

Литература

1. Филатов Ю. В. Оптические гироскопы. –СПб: ГЭТУ ЛЭТИ, 2005. – 139 с.
2. Оборудование и компоненты для производства волоконнооптических гироскопов [Электронный ре-

сурс]. – Режим доступа: <https://sphotronics.ru/solutions/vog-sboraka-i-proizvodstvo-komponentov/>.

3. Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://razrabotka-modeli-volokonno-opticheskogo-giroskopa-v-srede-simulink.pdf>.

УДК 535.37

**МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ОТ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ К ИОНАМ ТУЛИЯ
ВО ФТОРФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ
ИОНОВ ИТТЕРБИЯ**

Ясюкевич А. С.¹, Колобкова Е. В.², Кисель В. Э.¹

¹НИИЦ ОМТ, Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Университет ИТМО

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Изучены спектроскопические характеристики фтор-фосфатных стекол с малым содержанием фосфатов, соактивированных ионами Yb^{3+} и Tm^{3+} , проанализированы механизмы переноса энергии между ионами иттербия и тулия в зависимости от концентрации ионов Yb^{3+} в стационарном и импульсном режимах возбуждения люминесценции.

Ключевые слова: ионы тулия, ионы иттербия, перенос энергии, ап-конверсионная люминесценция.

**MECHANISMS OF ENERGY TRANSFER FROM YTTERBIUM IONS TO THULIUM IONS
IN FLUOROPHOSPHATE GLASSES UNDER VARIOUS REGIMES OF YTTERBIUM ION
EXCITATION**

Yasukevich A.¹, Kolobkova E.², Kisel V.¹,

¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

²ITMO University, Saint-Petersburg

Russian Federation

Abstract. Spectroscopic characteristics of fluorophosphate glasses with a low content of phosphates co-doped with Yb^{3+} and Tm^{3+} ions were studied, and energy transfer mechanisms between ytterbium and thulium ions were analyzed depending on the concentration of Yb^{3+} ions in stationary and pulsed luminescence excitation regimes.

Key words: thulium ions, ytterbium ions, energy transfer, up-conversion luminescence.

Адрес для переписки: Ясюкевич А. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Стекла и кристаллы, активированные ионами редкоземельных элементов, излучающие в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра при возбуждении излучением в инфракрасной области (ИК) спектра привлекают к себе большое внимание в связи с их применением в твердотельных лазерах, медицине и термометрии.

В материалах со-активированных ионами иттербия (Yb^{3+}) и тулия (Tm^{3+}), ионы Yb^{3+} служат донорами, обеспечивающими эффективный перенос энергии к ионам Tm^{3+} , в результате которого наблюдается ап-конверсионная люминесценция в УФ и видимой областях спектра.

Данная работа является продолжением работы [1], где была исследована ап-конверсионная люминесценция фтор-фосфатных стекол с низким содержанием фосфатов, активированных ионами Yb^{3+} и Tm^{3+} . Концентрация ионов Yb^{3+} была постоянной, 10^{21} см^{-3} , а концентрация ионов Tm^{3+} изменялась в пределах $10^{20} \text{ см}^{-3} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В [1] было показано, что при стационарном возбуждении ионов Yb^{3+} в стеклах с содержанием TmF_3 2.0–0,25 мол. % превалирует последовательный механизм переноса энергии (sequential energy transfer, SET) от ионов Yb^{3+} , находящихся на уровне $^2\text{F}_{5/2}$, к ионам Tm^{3+} , приводящий к заселению уровня $^1\text{G}_4$, переходы с которого $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ и $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$, обуславливают люминесценцию на 477 нм и 650 нм, соответственно. При уменьшении содержания $\text{TmF}_3 < 0,1$ мол. %, заселение уровня $^1\text{G}_4$ происходит в основном вследствие кооперативного переноса энергии (cooperative energy transfer, CET) от кластеров, Yb-Yb , где оба иона находятся в возбужденном состоянии. Люминесценция ионов Tm^{3+} на 800 нм связывается с переходами $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$, процесс заселения уровня $^3\text{H}_4$ обусловлен последовательным переносом энергии.

В данной работе сообщаются результаты исследования ап-конверсионной люминесценции в стеклах аналогичного состава как и в [1], с тем

отличаем, что здесь концентрация ионов Tm^{3+} остается постоянной, $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а концентрация ионов Yb^{3+} изменяется в пределах $4,1 \cdot 10^{20} - 22,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Основное внимание здесь уделяется изучению механизмов возбуждения и дезактивации уровней энергии ионов Yb^{3+} и Tm^{3+} при различных режимах возбуждения.

