7. Болдырев К. Н. Спектроскопическое исследование редкоземельных алюминиевых и хромовых боратов со структурой хантита: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Болдырев Кирилл Николаевич. Троицк, 2011. 28 с.

8. Соколов А. Э. Магнитный круговой дихроизм и оптическая спектроскопия иона Tm^{3+} в монокристалле $TmAl_3(BO_3)_4$: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.11 / Соколов Алексей Эдуардович. Красноярск, 2010. 23 с.

9. Energy transfer from Er^{3+} to Tm^{3+} and Ho^{3+} ions in crystals / L. F. Johnson, L. G. Van Uitern, J. J. Rubin, R. A. Thomas // Physical Review. 1964. Vol. 133. № 2A. P. 494–498.

10. Enhanced white light emission in Er/Tm/Yb/Li codoped Y_2O_3 nanocrystals / Y. Bai, Y. Wang, G. Peng, W. Zhang, Y. Wang, K. Yang, X. Zhang, Y. Song // Optics Communications. 2009. Vol. 282. P. 1922–1924.

11. Синтез и исследование ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{1-X}Yb_X)_2O_3$ при лазерном возбуждении / О. Я. Манаширов, В. А. Воробьев, Б. М. Синельников, Е. М. Зверева // Вестник СевКав ГТУ. 2011. № 8. С. 14 – 24.

12. Broadband amplified spontaneous emission from an Er^{3+}–Tm^{3+}-codoped silica fiber / H. Jeong, K. Oh, S. R. Han, T. F. Morse // Optics letters. 2003. Vol. 28. № 3. P. 161–163.

13. $ND^{3+}\rightarrow YB^{3+}$ ENERGY TRANSFER IN THE $YAL_3(BO_3)_4$ NONLINEAR LASER CRYSTAL / D. JAQUE, M. O. RAMIREZ, L. E. BAUSA, J. G. SOLE, E. CAVALLI, A. SPHEGHINI, M. BETINELLI // PHYS. REV. B. 2003. VOL. 68.

УДК 544.03:546.65

Поздняков Егор Игоревич

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(Y_{1-X-Y-Z}YB_XER_YHO_Z)_3AL_5O_{12}$ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Синтезированы твердые растворы состава $(Y_{1-x-y-z}Yb_xEr_yHo_z)_3Al_5O_{12}$, изучены их люминесцентные характеристики, установлены зависимости интенсивности стоксовой ИК-люминесценции в диапазонах 0,96–1,1 мкм и 1,44–1,68 мкм, 1,83–2,15 мкм, от концентрации ионов, Yb^{3+}, Er^{3+}, Ho^{3+}, при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 0,94 мкм. Проведен анализ полученных зависимостей и определен оптимальный состав люминофора $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$, обеспечивающий максимальную эффективность преобразования энергии из ближней ИК-области в область 2100 нм.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, люминесценция, $Y_3Al_5O_{12}$, эрбий, гольмий, иттербий.

Pozdnyakov Egor I.

THE SYNTHESIS AND STUDY OF THE LUMINESCENCE PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS $(Y_{1-X-Y-Z}YB_XER_YHO_Z)_3AL_5O_{12}$ WITH LASER EXCITATION

Synthesized solid solutions of $(Y_{1-x-y-z}Yb_xEr_yHo_z)_3Al_5O_{12}$, studied their luminescence characteristics, the dependence of the intensity of the Stokes IR luminescence band 0,96–1.1 microns and 144–1.68 microns, 1,83–2,15 microns, the concentration of ions, Yb^{3+}, Er^{3+}, Ho^{3+}, when excited by laser radiation with a wavelength of 0,94 microns. The analysis of the obtained relationships and determined the optimal composition of the phosphor $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$, for maximum energy conversion efficiency from the near-infrared region at 2100 nm.

Key words: rare earth elements, luminescence, $Y_3Al_5O_{12}$, erbium, holmium, ytterbium.

