

описывающих населенности на энергетических уровнях иона тулия

$$\frac{dn_4}{dt} = -W_{CR}n_1n_4 + \frac{n_4}{\tau_4} + W_{UP}n_2^2 \quad (4)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = 2W_{CR}n_1n_2 - \frac{n_2}{\tau_2} - 2W_{UP}n_2^2, \quad (5)$$

где  $n_j = N_j/N_{Tm}$ , а  $\tau_4$  и  $\tau_2$  – характерные времена жизни ионов тулия на уровнях  $^3H_4$  и  $^3F_4$ , соответственно,  $W_{UP}$  – вероятность ап-конверсионного переноса энергии  $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ .

Представляет интерес сопоставить величины  $W_{CR}$ , определяемые по этим двум методикам.

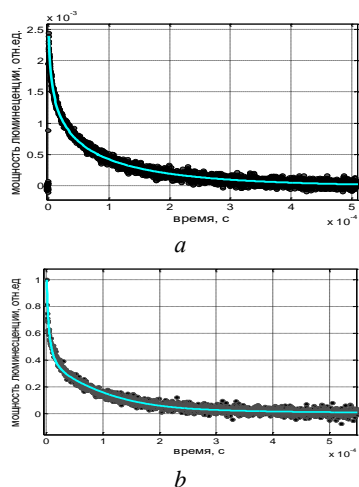


Рисунок 2 – Аппроксимация кинетики затухания люминесценции переходе  $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$ : точки – экспериментальные кривые, сплошная линия – аппроксимация при помощи (1) – а и при помощи (4, 5) – б

Для кинетических исследований были выбраны образцы А, В и С где  $Y = 0.5$  и 1. На рис. 2, в качестве примера, представлены результаты аппроксимации кинетик затухания люминесценции на переходе  $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$  для образца А ( $Y = 0.5$ ). Как видно из рисунков, оба метода дают вполне удовлетворительное описание экспериментальной кривой.

УДК 535.37

### ДОНОР-АКЦЕПТОРНЫЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКЛАХ С ИОНАМИ ТУЛИЯ

Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Демеш М.П.<sup>1</sup>, Гусакова Н.В.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Рачковская Г.Е.<sup>2</sup>, Захаревич Г.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический институт,

Минск, Республика Беларусь

Интерес к оксифторидным стеклам, активированными ионами редкоземельных элементов (РЗЭ) связан с низкой температурой их синтеза ( $\approx 900$  С°), что позволяет существенно упростить

Характерное время жизни  $\tau_2$  ионов тулия на уровне  $^3F_4$  (см. (5)) определялось из кинетик затухания люминесценции в области 1800 нм (переход  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ ), которые хорошо аппроксимируются одноэкспоненциальной кривой. Значения  $\tau_2$  даны в табл. 1.

Таблица 1 – Время жизни  $\tau_2$  ионов тулия на уровне  $^3F_4$

	А, $\tau_2$ , мс	В, $\tau_2$ , мс	С, $\tau_2$ , мс
Y=0.5	1.52	1.74	1.1
Y=1	0.58	0.71	0.44

При аппроксимации кинетик затухания по обоим методам наблюдалась слабая зависимость параметров  $W_{CR}$  от  $\tau_4$  и  $\tau_2$ . Значения параметра  $W_{UP}$  были меньше  $W_{CR}$  на 2-3 порядка, т. е. в данном случае ап-конверсионные процессы не оказывают существенного влияния на заселенности уровней иона тулия. В табл. 2 и 3 представлены значения параметра  $W_{CR}$ , определенные по (2) и (4, 5).

Таблица 2 – Вероятности кросс-релаксации для образцов с Y=0.5, определенные при помощи (2) и (4, 5)

	А, $W_{CR}, c^{-1}$	В, $W_{CR}, c^{-1}$	С, $W_{CR}, c^{-1}$
(3)	$2.2 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^4$	$4.8 \cdot 10^4$
(4, 5)	$4.3 \cdot 10^5$	$4.7e \cdot 10^5$	$6.5 \cdot 10^5$

Таблица 3 – Вероятности кросс-релаксации для образцов с Y=1, определенные при помощи (2) и (4, 5)

	А, $W_{CR}, c^{-1}$	В, $W_{CR}, c^{-1}$	С, $W_{CR}, c^{-1}$
(3)	$4.4 \cdot 10^5$	$3.7 \cdot 10^5$	$5.7 \cdot 10^5$
(4, 5)	$1.0 \cdot 10^6$	$4.7e \cdot 10^5$	$9.6 \cdot 10^5$

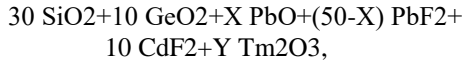
Как видно из представленных результатов, значения  $W_{CR}$  полученные двумя методами существенно отличаются друг от друга. По-видимому, это связано с различием физических допущений, которые применяются в обоих подходах. Этот вопрос требует более детального рассмотрения и будет изучен нами в дальнейшем.