Для изучения особенностей возбуждения ап-конверсионной люминесценции в исследуемых стеклах мы ограничились наиболее интенсивными линиями в спектре ап-конверсионной люминесценции ионов Tm^{3+} на 475 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3H_6$), 650 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3F_4$) и 800 нм ($^1G_4 \rightarrow ^3H_5$, $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$). Были исследованы зависимости мощности ап-конверсионной люминесценции P_{lum} ионов Tm^{3+} от стационарной мощности возбуждающего излучения P_{pump} ионов Yb^{3+} в двойной логарифмической шкале.

Типичный вид ап-конверсионных спектров люминесценции и зависимостей для различных длин волн ап-конверсионной люминесценции $\ln(P_{lum}) = n \ln(P_{pump}) + \text{const}$ представлен на рисунке 1 для стекла с содержанием YbF_3 10,6 мол. %. Здесь параметр n определяет число фотонов необходимых для заселения уровней энергии ионов Tm^{3+} при переносе энергии возбуждения от Yb^{3+} к Tm^{3+} .

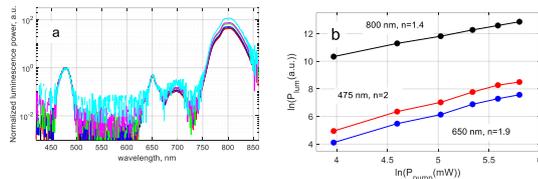


Рисунок 1 – Спектр ап-конверсионной люминесценции (a) ионов Tm^{3+} и зависимости мощности люминесценции от мощности излучения возбуждения (b)

В таблице 1 представлены значения параметра n для исследуемых стекол.

Таблица 1 – Значения параметра n для стекол с различной концентрацией Yb^{3+}

$N_{Yb}, \text{ см}^{-3}$	$YbF_3, \text{ мол. \%}$	800 нм, n	650 нм, n	477 нм, n
$8,2 \cdot 10^{20}$	4	1,8	2,5	2,5
$10,2 \cdot 10^{20}$	5	1,7	2,4	2,5
$17,0 \cdot 10^{20}$	8	1,7	2,3	2,4
$18,2 \cdot 10^{20}$	9	1,7	2,2	2,3
$22,5 \cdot 10^{20}$	11	1,4	1,9	2

Как видно из таблицы 1, с увеличением концентрации ионов Yb^{3+} изменяется характер заселения уровня 1G_4 , который является начальным при переходах, обуславливающих люминесценцию на 475 нм и 650 нм. При малых концентрациях преобладает перенос энергии возбуждения по схеме SET, в который вовлечены три фотона, $n \approx 3$. При возрастании концентрации ионов Yb^{3+} преобладающим становится перенос энергии возбуждения

по схеме CET, $n \approx 2$. Схемы SET и CET при переносе энергии показаны на рисунке 2.

Для возбуждения люминесценции на 800 нм требуется ≈ 2 фотона, следует, однако, учитывать, что в эту линию дает вклад как переход $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ (800 нм), так и переход $^1G_4 \rightarrow ^3H_5$ (785 нм).

Были зарегистрированы также кинетики люминесценции ионов Yb^{3+} и Tm^{3+} при возбуждении стекол световыми импульсами длительностью ≈ 20 нс в линию поглощения ионов Yb^{3+} , ≈ 975 нм. Кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} в видимой и ИК областях спектра имеют как участки разгорания так и затухания люминесценции.