На современном этапе развития науки и техники остро стоит вопрос поиска материалов, способных эффективно преобразовывать энергию из ближнего ИК-диапазона в диапазон более 2 мкм. Полидисперсные люминофоры на основе алюминатов РЗЭ со структурой граната давно известны как материалы, обладающие большим набором положительных качеств, таких как: высокая температурная, радиационная и химическая стойкость, также они положительно проявляют себя при высоких плотностях накачки или возбуждения, обладают отличными механическими и оптическими свойствами. Однако до настоящего времени порошковые люминофоры на основе соединений со структурой граната не изучались применительно к преобразованию энергии из ближнего ИК-диапазона в диапазон > 2000 нм. Поэтому исследования, направленные на поиск редкоземельных активаторов для алюмоиттриевого граната и их сочетаний, способных к преобразованию энергии в требуемых спектральных диапазонах является важной и актуальной задачей.

Объектом исследования служили концентрационные серии образцов твердых растворов, $(Y_{1-x-y-z}Yb_xEr_yHo_z)_3Al_5O_{12}$, где $0 \le x \le 1$, $0 \le y \le 1$, $0 \le z \le 1$. Требования к исходным веществам, а также методики проведения рентгено-фазового анализа и измерения спектров люминесценции приведены в работах [1, 2].

Анализ литературных данных показал, что для получения полос люминесценции в области 2100 нм наиболее приемлемым является ион гольмия за счет уникальной структуры термов, которые обеспечивают эффективное преобразование энергии из ближней ИК-области в энергию требуемого диапазона. Однако для эффективного протекания процесса преобразования энергии возбуждающего излучения с длиной волны 940 нм, необходимо дополнительно вводить в состав люминофора сенсибилизирующие ионы. Сопоставление энергетических структур ионов иттербия, эрбия и гольмия показало, что излучательные уровни этих ионов находятся в некоторой близости по значению энергии, и, предположительно, между ними может эффективно протекать передача энергии.

Проведя сопоставительный анализ схем энергетических уровней ионов иттербия, гольмия и эрбия, сделан вывод о том, что энергетический зазор ΔE между возбужденными уровнями $^5I_6$ иона Ho^{3+} и $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} значительно меньше максимальной энергии фонона в кристаллической решетке алюмоиттриевого граната [3]. Кроме того, возможны безызлучательные переходы между излучательными уровнями иона эрбия $^4I_{13/2}$ и излучательным уровнем $^5I_8$ иона гольмия (рис. 1).

Для проверки возможности преобразования энергии из области возбуждения (940 нм) в область 2100 нм проведен синтез концентрационной серии образцов люминофоров с общей формулой $(Y_{0.85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$, где $(10^{-4} \le x \le 10^{-1})$.

Концентрация ионов иттербия выбрана как оптимальная, обеспечивающая максимальную интенсивность люминесценции в области 0,96–1,1 мкм в твердом растворе $(Y_{1-x}Yb_x)_3Al_5O_{12}$ [1]. Концентрация ионов эрбия также выбрана как оптимальная, при которой обусловливается максимальная интенсивность люминесценции в области 1,5 мкм в твердом растворе $(Y_{0,9-x}Yb_{0,1}Er_x)_3Al_5O_{12}$ [2].

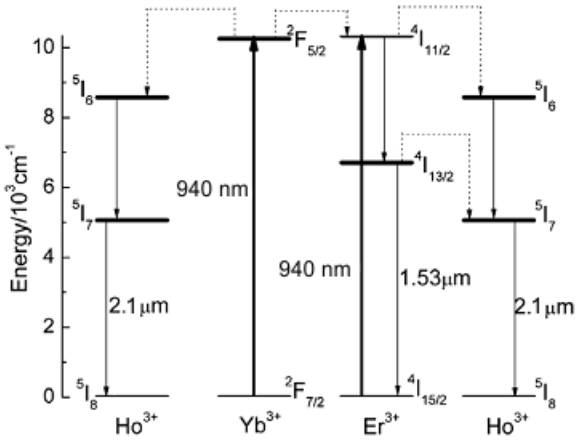

Рис. 1. Схема возможных энергетических переходов в твердых растворах $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 940 нм [4]

На рисунках 2, 3, 4 приведены фрагменты спектров стоксовой ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$.

Спектр стоксовой ИК-люминесценции представляет собой три широких области полос люминесценции в следующих диапазонах длин волн: 0,96–1,1 мкм, обусловленные излучательными переходами между штарковскими компонентами уровней в ионе иттербия $^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ [1, 2]; 1,44–1,68 мкм, обусловленные излучательными переходами между штарковскими компонентами уровней $^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в ионе эрбия [5]; 1,83–2,15 мкм, обусловленные излучательными переходами между штарковскими компонентами уровней $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ в ионе гольмия [4].

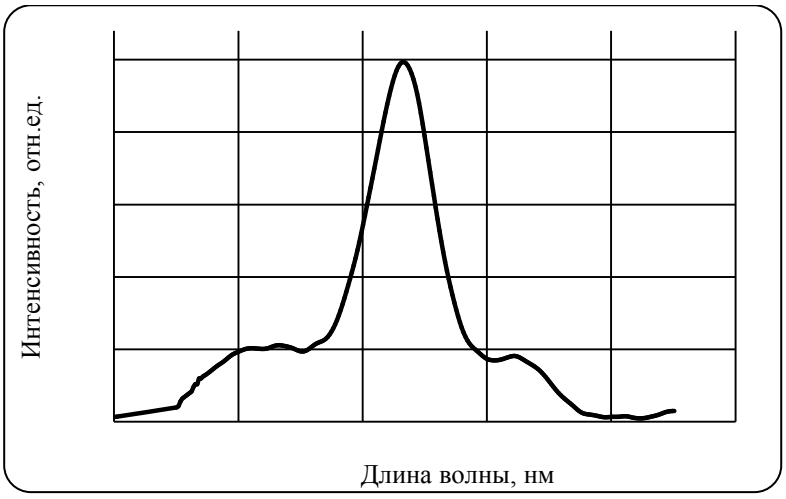

Рис. 2. Фрагмент спектра стоксовой ИК-люминесценции твердыхрастворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ в области 990–1070 нм при возбуждении лазерным излучением с длиной волны *940 нм*

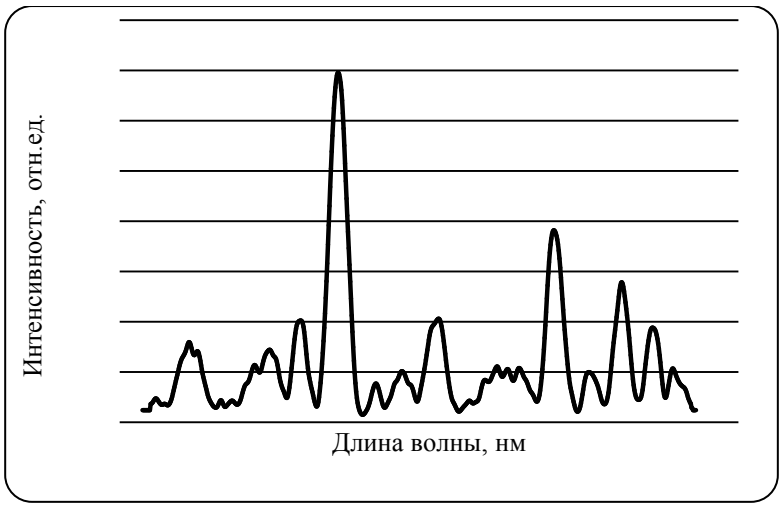

Рис. 3. Фрагмент спектра стоксовой ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ в области 1440–1680 нм при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 940 нм

Рис. 4. Фрагмент спектра стоксовой ИК-люминесценции твердыхрастворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ в области 1830–2150 нм при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 940 нм

Сравнительный анализ спектров люминесценции твердых растворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ при возбуждении излучением 0,94 мкм позволил сделать вывод, что с увеличением концентрации Ho^{3+} существенно меняется интенсивность ИК-полос излучения в области 1450–2160 нм в пользу более длинноволновых полос. Такое изменение соотношения интенсивностей ИК-полос люминесценции Ho^{3+} может быть связано как с тривиальной реабсорбцией, так и с изменением при увеличении концентрации Ho^{3+} характера миграции энергии возбуждения по объему кристалла люминофора, в результате чего преимущественно оказываются заселенными низко расположенные по энергии метастабильные уровни ионов гольмия. Помимо этого, с увеличением концентрации ионов гольмия растет вероятность осуществления процессов заселения излучательных уровней ионов Ho^{3+}, соответственно происходит более интенсивный отток энергии с излучательных уровней ионов Er^{3+}.