#### Литература

- G. Armagan, A.M. Buoncristiani “Excited state dynamics of thulium ions in Yttrium Garnets”, Optical Material V.1, pp. 11–20, (1992).
- M. Inokuti, F. Hirayama “Influence of Energy Transfer by the Exchange Mechanism on Donor Luminescence”, J. Chem. Phys. 43, pp. 1978–1989, (1965).

ные ионами тулия, обладают широкими бесструктурными полосами, как в спектрах поглощения, так и люминесценции [1], что делает их привлекательными для создания на их основе лазерных источников света в области спектра  $\approx 1800-1900$  нм (переход  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  иона  $Tm^{3+}$ ) с перестраиваемой частотой излучения или с синхронизацией мод.

В данной работе исследуются оксифторидные стекла состава



здесь  $X=5$  (образцы А),  $25$  (образцы В),  $45$  (образцы С). Для каждого из образцов А, В и С величина  $Y=0.01, 0.1, 0.5$  и  $1$ . Методика синтеза стекла описана в [1].

Обычно накачка тулиевых лазеров осуществляется в области  $800$  нм (переход  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ ) с последующим переносом энергии на верхний лазерный уровень  ${}^3F_4$ . В материалах с низким содержанием ионов тулия преобладающим являются внутрицентровые процессы: излучательный и безызлучательный перенос энергии в результате перехода  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$  (см. Рис.1). При увеличении концентрации тулия преобладающим становится кросс-релаксационный перенос энергии по схеме  ${}^3H_6 + {}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4 + {}^3F_4$  (см. Рис.1).

Это является частным случаем переноса энергии возбуждения с донора (D) – ион тулия на уровне  ${}^3H_4$ , на акцептор (A) – ион тулия на уровне  ${}^3H_6$ . В связи с этим существенно важным является вопрос об эффективности такого переноса энергии, его зависимости от концентрации ионов тулия и от состава стеклянной матрицы.

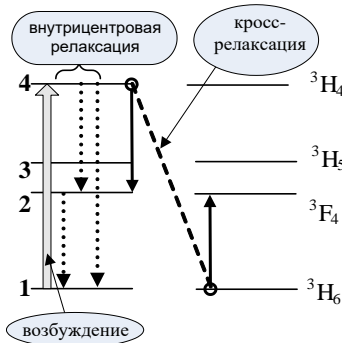


Рисунок 1 – Нижние уровни иона  $Tm^{3+}$  и основные каналы релаксации возбужденного уровня  ${}^3H_4$

Населенности на энергетических уровнях иона тулия в стационарных условиях определяются системой скоростных уравнений:

$$\begin{aligned} 0 &= (A_{42} + A_{41})N_4 - PN_4N_1 + R \\ 0 &= 2PN_4N_1 - A_{21}N_2 + A_{42}N_4. \end{aligned}$$

Здесь  $A_{ij}$  – вероятность спонтанных переходов  $i \rightarrow j$  ( $[A_{ij}] = c^{-1}$ ),  $N_k$  – населенность уровня с номером  $k$ ,  $P$  – параметр, описывающий кросс-релаксацию,  $R$  – скорость возбуждения ( $[R] = m^{-3}c^{-1}$ ).

В данном случае под эффективностью переноса энергии будем понимать величину  $\gamma_{tot}$ , показывающую какая часть ионов тулия, которая попала в результате стационарного возбуждения на уровень  ${}^3H_4$  в результате переноса энергии (внутрицентрового или кросс-релаксационного) попадает на уровень  ${}^3F_4$ :

$$\gamma_{tot} = \frac{N_2 A_{21}}{R}.$$

Эта эффективность может быть выражена через величины, определяемые из спектров люминесценции:

$$\gamma_{tot} = \frac{\int \lambda P_{21}(\lambda) d\lambda}{\left(\frac{1}{\beta_{42}} - 0.5\right) \int \lambda P_{42}(\lambda) d\lambda + 0.5 \int \lambda P_{21}(\lambda) d\lambda}$$

Здесь  $P_{21}(\lambda)$ ,  $P_{42}(\lambda)$  – спектральные плотности мощности люминесценции на переходах  $2 \rightarrow 1$  и  $4 \rightarrow 2$  и  $\beta_{42}$  – коэффициент ветвления люминесценции на переходе  $4 \rightarrow 2$ .