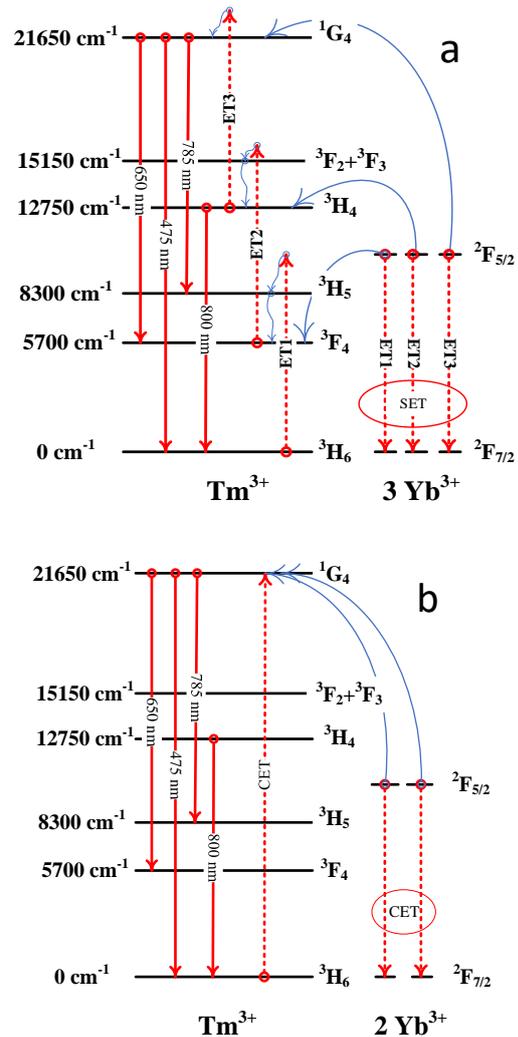


Рисунок 2 – Схема последовательного, SET (a) [2] и кооперативного, CET (b) [3] переноса энергии. Штриховые стрелки – безызлучательные переходы, участвующие в переносе энергии, волнистые стрелки – релаксация с участием фононов, сплошные стрелки – переходы, обуславливающие ап-конверсионную люминесценцию

На рисунке 3 представлены кинетики ап-конверсионной люминесценции ионов Tm^{3+} для стекол с содержанием YbF_3 11 мол. % и 4 мол. % в

сопоставлении с кинетиками люминесценции ионов Yb^{3+} в этих стеклах.

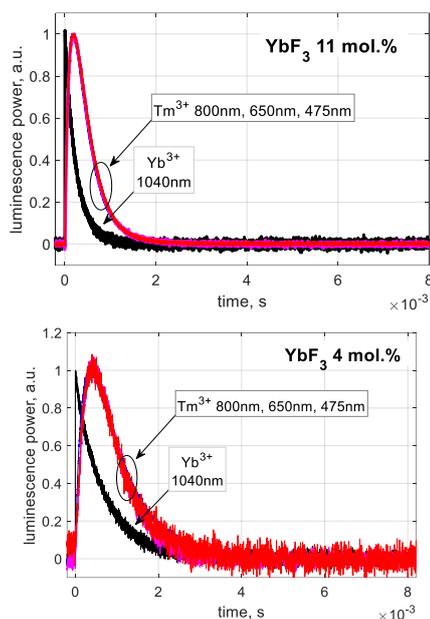


Рисунок 3 – Кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} на длинах волн: 475 нм, 650 нм и 800 нм в сравнении с кинетиками затухания люминесценции ионов Yb^{3+} на 1040 нм

Обращает на себя внимание тот факт, что кинетики люминесценции ионов Tm^{3+} на длинах волн 475 нм, 650 нм и 800 нм практически совпадают друг с другом по форме.

Как обсуждалось для случая стационарного возбуждения ап-конверсионной люминесценции, переходы, обуславливающие люминесценцию на 475 нм и 650 нм имеют один и тот же начальный уровень – $^1\text{G}_4$, а в люминесценцию на 800 нм вносят вклад переходы с начальными уровнями $^1\text{G}_4$ и $^3\text{H}_4$. Одинаковая форма кинетик при возбуждении люминесценции коротким импульсом может свидетельствовать о том, что в данном случае вклад перехода $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ в люминесценцию на 800 нм незначителен и режим заселения уровня $^1\text{G}_4$ связан в основном с СЕТ, см. рисунок 2, *b*.

Литература

1. Kolobkova, E. Upconversion luminescence and energy transfer in the fluorophosphate glasses with low phosphate content doped with Tm^{3+} and Yb^{3+} ions / E. Kolobkova, A. Grabtchikov, I. Khodasevich // J. of Non-Crystalline Solids: X. – 2021. – V. 11, № 12. – P. 100065.
2. Auzel, F. History of upconversion discovery and its evolution / F. Auzel // J. Luminescence. – 2020. – V. 223. – P. 116900.
3. Ovsyankin, V. V. Cooperative sensitization of luminescence in crystal activated with rare earth ions / V. V Ovsyankin, P.P. Feofilov // JETPh. Lett. – 1966. – V. 4. – P. 317–318.