На рисунке 5 приведена зависимость интенсивности стоксовой ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ в области 2,1 мкм от концентрации ионов гольмия.

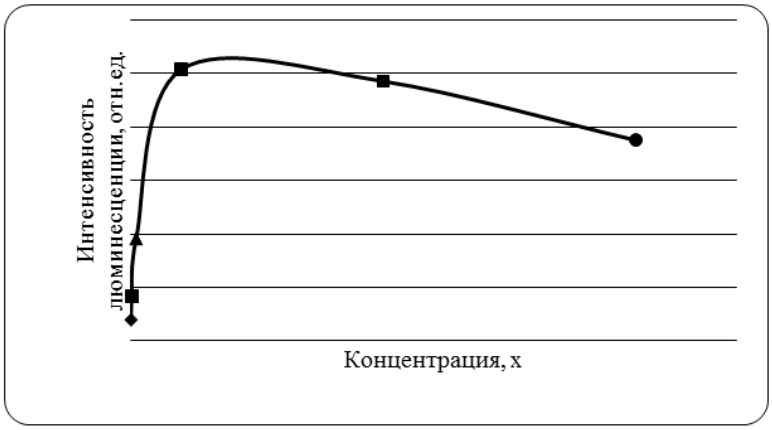

Рис. 5. Зависимость интенсивности стоксовой ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ в области 2100 нм от концентрации ионов Ho^{3+}

Характер указанной зависимости дает основания полагать, что в указанной системе при изменении концентрации ионов гольмия происходит совместное конкурирующее действие нескольких процессов, один из которых способствует усилению, а другие – ослаблению стоксовой ИК-люминесценции ионов гольмия в $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ при ИК-возбуждении. При низких концентрациях Ho^{3+} ($0 \le x\ 10^{-3}$) увеличение их содержания в твердом растворе приводит почти к пропорциональному росту интенсивности ИК-люминесценции в области 2,1 мкм, что объясняется симбатным увеличением количества поглощающих и излучающих ионов гольмия. При таких концентрациях гольмия скорость миграции возбуждения по ионам активатора невелика, поэтому роль процессов, которые приводят к тушению стоксовой ИК-люминесценции гольмия в области 2,1 мкм, весьма незначительна. При дальнейшем увеличении концентрации ионов гольмия ($10^{-3} \le x \le 10^{-2}$) происходит значительное увеличение вероятности миграции энергии, а также пространственное сближение возбужденных ионов гольмия с различными тушащими центрами и, как следствие, развитие процесса тушения. В результате совместного конкурирующего действия вышеуказанных процессов дальнейший рост интенсивности стоксовой ИК-люминесценции в области 2,1 мкм замедляется, при концентрации ионов гольмия x = 0,01 достигает своего максимального значения.

Также значительное влияние концентрация ионов гольмия оказывает на соотношение и интенсивность других полос люминесценции, обусловленных оптическими переходами внутри ионов иттербия и эрбия.

На рисунке 6 представлены логарифмические зависимости интенсивности люминесценции в полосах 1036 нм и 1652 нм от концентрации гольмия.

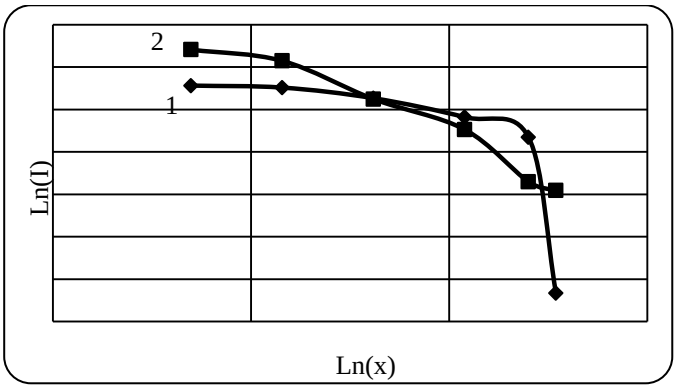

Рис. 6. Логарифмические зависимости интенсивности люминесценции в полосах 1) 1036 нм; 2) 1652 нм в твердом растворе $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ от концентрации ионов Ho^{3+}

Как видно из представленного рисунка, обе зависимости имеют вид затухающих кривых. При нулевой концентрации ионов гольмия интенсивность полосы люминесценции в области 1036 нм максимальна. При увеличении концентрации ионов гольмия в пределах ($10^{-4} \le x \le 5 \cdot 10^{-2}$) наблюдается существенное уменьшение интенсивности люминесценции в области 1036 нм. При дальнейшем увеличении концентрации ионов гольмия наблюдается более резкое падение интенсивности люминесценции, которое достигает минимума при максимальной концентрации ионов гольмия ($x = 10^{-1}$).

Аналогично для полосы люминесценции в области 1652 нм при нулевой концентрации ионов гольмия интенсивность этой полосы люминесценции максимальна, и при увеличении концентрации ионов гольмия интенсивность этой полосы люминесценции значительно снижается, и при максимальной концентрации ионов гольмия становится минимальной.

Такие зависимости свидетельствуют об эффективном оттоке энергии с излучательных уровней иттербия и эрбия на излучательные уровни иона Ho^{3+}, тем самым увеличивая его населенность носителями заряда и вероятность излучательных процессов со штарковских компонентов уровня $^5I_7$ на основной уровень $^5I_8$ иона Ho^{3+}.

На основе анализа указанных зависимостей можно сделать вывод, что концентрация ионов гольмия вносит существенный вклад в общий характер люминесценции, интенсивность и соотношение полос люминесценции в твердых растворах $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ и дает основания полагать, что наряду с процессом последовательной передачи энергии возбуждающего излучения через излучательные уровни ионов иттербия, эрбия на ион гольмия существует процесс прямой передачи энергии возбуждения с излучательного уровня иона иттербия на ион гольмия.

Таким образом, на основе вышеизложенного, а также с учетом данных о значении энергии уровней ионов эрбия и гольмия в кристаллической решетке АИГ, приведенных авторами [6, 7], можно предположить, что механизм люминесценции твердого раствора $(Y_{0,85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ при ИК-возбуждении протекает следующим образом.

При возбуждении твердых растворов $(Y_{0.85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$ лазерным излучением с длиной волны 0,94 мкм электроны из основного состояния $^2F_{7/2}$ иона Yb^{3+} поглощают фотоны энергии и переходят в возбужденное состояние $^2F_{5/2}$. Разница энергий между ближайшими штарковскими компонентами в данном случае составляет

$$\Delta E = 10327 \text{ см}^{-1} - 8500 \text{ см}^{-1} = 1827 \text{ см}^{-1}.$$

При этом часть энергии расходуется на излучательный переход при переходе электронов обратно на основной уровень, что обусловливает появление люминесценции в области 0,96–1,1 мкм. В данном случае разница энергий между ближайшими штарковскими компонентами данных уровней составляет

$$\Delta E = 10327 \text{ см}^{-1} - 785 \text{ см}^{-1} = 9542 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует 11 энергиям фонона в кристаллической решетке АИГ, поэтому в данном случае происходит излучательный переход.

В то же время существует вероятность прямой передачи энергии между ионами иттербия и гольмия. В таком случае с возбужденного состояния $^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+} энергия передается на уровень $^5I_6$ иона Ho^{3+}, при этом энергетический зазор между указанными уровнями составляет

$$\Delta E = 10327 \text{ см}^{-1} - 8954 \text{ см}^{-1} = 1373 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует величине около 1,6 энергии фонона в кристаллической решетке АИГ, поэтому в данном случае передача энергии происходит безызлучательно.

Энергия, запасенная на уровне $^5I_6$ иона Ho^{3+}, безызлучательно релаксирует на нижележащий уровень $^5I_7$. Энергетический зазор между ближайшими штарковскими компонентами указанных уровней составляет

$$\Delta E = 8721 \text{ см}^{-1} - 5467 \text{ см}^{-1} = 3254 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует примерно 3,8 энергии фонона в кристаллической решетке АИГ. Это подтверждает, что в данном случае передача энергии происходит безызлучательно.

С уровня $^5I_7$ иона гольмия происходит излучательный переход $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ с появлением полос люминесценции в области 2100 нм. Разница энергий между ближайшими штарковскими компонентами указанных уровней составляет

$$\Delta E = 5303 \text{ см}^{-1} - 531 \text{ см}^{-1} = 4772 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует 5,5 энергий фонона в кристаллической решетке АИГ, поэтому в данном случае процесс излучательной передачи более вероятен.

Уровень $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} является более близким по значению энергии к уровню $^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+} ($\Delta E = 87$ см$^{-1}$), чем уровень $^4I_{11/2}$ иона Ho^{3+} ($\Delta E = 1373$ см$^{-1}$), соответственно можно сделать вывод, что механизм передачи энергии по схеме $^2F_{5/2}$ (Yb^{3+})$\rightarrow {}^4I_{11/2}$ (Er^{3+}) является более вероятным, чем процесс передачи энергии по схеме $^2F_{5/2}$ (Yb^{3+})$\rightarrow {}^5I_6$ (Ho^{3+}), при этом часть энергии с возбужденного уровня $^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+} резонансно передается на уровень $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+}, откуда часть энергии сразу передается на уровень $^5I_6$ иона Ho^{3+}. При этом разность энергий между ближайшими штарковскими компонентами уровней $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} и $^5I_6$ иона Ho^{3+} составляет

$$\Delta E = 10174 \text{ см}^{-1} - 8954 \text{ см}^{-1} = 1220 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует примерно 1,4 энергии фонона в кристаллической решетке АИГ. Это подтверждает, что в данном случае передача энергии происходит безызлучательно.

Данный процесс можно представить в виде:

$^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}) + $h\nu_{940\text{нм}} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ (Yb^{3+})

$^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) + $h\nu_{940\text{нм}} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (Er^{3+})

$^2F_{5/2}$ (Yb^{3+}) + $^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) $\rightarrow {}^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}) + $^4I_{11/2}$ (Er^{3+})

$^4I_{11/2}$ (Er^{3+}) + $^5I_8$ (Ho^{3+}) $\rightarrow {}^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) + $^5I_6$ (Ho^{3+})

$^5I_6$ (Ho^{3+}) $\rightarrow {}^5I_7$ (Ho^{3+})

$^5I_7$ (Ho^{3+}) $\rightarrow {}^5I_8$ (Ho^{3+}) + $h\nu_{2100\text{нм}}$

Третий канал заселения излучательного уровня $^5I_7$ иона Ho^{3+} заключается в следующем процессе. Часть энергии с возбужденного уровня $^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+} передается на уровень $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+}, затем энергия за счет многофононной релаксации передается на нижележащий уровень $^4I_{13/2}$. С уровня $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} энергия передается на уровень $^5I_7$ иона Ho^{3+}. При этом разность энергий между ближайшими штарковскими компонентами указанных уровней составляет

$$\Delta E = 6471 \text{ см}^{-1} - 5467 \text{ см}^{-1} = 1004 \text{ см}^{-1},$$

что соответствует примерно 1,1 энергии фонона в кристаллической решетке АИГ. Это подтверждает, что в данном случае передача энергии происходит безызлучательно.

С уровня $^4I_{13/2}$ иона эрбия происходит излучательный переход между штарковскими компонентами уровней $^4I_{13/2}\rightarrow {}^4I_{15/2}$ с появлением полос люминесценции в области 1440–1680 нм. В данном случае разница энергии между штарковскими компонентами указанных уровней меняется от6471 см$^{-1}$ до 6895 см$^{-1}$.

С уровня $^5I_7$ иона гольмия происходит излучательный переход $^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ с появлением полос люминесценции в области 2100 нм. Разница энергий между ближайшими штарковскими компонентами указанных уровней составляет

$$\Delta E = 5303 \text{ см}^{-1} - 531 \text{ см}^{-1} = 4772 \text{ см}^{-1},$$

что составляет 5,5 энергий фонона в кристаллической решетке АИГ, поэтому в данном случае, процесс излучательной передачи более вероятен.

Данный процесс можно представить в виде

$^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}) + $hv_{940нм}$ → $^2F_{5/2}$ (Yb^{3+})
$^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) + $hv_{940нм}$ → $^4I_{11/2}$ (Er^{3+})
$^2F_{5/2}$ (Yb^{3+}) + $^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) → $^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}) + $^4I_{11/2}$ (Er^{3+})
$^4I_{11/2}$ (Er^{3+}) → $^4I_{13/2}$ (Er^{3+})
$^4I_{13/2}$ (Er^{3+}) + $^5I_8$ (Ho^{3+}) → $^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) + $^5I_7$ (Ho^{3+})
$^5I_7$ (Ho^{3+}) → $^5I_8$ (Ho^{3+}) + $hv_{2100нм}$

В пользу указанного механизма также говорит тот факт, что энергия, запасаемая на возбужденном уровне иона эрбия $^4I_{11/2}$, частично переходит безызлучательно на возбужденный уровень $^5I_6$ иона гольмия, что приводит к снижению интенсивности заселения излучательного уровня $^4I_{13/2}$, следовательно, интенсивность излучательного перехода $^4I_{13/2}$→$^4I_{15/2}$ в ионе Er^{3+} падает, что и видно из логарифмической зависимости интенсивности люминесценции в области 1,44–1,68 мкм от концентрации ионов Ho^{3+}, представленной на рисунке 6.

Таким образом, проведен синтез твердых растворов, $(Y_{0.85-x}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$, предложены механизмы стоксовой ИК-люминесценции в диапазонах 0,96–1,1 мкм и 1,44–1,68 мкм, 1,83–2,15 мкм, а также зависимости интенсивностей люминесценции в соответствующих полосах от концентрации вводимых активаторов, установлен оптимальный состав люминофора, обеспечивающий максимальную интенсивность люминесценции в области 2000–2150 нм при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 940 нм. Таким составом является $(Y_{0,84}Yb_{0,1}Er_{0,05}Ho_x)_3Al_5O_{12}$.

Литература

1. Поздняков Е. И. Синтез и исследование ИК-люминесценции твердых растворов $(Y_{1-x}Yb_{0,1}Tm_x)_3Al_5O_{12}$ при лазерном возбуждении // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 2 (35). С. 113–118.

2. Поздняков Е. И., Воробьев В. А. Изучение зависимости интенсивности и спектров люминесценции $(Y_{1-x}Yb_{0,1}Er_x)_3Al_5O_{12}$ при лазерном возбуждении // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3 (36). С. 145–150.

3. Susanne T. Fredrich-Thornton. Nonlinear Losses in Single Crystalline and Ceramic Yb:YAG Thin-Disk Lasers. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrandes des Department Physik der Universitat Hamburg. 2010. 222 p.

4. Yi L. X., Wang S. Y., Chen G. N. Emission properties of Ho^{3+}: $^5I_7$→$^5I_8$ transition sensitized by Er^{3+} and Yb^{3+} in fluorophosphates glasses // Optical Materials. 2009. Vol 31. P. 1586–1590.

5. White Jeffrey O., Mungan Carl E. Measurment of upconversion in Er:YAG via z-scan // J. Opt. Soc. Am. B. Vol.28. No. 10. P. 2358–2361.

6. Gruber John B., Nijjar A. S., Sardar D. K. Spectral analysis and energy-level structure of Er^{3+} ($4f^{11}$) in polycrystalline ceramic garnet $Y_3Al_5O_{12}$ // Journal of applied physics. 2005. Vol. 97. P. 1–8.

7. Gruber John B., Seltzer M. D. Electronic energy-level structure of trivalent holmium in yttrium aluminum garnet // Journal of applied physics. 1995. Vol. 77 (11). P. 5882–5901.