_2 , $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$, NaYF_4 , $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ и др.) соединений, легированных ионами Er^{3+} , при возбуждении на уровень $^4I_{13/2}$ как монохроматическим, так и широкополосным излучением. Проведены реальные испытания ап-конверсионных материалов при их включении в состав солнечных панелей [5,17–27].

Стоит заметить, что материалы, легированные ионами Ho^{3+} , также обладают эффективной ап-конверсионной люминесценцией при возбуждении ИК излучением на энергетические уровни 5I_6 [28,29] и 5I_7 [30–37]. Ранее ап-конверсионная люминесценция ионов Ho^{3+} при возбуждении на уровень 5I_7 была исследована в материалах CaF_2 [30–32], SrF_2 [32,33], ZBLAN [34,35], PbF_2 [36], $\text{ZrF}_4\text{—BiF}_3$ [37].

Анализ доступных литературных данных показал, что ранее вопрос повышения эффективности солнечных батарей за счет ап-конверсионного преобразования двухмикронного излучения кристаллами $\text{CaF}_2\text{—SrF}_2\text{—HoF}_3$ не обсуждался. При этом данные соединения облада-

ют широким спектром поглощения и низким значением энергии фононов (350 cm^{-1} [38]), что позволяет потенциально рассматривать их как эффективные ап-конверсионные материалы. Следует заметить, что для практических применений ап-конверсионной люминесценции в солнечных батареях, как правило, используются поликристаллические материалы, легированные редкоземельными ионами. Однако предварительные исследования спектров ап-конверсионной люминесценции целесообразно проводить на модельных объектах в виде прозрачных монокристаллов, так как для них по сравнению с порошковыми материалами минимизированы процессы рассеяния излучения при исследовании спектров поглощения и люминесценции.

В соответствии с этим целью настоящей работы являлось исследование ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--HoF}_3$ при их возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 nm уровня 5I_7 этих ионов.

Характеристика объектов и методов исследования

Выращивание монокристаллов твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--HoF}_3$ проводили методом вертикальной направленной кристаллизации в графитовых тиглях в вакууме. В качестве исходных реактивов использовали CaF_2 (бой оптических монокристаллов производства ГОИ), SrF_2 (99.99, НЕВАТОРГ), HoF_3 (99.99, ООО ЛАНХИТ). Реактивы, за исключением фторида кальция, предварительно переплавляли с фторированием в плоскостных графитовых тиглях с крышкой (давление CF_4 0.1 atm) для удаления кислородсодержащихся примесей. Шихту нагревали до температуры 1370°C , фторировали в атмосфере CF_4 в течение 1 h, а затем проводили перемещение тигля из горячей зоны в холодную со скоростью 7 mm/h . После окончания перемещения тигля проводили последовательное охлаждение до комнатной температуры в течение 4 h.

Рентгенофазовый анализ синтезированных образцов проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance с $\text{CuK}\alpha$ -излучением в диапазоне 2θ $15^\circ\text{--}80^\circ$. Расчет параметров кристаллической решетки был проведен в программе Powder 2.0 ($\Delta Q < 5.0$).

Для исследования спектрально-люминесцентных свойств монокристаллов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--HoF}_3$ из кристаллической були были вырезаны диски диаметром 10 mm и толщиной 1 mm . Составы образцов соответствовали областям седловинных точек трехкомпонентных систем [39,40], скорость выращивания была оценена на основании данных [41].

Химический состав определяли методом энергодисперсионного анализа (EDX) на микроскопе Carl Zeiss NVision 40.

Для регистрации спектров поглощения ионов Ho^{3+} в исследуемых фторидных монокристаллах использовался

сканирующий двулучевой спектрофотометр с двойным монохроматором Perkin Elmer Lambda 950.

Спектры ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} в диапазонах $400\text{--}1100$ и $1100\text{--}1300\text{ nm}$ были зарегистрированы с помощью спектрорадиометра OL-770 VIS/NIR и спектрометра Horiba FHR 1000 соответственно. Для возбуждения ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} на уровень 5I_7 использовался непрерывный волоконный лазер с длиной волны излучения 1940 nm . Диаметр падающего на образец лазерного пучка составил 1.5 mm . В настоящей работе лазерное монохроматическое излучение используется для обнаружения наличия и выявления закономерностей ап-конверсионной люминесценции твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--HoF}_3$. При проведении реальных испытаний применения ап-конверсионной люминесценции материалов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--HoF}_3$ для повышения эффективности солнечных батарей необходимо использовать широкополосные источники ИК излучения.

Для расчета координат цветности использовалась стандартная колориметрическая система МКО 1931 (X, Y) [42,43].

Энергетический выход ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} определялся по формуле [44–46]

$$B_{\text{en}} = P_{\text{lum}}/P_{\text{abs}}, \quad (1)$$

где P_{lum} — мощность ап-конверсионной люминесценции в спектральном диапазоне $400\text{--}1100\text{ nm}$, P_{abs} — поглощенная образцом мощность лазерного излучения с длиной волны 1940 nm .

Для определения энергетического выхода была собрана экспериментальная установка на основе интегрирующей сферы OL IS-670-LED и спектрорадиометра OL-770 VIS/NIR. Непрерывное лазерное излучение, прошедшее через кварцевый ахроматический деполаризатор, фокусировалось на образец, расположенный в центре сферы. Далее с помощью спектрорадиометра регистрировалась спектральная мощность ап-конверсионной люминесценции. Интегрирующая сфера и спектрорадиометр соединялись оптическим волноводом. Коррекция экспериментальной установки на спектральную чувствительность проводилась с помощью эталонной галогенной лампы OL 245-TSF-X Gooch & Housego с известной спектральной мощностью излучения. Мощность падающего на образец лазерного излучения измерялась с помощью измерителя мощности на основе интегрирующей сферы S148C Thorlabs.

Все измерения были проведены при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Составы выращенных монокристаллов $\text{Ca}_{0.600}\text{Sr}_{0.400-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2+x}$ представлены в таблице. Рентгенограммы образцов выявили кубическую кристалличе-

Концентрационный ряд кристаллов $\text{Ca}_{0.620}\text{Sr}_{0.380-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2+x}$

Номинальный состав, mole fractions			Состав по EDX, mole fractions			Параметр решетки, Å	Обозначение
CaF ₂	SrF ₂	HoF ₃	CaF ₂	SrF ₂	HoF ₃		
0.620	0.375	0.005	0.624	0.370	0.006	5.5988(6)	CaF ₂ -SrF ₂ :Ho (0.6%)
0.620	0.370	0.010	0.626	0.361	0.013	5.592(1)	CaF ₂ -SrF ₂ :Ho (1.3%)
0.620	0.365	0.015	0.622	0.360	0.018	5.5999(1)	CaF ₂ -SrF ₂ :Ho (1.8%)
0.620	0.350	0.030	0.613	0.353	0.034	5.5934(5)	CaF ₂ -SrF ₂ :Ho (3.4%)

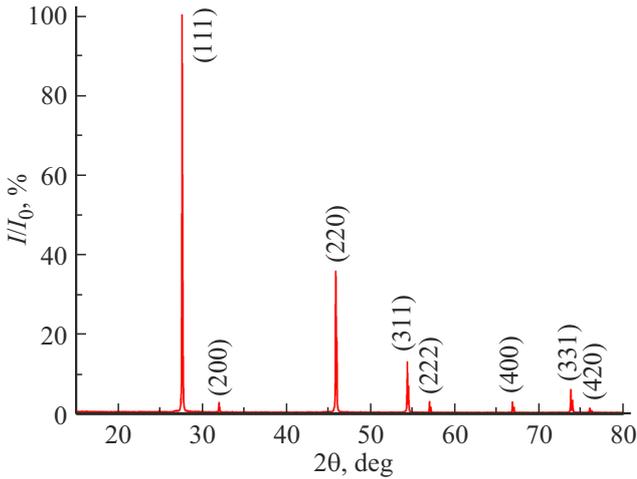


Рис. 1. Рентгенограмма образца CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%).

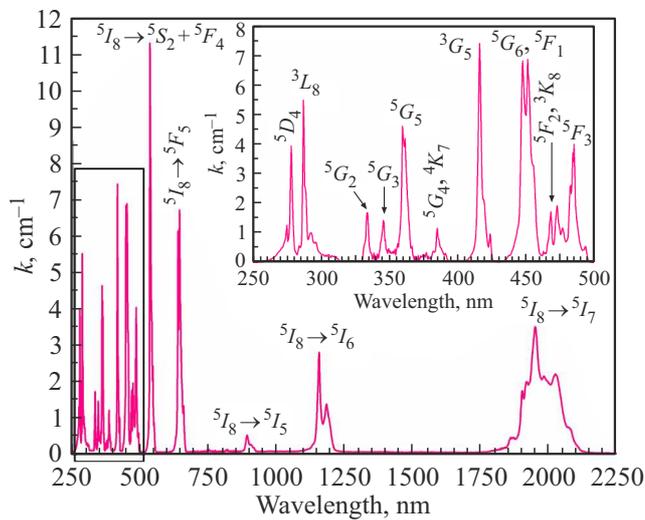


Рис. 2. Спектр поглощения кристалла CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) в видимом и ИК диапазонах спектра, T = 300 К.

скую структуру, результаты расчета параметров решетки представлены в таблице. Типичная рентгенограмма на примере образца CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) показана на рис. 1. Оценка реального химического состава методом энергодисперсионного анализа выявила хорошее соответствие номинального и реального составов.

Спектр поглощения монокристалла CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) в диапазоне длин волн 250–2250 nm представлен полосами, обусловленными переходами $^5I_8 \rightarrow ^5G_5$, $^5I_8 \rightarrow ^5G_6$, $^5I_8 \rightarrow ^5F_2 + ^3K_8$, $^5I_8 \rightarrow ^5F_3$, $^5I_8 \rightarrow ^5S_2(^5F_4)$, $^5I_8 \rightarrow ^5F_5$, $^5I_8 \rightarrow ^5I_4$, $^5I_8 \rightarrow ^5I_5$, $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$, $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ионов Ho³⁺ (рис. 2). Кристаллы CaF₂-SrF₂:Ho обладают широкими полосами поглощения в области 1.15 μm (переход $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$ ионов Ho³⁺) и 1.9 μm (переход $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ионов Ho³⁺), при возбуждении которых может возникать ап-конверсионная люминесценция [30].