Эффективность передачи энергии, связанная только с кросс-релаксацией определим как:

$$\gamma_{CR-RELAX} = \frac{N_2 A_{21} - N_4 A_{42}}{R},$$

которая рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{CR-RELAX} = \frac{\int \lambda P_{21}(\lambda) d\lambda - \int \lambda P_{42}(\lambda) d\lambda}{\left(\frac{1}{\beta_{42}} - 0.5\right) \int \lambda P_{42}(\lambda) d\lambda + 0.5 \int \lambda P_{21}(\lambda) d\lambda}.$$

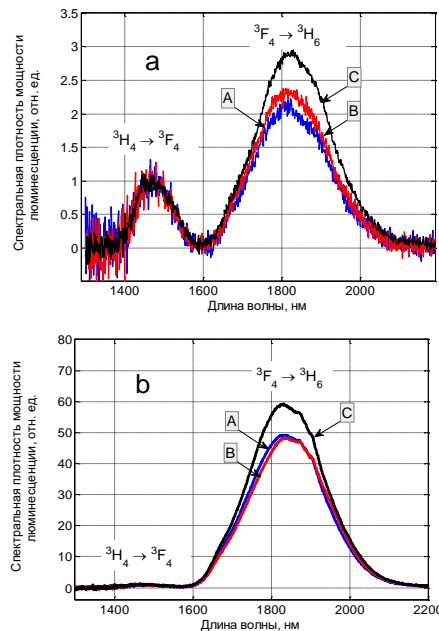


Рисунок 2 – Спектры люминесценции образцов стекол А, В, С с содержанием  $Tm_2O_3$  0.01 мол % – а и  $Tm_2O_3$  1 мол % – б

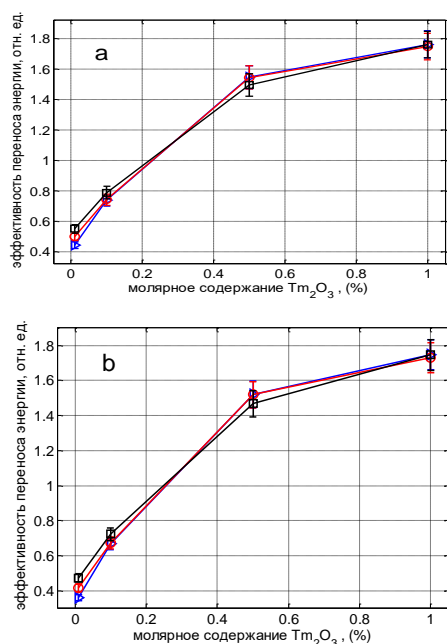


Рисунок 3 – Полная эффективность переноса энергии (а) и эффективность переноса за счет кросс-релаксации (b):  
 Δ – образцы А; ○ – образцы В; □ – образцы С

Спектральные плотности мощности были определены из спектров люминесценции, зарегистрированных при стационарном возбуждении.

УДК 621.375.826

### СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА ГАДОЛИНИЙ-ИТТРИЕВОГО СИЛИКАТА Er,Yb:GdYSiO<sub>5</sub> Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Гоман В.И.<sup>2</sup>, Павловский Л.К.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>НП ООО «СОЛИКС»

Минск, Республика Беларусь

Лазерное излучение с длиной волны 1.5–1.6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии благодаря целому ряду причин. Основным преимуществом указанного излучения является условная безопасность для органов зрения людей вследствие того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее роговицей и хрусталиком. Кроме того, из-за высокого поглощения излучения водой при микрохирургических вмешательствах на поверхности прозрачных тканей глаза излучением данной длины волны уменьшаются глубина термического некроза и порог абляции. К тому же, благодаря прозрачности атмосферы, а также высокому пропусканию излучения с длиной волны 1.5–1.6 мкм

На Рис.2 представлены спектры для некоторых образцов стекла.

Регистрация спектров люминесценции проводилась методом синхронного детектирования. В качестве источника накачки использовался лазерный диод, генерирующий излучение на длине волны 802 нм. Оптическая и регистрирующая части установки: монохроматор МДР 23, фотоприемник на основе PbS фотосопротивления и синхронный усилитель SR830. Спектры люминесценции были скорректированы на спектральную чувствительность установки.

На Рис. 3 представлены результаты расчетов эффективности переноса энергии для образцов стекол (А, В и С) с различным содержанием ионов тулия

Как видно из Рис. 3, при увеличении содержания ионов тулия в образцах, эффективность переноса энергии практически полностью определяется кросс-релаксацией и не зависит от содержания PbO и PbF<sub>2</sub> в исходном составе, из которого синтезировалось стекло.

#### Литература

1. Вилейшикова, Е.В. Спектрально-люминесцентные свойства оксифторидных стекол, соактивированных ионами (Yb<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup>) и (Yb<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>) / Е.В. Вилейшикова, П.А. Лойко, Г.Е. Рачковская, Г.Б. Захаревич, К.В. Юмашев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т 83, №4. – С. 531–538.

в условиях тумана, дыма и пара, лазерные источники указанного диапазона используются в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1.5–1.6 мкм: волоконные лазеры, полупроводниковые лазеры, параметрические генераторы света и лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Однако благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. Основными требованиями, которые предъявляются к эрбий-иттербиевым материалам для получения эффективной лазерной генерации в области 1.5 мкм, являются: