

6. S. Chenais, F. Druon, S. Forget, F. Balembois, and P. Georges, "On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials," Prog. Quantum Electron. 30(4), 89–153 (2006).

7. R. Akbari, K.A. Fedorova, E.U. Rafailov, and A. Major, "Diode-pumped ultrafast Yb:KGW laser with 56 fs pulses and

multi-100 kW peak power based on SESAM and Kerr-lens mode locking," Appl. Phys. B 123(4), 123 (2017).

8. C. Cihan, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked femtosecond Alexandrite laser," Opt. Lett. 43(16), 3969–3972 (2018).

УДК 535.37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРОСС-РЕЛАКСАЦИИ В ОКСИФТОРИДНЫХ ТУЛИЕВЫХ СТЕКЛАХ

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

¹НИИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

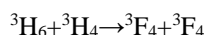
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический институт,

Минск, Республика Беларусь

Тулиевые материалы – кристаллы и стекла, активированные ионами трехвалентного тулия (Tm^{3+}) – широко используются как активные среды для создания лазерных источников света в практически важной области спектра 1.8–2 мкм.

Накачка таких лазеров часто осуществляется по следующей схеме: возбуждение ионов тулия на уровень 3H_4 излучением диодных лазеров на длине волны ≈ 800 нм; перенос энергии возбуждения на верхний лазерный уровень 3F_4 . Эффективным механизмом такой передачи энергии является кросс релаксация по схеме:



при этом квантовая эффективность накачки приближается к 2.

Схема нижних уровней Tm^{3+} с указанием основных переходов представлена на рис. 1

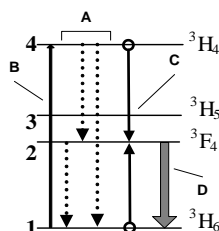
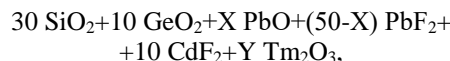


Рисунок 1. – Нижние уровни иона Tm^{3+} и основные переходы:

A – внутрицентровая релаксация; B – возбуждение, C – кросс-релаксация; D – генерация

Исследование кинетики затухания люминесценции с уровня 3H_4 (например, переход $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$) позволяет установить доминирующий характер Д-А взаимодействия и определить концентрационную зависимость параметров, определяющих эффективность переноса энергии в тулиевых средах за счет кросс-релаксационного механизма. Здесь, донор (Д) – ион тулия на уровне 3H_4 , акцептор (А) – ион тулия на уровне 3H_6 .

В качестве объекта исследования в данной работе выбраны образцы оксифторидных стекол с ионами тулия следующего 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.

Следуя методике, использованной в [1], было установлено, что для ионов тулия в стеклах, изучаемых в данной работе, доминирующим является квадруполь-квадрупольное Д-А взаимодействие, и было оценено время внутрицентровой релаксации τ_4 уровня 3H_4 , которое составляет ≈ 300 мкс.

Значение τ_4 было использовано при аппроксимации кривых затухания люминесценции на переходе $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$ формулой, предложенной в [2]:

$$I(t) = I(t=0) \exp(-t/\tau_4 - \gamma_s t^{3/5}). \quad (1)$$

Коэффициент γ_s отвечает за статический неупорядоченный перенос энергии от Д к А, $S=10$ (квадруполь-квадрупольный механизм переноса энергии). γ_s напрямую связан с микропараметром C_{DA} , который определяет вероятность прямой передачи энергии при парном взаимодействии Д и А.

$$C_{DA} = \frac{\gamma_s^{5/3}}{\left[\frac{4}{3} \pi N_{tm} \Gamma \left(1 - \frac{3}{S} \right) \right]^{5/3}}, \quad (2)$$

где Γ – гамма-функция. В литературе параметр C_{DA} часто используют, для оценки вероятности переноса энергии в коллективе доноров и акцепторов. Можно показать, что для такого случая вероятность дезактивации уровня 3H_4 за счет кросс-релаксации W_{CR} можно оценить по формуле:

$$W_{CR} = C_{DA} \left(\frac{4\pi}{3} \right)^{5/3} N_{tm}^{5/3} \quad (3)$$

и при $S=10$

$$W_{CR} = 0.419 \gamma^{10/3} \quad (4)$$

Величину W_{CR} также можно найти непосредственно из системы скоростных уравнений,

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 τ_4 и τ_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.

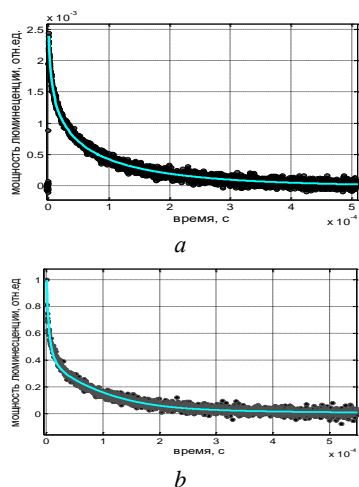


Рисунок 2 – Аппроксимация кинетики затухания люминесценции переходе $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$: точки – экспериментальные кривые, сплошная линия – аппроксимация при помощи (1) – а и при помощи (4, 5) – б

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.¹, Демеш М.П.¹, Гусакова Н.В.¹, Кулешов Н.В.¹, Рачковская Г.Е.², Захаревич Г.Б.²

¹НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ

Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический институт,

Минск, Республика Беларусь

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

Характерное время жизни τ_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 τ_2 даны в табл. 1.

Таблица 1 – Время жизни τ_2 ионов тулия на уровне 3F_4

	А, τ_2 , мс	В, τ_2 , мс	С, τ_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 τ_4 и τ_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).

технологический процесс их получения по сравнению, например, с алюмосиликатными стеклами, где синтез производится при температурах ≈ 1500 С°. Оксифторидные стекла, активирован-