Спектр поглощения кристалла CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) для электронного перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ионов Ho³⁺ в спектральном диапазоне 1700–2200 nm, спектры солнечного излучения над атмосферой (спектр Солнца AM0) и на поверхности Земли (спектр Солнца AM1.5) представлены на рис. 3. Видно, что полоса поглощения кристалла CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) частично перекрывается со спектром излучения Солнца на поверхности Земли и хорошо согласуется с его излучением над атмосферой (рис. 3). Пунктирной стрелкой показана длина волны возбуждения ап-конверсионной люминесценции на уровень 5I_7 ионов Ho³⁺ ($\lambda_{ex} \sim 1940$ nm) в кристаллах CaF₂-SrF₂:Ho.

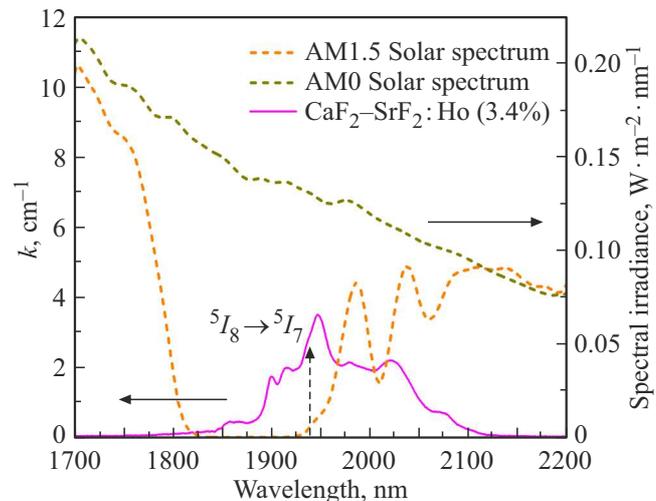


Рис. 3. Спектр поглощения кристалла CaF₂-SrF₂:Ho (3.4%) для перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ ионов Ho³⁺ и спектры солнечного излучения над атмосферой (AM0) и на поверхности Земли (AM1.5).

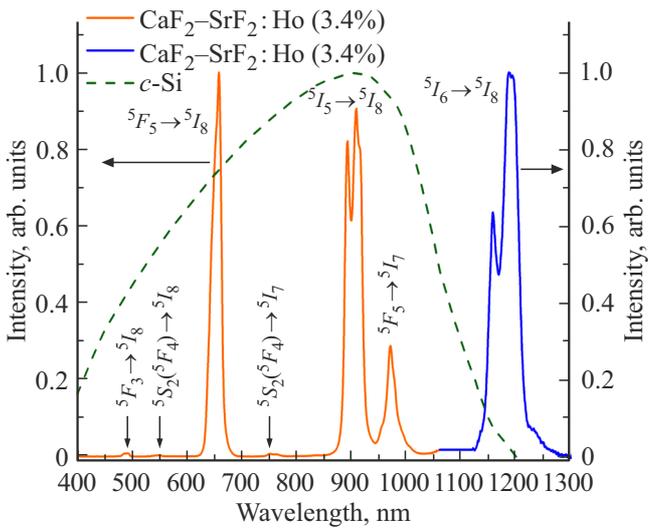


Рис. 4. Спектры ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} для кристалла $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ (3.4%) при $T = 300\text{ K}$ и спектральная чувствительность монокристаллического кремния [47,48]. Плотность мощности возбуждения 28 W/cm^2 .

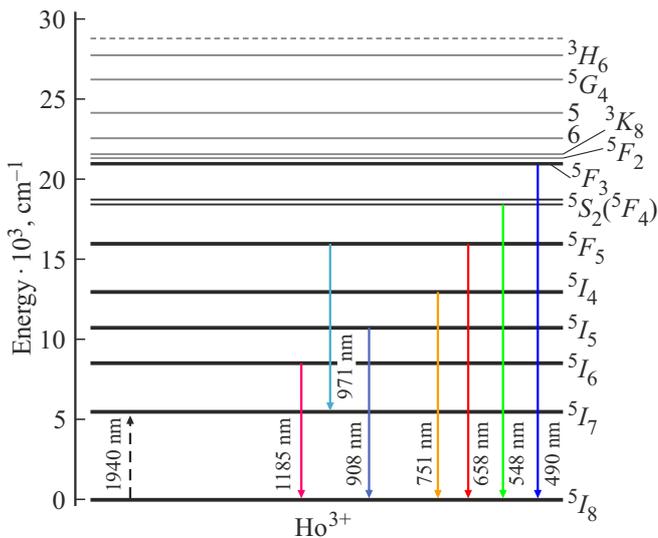


Рис. 5. Диаграмма энергетических уровней ионов Ho^{3+} с указанием переходов, соответствующих ап-конверсионной люминесценции этих ионов и перехода ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ ионов Ho^{3+} , на который осуществлялось возбуждение люминесценции.

Анализ спектра ап-конверсионной люминесценции ионов гольмия в кристалле $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ (3.4%) при возбуждении на длине волны 1940 nm выявил, что наибольшая относительная интенсивность люминесценции в спектральной области $400\text{--}1100\text{ nm}$ наблюдается для полосы, соответствующей переходу ${}^5F_5 \rightarrow {}^5I_8$ ионов Ho^{3+} , расположенной в области 650 nm (рис. 4).

Спектральная чувствительность солнечных батарей на основе кристаллического кремния расположена в спектральном диапазоне $0.36\text{--}1.2\text{ }\mu\text{m}$ [47,48] (рис. 4). Из рис. 4 видно, что наиболее интенсивные полосы

люминесценции ионов Ho^{3+} , соответствующие переходам ${}^5F_5 \rightarrow {}^5I_8$, ${}^5I_5 \rightarrow {}^5I_8$ и ${}^5F_5 \rightarrow {}^5I_7$ в спектральной области $400\text{--}1000\text{ nm}$, располагаются близко к области максимальной спектральной чувствительности кремния.

Длинноволновый порог преобразования кремниевой солнечной батареи составляет около $1.2\text{ }\mu\text{m}$. Из рис. 4 видно, что полоса люминесценции, соответствующая электронному переходу ${}^5I_6 \rightarrow {}^5I_8$ ионов Ho^{3+} ($1100\text{--}1275\text{ nm}$), располагается на краю спектральной чувствительности кремния и практически не дает вклад в фототок. Данная люминесценция ионов Ho^{3+} является существенным каналом потерь.

Диаграмма энергетических уровней ионов Ho^{3+} с указанием оптических переходов между энергетическими уровнями ионов Ho^{3+} , соответствующих ап-конверсионной люминесценции, представлена на рис. 5. Также на рис. 5 указан переход ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ ионов Ho^{3+} , на который осуществлялось возбуждение. Механизмы межионного взаимодействия ответственны за возникновения ап-конверсионной люминесценции ионов Ho^{3+} во фторидных кристаллах со структурой флюорита при возбуждении на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+} [30].

Координаты цветности ап-конверсионной люминесценции представлены на рис. 6. Монокристаллы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ обладают свечением в красной области при возбуждении уровня 5I_7 ионов Ho^{3+} лазерным излучением с длиной волны 1940 nm и плотностью мощности 28 W/cm^2 . При изменении плотности мощности от 28 до 209 W/cm^2 значения координат цветности изменяются незначительно.

С помощью интегрирующей сферы была исследована зависимость интенсивности ап-конверсионной лю-

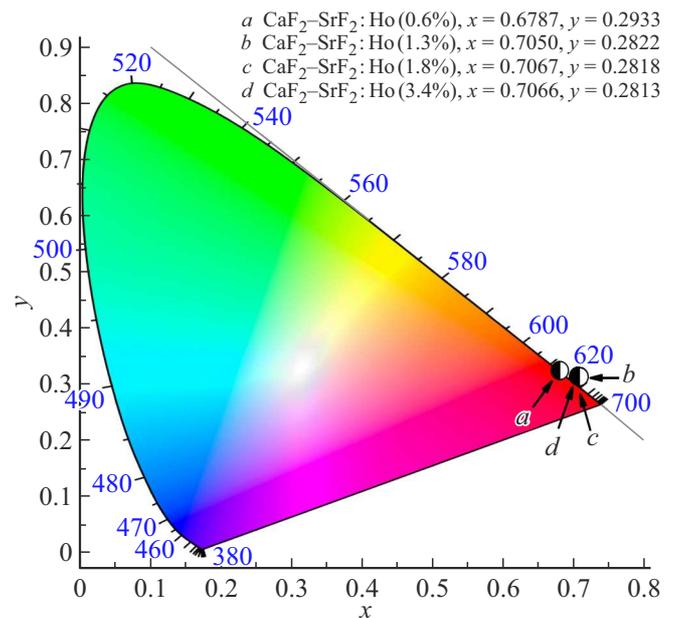


Рис. 6. Хроматическая диаграмма ап-конверсионной люминесценции для монокристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 nm .

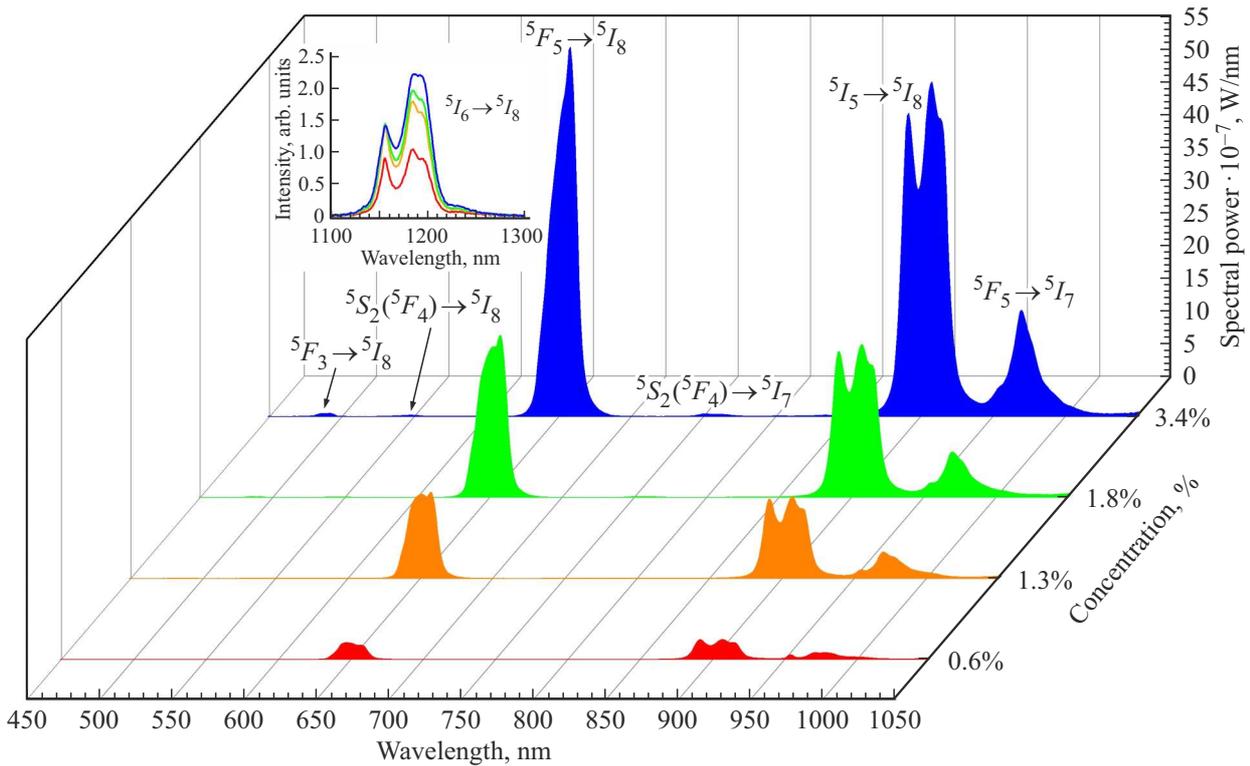


Рис. 7. Зависимость интенсивности ап-конверсионной люминесценции кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ от концентрации ионов Ho^{3+} .

минесценции кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ от концентрации ионов Ho^{3+} (рис. 7). Выявлено, что в диапазоне концентраций 0.6–3.4% ионов Ho^{3+} интенсивность ап-конверсионной люминесценции увеличивается с ростом концентрации этих ионов. Наиболее интенсивная люминесценция характерна для кристалла $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ (3.4%). Данный результат может быть связан с увеличением значений вероятности ап-конверсионных процессов передачи энергии при росте концентрации ионов Ho^{3+} . Фторидные кристаллы со структурой флюорита имеют ярко выраженную тенденцию к ассоциации редкоземельных ионов в кластеры. При образовании ионами Ho^{3+} кластеров в кристаллах $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ происходит уменьшение расстояния между ионами Ho^{3+} . Уменьшение расстояния между ионами Ho^{3+} в свою очередь обеспечивает увеличение эффективности межионного взаимодействия ионов Ho^{3+} [49,50].

Важной характеристикой для оценки применения ап-конверсионного преобразования ИК излучения для повышения эффективности солнечных батарей является энергетический выход. На рис. 8 представлены зависимости энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ в спектральных диапазонах 380–780 nm (рис. 8, a) и 380–1100 nm (рис. 8, b) от концентрации ионов Ho^{3+} и плотности мощности возбуждения. Максимальное значение энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции B_{en} для спектрального диапазона длин волн 380–1100 nm составило 0.09% при плотности мощности возбуждения

170 W/cm^2 для кристалла $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ (3.4%). Для спектрального диапазона длин волн 380–780 nm максимальное значение энергетического выхода составило 0.04%. При возбуждении излучением с плотностью мощностью более 170 W/cm^2 наблюдается насыщение энергетического выхода.

На рис. 8 также представлены значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для кристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$. Анализ литературных данных [31] и результатов, приведенных на рис. 8, показывает, что смешанные фторидные кристаллы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ обладают более высоким энергетическим выходом по сравнению с кристаллами $\text{CaF}_2:\text{Ho}$. Это может быть связано с меньшим значением энергии фононов кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$, что приводит к уменьшению потерь ап-конверсионной люминесценции за счет безызлучательных переходов. Для подтверждения данной гипотезы необходимо проведение исследований более широкого концентрационного ряда.

Полученное значение B_{en} для преобразования излучения двухмикронного спектрального диапазона длин волн на порядок меньше аналогичного значения B_{en} для фторидных материалов, легированных ионами Er^{3+} , которые используются для преобразования излучения в области 1.5 μm и активно используются в лабораторных испытаниях солнечных батарей. Однако значение B_{en} для преобразования излучения двухмикронного спектрального диапазона длин волн в кристаллах $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Ho}$ может быть выше после оптимизации концентрации

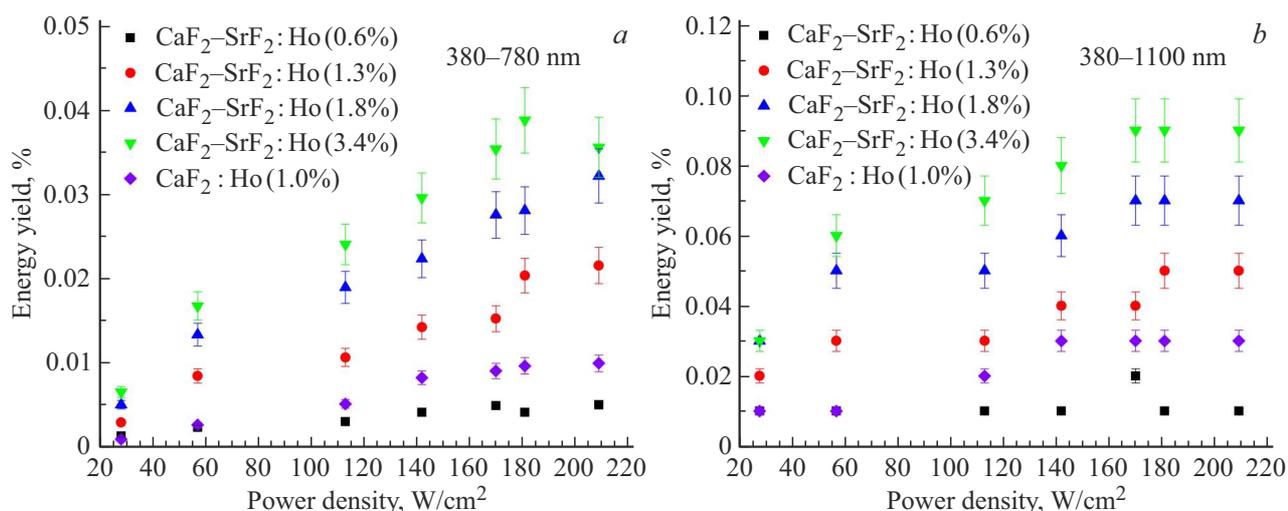


Рис. 8. Зависимости энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ и $\text{CaF}_2\text{:Ho}$ для спектральных диапазонов 380–780 (а) и 380–1100 нм (б) от плотности мощности возбуждающего лазерного излучения.

ионов Ho^{3+} , а также при их солегировании другими редкоземельными ионами.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы характеристики ап-конверсионной люминесценции концентрационного ряда кристаллов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$, выращенных методом вертикальной направленной кристаллизации. При возбуждении уровня 5I_7 ионов Ho^{3+} лазерным излучением с длиной волны 1940 нм были зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции, соответствующие электронным переходам $^5F_3 \rightarrow ^5I_8$, $^5S_2(^5F_4) \rightarrow ^5I_8$, $^5F_5 \rightarrow ^5I_8$, $^5S_2(^5F_4) \rightarrow ^5I_7$, $^5I_4 \rightarrow ^5I_8$, $^5F_3 \rightarrow ^5I_6$, $^5I_5 \rightarrow ^5I_8$, $^5F_5 \rightarrow ^5I_7$ и $^5I_6 \rightarrow ^5I_8$ этих ионов.

При возбуждении лазерным излучением в двухмикронной области спектра кристаллы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ обладают стабильным свечением в красной области спектра.

Максимальное значение энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции V_{en} для кристалла $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ (3.4%) составило 0.09 и 0.04% для спектральных диапазонов длин волн 380–1100 и 380–780 нм соответственно. Возможно, увеличение значения V_{en} для преобразования излучения двухмикронного спектрального диапазона длин волн в кристаллах $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ после оптимизации концентрации ионов Ho^{3+} , а также при их солегировании другими редкоземельными ионами.

Смешанные фторидные кристаллы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ обладают более высоким энергетическим выходом по сравнению с кристаллами $\text{CaF}_2\text{:Ho}$.

Материалы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{:Ho}$ потенциально могут быть использованы в солнечных батареях для увеличения спектрального диапазона преобразования излучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности

Рентгенофазовый анализ исследованных кристаллов выполнен за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (номер проекта FZSM-2022-0021).

Список литературы

- [1] J.C. Goldschmidt, S. Fischer. *Adv. Opt. Mater.*, **3** (4), 510 (2015). DOI: 10.1002/adom.201500024
- [2] T. Trupke, M.A. Green. *J. Appl. Phys.*, **92** (7), 4117 (2002). DOI: 10.1063/1.1505677
- [3] C.M. Johnson, G.J. Conibeer. *J. Appl. Phys.*, **112** (10), 103108 (2012). DOI: 10.1063/1.4766386
- [4] J.A. Briggs, A.C. Atre, J.A. Dionne. *J. Appl. Phys.*, **113** (12), 124509 (2013). DOI: 10.1063/1.4796092
- [5] M. Rüdiger, S. Fischer, A. Frank J. Ivaturi, B.S. Richards, K.W. Krämer, M. Hermle, J.C. Goldschmidt. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **128**, 57 (2014). DOI: 10.1016/j.solmat.2014.05.014
- [6] S. Fuentes, M. Vega, M. Arias, P. Morales. *Mater. Lett.*, **296**, 129889 (2021). DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129889
- [7] B.S. Richards, D. Hudry, D. Busko, A. Turshatov, I.A. Howard. *Chem. Rev.*, **121** (15), 9165 (2021). DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00034
- [8] C.L.M. Hofmann, S. Fischer, E.H. Eriksen, B. Blasi, C. Reitz, D. Yazicioglu, I.A. Howard, B.S. Richards, J.C. Goldschmidt. *Nat. Commun.*, **12** (104), 1 (2021). DOI: 10.1038/s41467-020-20305-x
- [9] S. Fischer, R. Martín-Rodríguez, F. Benjamin, K.W. Krämer, A. Meijerink, J.C. Goldschmidt. *J. Lumin.*, **153**, 281 (2014). DOI: 10.1016/j.jlumin.2014.03.047

- [10] M. Pokhrel, G.A. Kumar, D.K. Sardar. *J. Mater. Chem. A.*, **1** (38), 11595 (2013). DOI: 10.1039/C3TA12205K
- [11] R. Martín-Rodríguez, S. Fischer, A. Ivaturi, B. Froehlich, K.W. Krämer, J.C. Goldschmidt, B.S. Richards, A. Meijerink. *Chem. Mater.*, **25** (9), 1912 (2013). DOI: 10.1021/cm4005745
- [12] А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.В. Гуцин, С.В. Кузнецов, М.В. Чернов, В.Ю. Пройдакова, В.В. Воронов, П.П. Федоров. *Опт. и спектр.*, **125** (4), 516 (2018). DOI: 10.21883/OS.2023.03.55384.4085-22 [А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.В. Гушчин, С.В. Кузнецов, М.В. Чернов, В.Ю. Пройдакова, В.В. Воронов, П.П. Федоров. *Opt. Spectr.*, **125** (4), 537 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18100132].
- [13] А.А. Ляпин, С.В. Гушчин, С.В. Кузнецов, П.А. Рябочкина, А.С. Ермаков, В.Ю. Пройдакова, В.В. Воронов, П.П. Федоров. *Opt. Mater. Express.*, **8** (7), 1863 (2018). DOI: 10.1364/OME.8.001863
- [14] А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.В. Гуцин, М.Н. Жарков, А.С. Ермаков, В.М. Кяшкин, С.В. Прытков, А.В. Атанова. *Опт. и спектр.*, **128** (2), 204 (2020). DOI: 10.21883/OS.2023.03.55384.4085-22 [А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.В. Гушчин, М.Н. Жарков, А.С. Ермаков, В.М. Кяшкин, С.В. Прытков, А.В. Атанова. *Opt. Spectr.*, **128** (2), 200 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20020137].
- [15] A. Ivaturi, S.K.W. MacDougall, R. Martín-Rodríguez, M. Quintanilla, J. Marques-Hueso, K.W. Krämer, A. Meijerink, B.S. Richards. *J. Appl. Phys.*, **114** (1), 013505 (2013). DOI: 10.1063/1.4812578
- [16] S. Fischer, B. Fröhlich, H. Steinkemper, K.W. Krämer, J.C. Goldschmidt. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **122**, 197 (2014). DOI: 10.1016/j.solmat.2013.12.001
- [17] A. Boccolini, R. Faoro, E. Favilla, S. Veronesi, M. Tonelli. *J. Appl. Phys.*, **114** (6), 064904 (2013). DOI: 10.1063/1.4817171
- [18] S. Fischer, E. Favilla, M. Tonelli, J.C. Goldschmidt. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, **136**, 127 (2015). DOI: 10.1016/j.solmat.2014.12.023
- [19] P. Gibart, F. Auzel, J.-C. Guillaume, K. Zahraman. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (8), 4401 (1996). DOI: 10.1143/jjap.35.4401
- [20] A. Shalav, B.S. Richards, T. Trupke, R.P. Corkish, K.W. Krämer, H.U. Güdel, M.A. Green. In: *Proc. of the 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Convers.* (IEEE, 2003), vol. 1, p. 248. DOI: 10.1109/WCPEC.2003.1305268
- [21] A. Shalav, B.S. Richards, T. Trupke. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (1), 013505 (2005). DOI: 10.1063/1.1844592
- [22] S. Fischer, A. Ivaturi, B. Frohlich, M. Rüdiger, A. Richter, K.W. Krämer, B.S. Richards, J.C. Goldschmidt. *EEE J. Photovoltaics*, **4** (1), 183 (2014). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282744
- [23] G.E. Arnaoutakis, S. Fischer, A. Ivaturi, B. Frohlich, M. Rüdiger, A. Richter, K.W. Krämer, B.S. Richards, J.C. Goldschmidt. *Opt. Express.*, **22** (S2), A452 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.00A452
- [24] K.K. Markose, R. Anjana, A. Antony, M.K. Jayaraj. *J. Lumin.*, **204**, 448 (2018). DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.08.005
- [25] D. Liu, Q. Wang, Q. Wang, Beilstein J. Nanotechnol., **9**, 2788 (2018). DOI: 10.3762/bjnano.9.260
- [26] S. Fischer, A. Ivaturi, P. Jakob, K.W. Krämer, R. Martín-Rodríguez, A. Meijerink, B.S. Richards, J.C. Goldschmidt. *Opt. Mater.*, **84**, 389 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.072
- [27] R. Singh, E. Madirov, D. Busko, I.M. Hossain, V.A. Konnyushkin, A.N. Nakladov, S.V. Kuznetsov, A. Farooq, S. Gharibzadeh, U.W. Paetzold, B.S. Richards, A. Turshatov. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **13** (46), 54874 (2021). DOI: 10.1021/acscami.1c13477
- [28] C.M. Verber, D.R. Grieser, W.H. Jones. *J. Appl. Phys.*, **42** (7), 2767 (1971). DOI: 10.1063/1.1660621
- [29] S. Ryszczuńska, T. Grzyb. *Methods Appl. Fluoresc.*, **10** (2), 024001 (2022). DOI: 10.1088/2050-6120/ac4999
- [30] А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, А.Н. Чабушкин, С.Н. Ушаков, П.П. Федоров. *J. Lumin.*, **167**, 120 (2015). DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.06.011
- [31] А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.Н. Ушаков, П.П. Федоров. *Квантовая электроника*, **44** (6), 602 (2014) [А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.Н. Ушаков, П.П. Федоров. *Quantum Electron.*, **44** (6), 602 (2014) DOI: 10.1070/QE2014v044n06ABEH015423].
- [32] А.А. Ляпин, С.В. Кузнецов, П.А. Рябочкина, А.П. Меркулов, М.В. Чернов, Ю.А. Ермаков, А.А. Лужина, П.П. Федоров. *Laser Phys. Lett.*, **14** (7), 076003 (2017). DOI: 10.1088/1612-202X/aa7418
- [33] П.П. Федоров, А.А. Лужина, С.В. Кузнецов, В.В. Воронов, А.А. Ляпин, А.С. Ермаков, Д.В. Поминова, А.Д. Япрынтsev, В.К. Иванов, А.А. Пыненков, К.Н. Нисhev. *Cellulose*, **26** (4), 1 (2019). DOI: 10.1007/s10570-018-2194-4
- [34] A. Guhur, S.D. Jackson. *Opt. Express.*, **18** (19), 20164 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.020164
- [35] А.П. Савикин, И.Ю. Перунин, С.В. Курашкин, А.В. Будруев, И.А. Гришин. *Опт. и спектр.*, **125** (4), 468 (2018). DOI: 10.21883/OS.2023.03.55384.4085-22 [А.П. Савикин, И.Ю. Перунин, С.В. Курашкин, А.В. Будруев, И.А. Гришин. *Opt. Spectr.*, **125** (4), 487 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18100211].
- [36] А.П. Савикин, А.С. Егоров, А.В. Будруев, И.Ю. Перунин, И.А. Гришин. *Письма в ЖТФ.*, **42** (21), 47 (2016). DOI: 10.21883/OS.2023.03.55384.4085-22 [А.П. Савикин, А.С. Егоров, А.В. Будруев, И.Ю. Перунин, И.А. Гришин. *Tech. Phys. Lett.*, **42** (11), 1083 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016110079].
- [37] А.П. Савикин, К.Е. Сумачев, С.В. Курашкин, О.В. Крашениникова, А.В. Будруев, И.А. Гришин. *Laser Phys. Lett.*, **17** (4), 045701 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/ab7346
- [38] I. Richman. *J. Chem. Phys.*, **41** (9), 2836 (1964). DOI: 10.1063/1.1726360
- [39] П.П. Федоров, В.В. Осико. *Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical & Optoelectronic Materials*, ed. by P. Capper (John Wiley & Sons, Ltd, England, 2005), ch. 11, p. 339-352. DOI: 10.1002/9780470012086.ch11
- [40] П.П. Федоров, И.И. Бучинская. *Успехи химии*, **81** (1), 1 (2012) [П.П. Федоров, И.И. Бучинская. *Russ. Chem. Rev.*, **81** (1), 1 (2012). DOI: 10.1070/RC2012v081n01ABEH004207].
- [41] С.В. Кузнецов, П.П. Федоров. *Inorg. Mater.*, **44** (13), 1434 (2008). DOI: 10.1134/S0020168508130037
- [42] W.D. Wright. *Trans. Opt. Soc.*, **30** (4), 141 (1929). DOI: 10.1088/1475-4878/30/4/301
- [43] J. Guild. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **230**, 149 (1931). DOI: 10.1098/rsta.1932.0005
- [44] А.В. Рябова, Д.В. Поминова, А.В. Крутько, М.Г. Комова, В.Б. Лосченков. *Photon. Lasers Med.*, **2** (2), 117 (2013). DOI: 10.1515/plm-2013-0013
- [45] A. Kobayashi. *Absolute Measurements of Photoluminescence Quantum Yields of Organic Compounds Using an Integrating Sphere*. PhD thesis (Gunma University, Japan, 2010). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/141874874.pdf>

- [46] J.C. Boyer, F.C.J.M. Veggel. *Nanoscale*, **2** (8), 1417 (2010). DOI: 10.1039/C0NR00253D
- [47] H. Field. In: *Conf. Record of the 26rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 1997), p. 471. DOI: 10.1109/pvsc.1997.654130
- [48] L.P. Boivin, W. Budde, C.X. Dodd, S.R. Das. *Appl. Opt.*, **25** (16), 2715 (1986). DOI: 10.1364/ao.25.002715
- [49] А.М. Прохоров, В.В. Осико. *Проблемы современной кристаллографии*, под ред. Б.К. Вайнштейна, А.А. Чернова, Х.С. Багдасарова, М.В. Классен-Неклюдовой, Е.В. Цинзерлинг, Л.А. Шувалова, В.А. Юрина, В.А. Ляховицкой (Наука, Москва, 1975), с. 280–301.
- [50] F. Auzel. *Chem. Rev.*, **104**, 139 (2004). DOI: 10.1021/cr020357g