

Влияние концентрации фосфатов на спектральные свойства ионов тулия во фторфосфатных стеклах

© Е.В. Колобкова^{1,2}, А. Алхлеф¹, А.С. Ясюкевич³

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия

³ Центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет,
220013 Минск, Беларусь

e-mail: kolobok106@rambler.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

В окончательной редакции 15.07.2020 г.

Принята к публикации 28.07.2020 г.

Рассчитаны параметры Джадда-Оффельта для ионов тулия во фторфосфатных стеклах при изменении содержания фосфатной компоненты матрицы. Показана близость значений параметров Ω_i стекол с содержанием до 10 mol.% $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ к аналогичным параметрам фторидных стекол и резкое увеличение их значений при увеличении фосфатов. В рамках теории Джадда-Оффельта проведен анализ спектрально-люминесцентных параметров стекол. Получены вероятности спонтанного перехода, коэффициенты ветвления (β) и радиационные времена жизни (τ_{rad}) для различных возбужденных состояний Tm^{3+} . Обнаружено, что при малых концентрациях фосфатов для стекол характерно высокое радиационное время жизни возбужденного лазерного уровня 3F_4 . Показано, что для исследованных стекол характерен широкий плоский спектр коэффициента усиления, что делает их перспективными материалами для создания широкополосных усилителей.

Ключевые слова: ионы Tm^{3+} , параметры Джадда-Оффельта, поглощение, усиление, сечение вынужденного излучения.

DOI: 10.21883/OS.2020.12.50329.176-20

Введение

Интерес к спектральному диапазону $1.8\text{--}2\ \mu\text{m}$ связан с необходимостью создания мощных источников света для лазерных локаторов ИК диапазона (ЛИДАР), лазеров для медицинских и военных приложений [1–3]. В качестве активных сред для работы в этом диапазоне могут быть использованы кристаллы и стекла, активированные ионами гольмия или тулия. В связи с этим появилось большое число работ, посвященных стеклам различных составов, активированных ионами Tm^{3+} , для создания волоконных лазеров, работающих на длине волны $2000\ \text{nm}$ [4–8]. Большим преимуществом иона тулия является возможность накачки диодным лазером с $\lambda = 800\ \text{nm}$ [4].

При выборе матрицы стекла для активации ионами тулия с целью получения на их основе активных элементов необходимо учитывать спектральный диапазон пропускания, характерный для разного вида стекол. С точки зрения этой характеристики для активации ионами тулия перспективны прежде всего теллуридные, германатные и фторидные стекла, чье пропускание сдвинуто в длинноволновую область спектра [5–7]. Однако у каждой из перечисленных матриц есть определенные недостатки. Теллуридные стекла характеризуются низкими физико-химическими параметрами, а германатные стекла имеют

высокую стоимость. Традиционными лазерными матрицами являются силикатные и фосфатные стекла [4,5,8], которые ранее хорошо зарекомендовали себя как лазерные среды для других активаторов. Однако в оксидных стеклах всегда присутствует определенная концентрация ОН-групп, которые являются основной тушащей примесью редкоземельных ионов. Помимо присутствия ОН-групп, сетка традиционных лазерных фосфатных и силикатных стекол характеризуется высокими энергиями фононов, что увеличивает вероятность многофононной релаксации и уменьшает квантовый выход флуоресценции. Фторидные стекла лишены этих недостатков. Для них характерны низкие энергии фононов, что приводит к расширению пропускания в ИК области до $7.0\ \mu\text{m}$ [9]. Однако фторидные стекла различных составов имеют высокую склонность к кристаллизации.

Известно, что введение во фтороалюминатное стекло небольших добавок фосфатов стабилизирует сетку стекла и позволяет получать стекла оптического качества в широком диапазоне концентраций активатора [10]. Ранее нами были рассмотрены особенности спектрально-люминесцентных характеристик фторофосфатных стекол, активированных ионами неодима и парой $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [11–14]. Оказалось, что фторофосфатные стекла с малыми добавками фосфатов имеют спектрально-люминесцентные параметры, близкие к параметрам

фторидных стекол, и физико-химические свойства, которые сопоставимы со свойствами оксидных стекол. Анализ влияния увеличения фосфатной компоненты на спектрально-люминесцентные характеристики ионов неодима и эрбия показал слабое влияние фосфатов в диапазоне 2–10 mol.% Ba(PO₃)₂ и радикальное изменение спектрально-люминесцентных параметров при повышении их содержания. Преимущества фторидной и фторофосфатной матриц, активированных редкоземельными ионами для создания активных сред, были детально рассмотрены в [15,16].

В предлагаемой работе на основании теории Джадда–Офельта проведен анализ спектрально-люминесцентных характеристик фторофосфатных стекол, активированных ионами тулия в зависимости от концентрации фосфатной компоненты.

Объект исследования и методика эксперимента

Были синтезированы стекла с переменным содержанием фосфатной компоненты в системе $x\text{Ba}(\text{PO}_3)_2 - (99 - x)(\text{AlF}_3 - \text{CaF}_2 - \text{MgF}_2 - \text{BaF}_2 - \text{SrF}_2) - 1\text{TmF}_3$ (где $x = 2; 5; 10; 20; 30 \text{ mol.}\%$). Выбранная концентрация TmF₃ является оптимальной для анализа влияния состава матрицы на люминесцентные свойства. При этой концентрации во фторофосфатных стеклах уже наблюдаются ион-ионные взаимодействия, в частности кросс-релаксация, которая является эффективным механизмом увеличения заселенности верхнего лазерного уровня [17,18].

Синтез проводился в закрытых стеклоуглеродных тиглях в атмосфере аргона при температуре 1050°C в течение 30 min. Навеска составляла 50 g. Гомогенный расплав вырабатывался на гладкую стеклоуглеродную пластину и отжигался при температуре 440°C вблизи температуры стеклования. Температуры стеклования (T_g) были определены на основании анализа кривых ДСК, полученных на дифференциальном сканирующем калориметре (STA 449F1 Jupiter Netzsch), сканирование проводилось со скоростью 10 K/min. T_g составляли 436–450°C в зависимости от состава стекла. Спектры

Таблица 1. Физические свойства фторофосфатных стекол, активированных ионами тулия с различным содержанием фосфатов

Образец	TmF ₃ , mol.%	Ba(PO ₃) ₂ , mol.%	ρ , g/cm ³	N_{Tm} , 10 ²⁰ cm ⁻³	n_D
P2	1	2	3.935	2.29	1.434
P5	1	5	3.937	2.16	1.450
P10	1	10	3.939	1.99	1.463
P20	1	20	3.943	1.71	1.504
P30	1	30	3.955	1.50	1.500

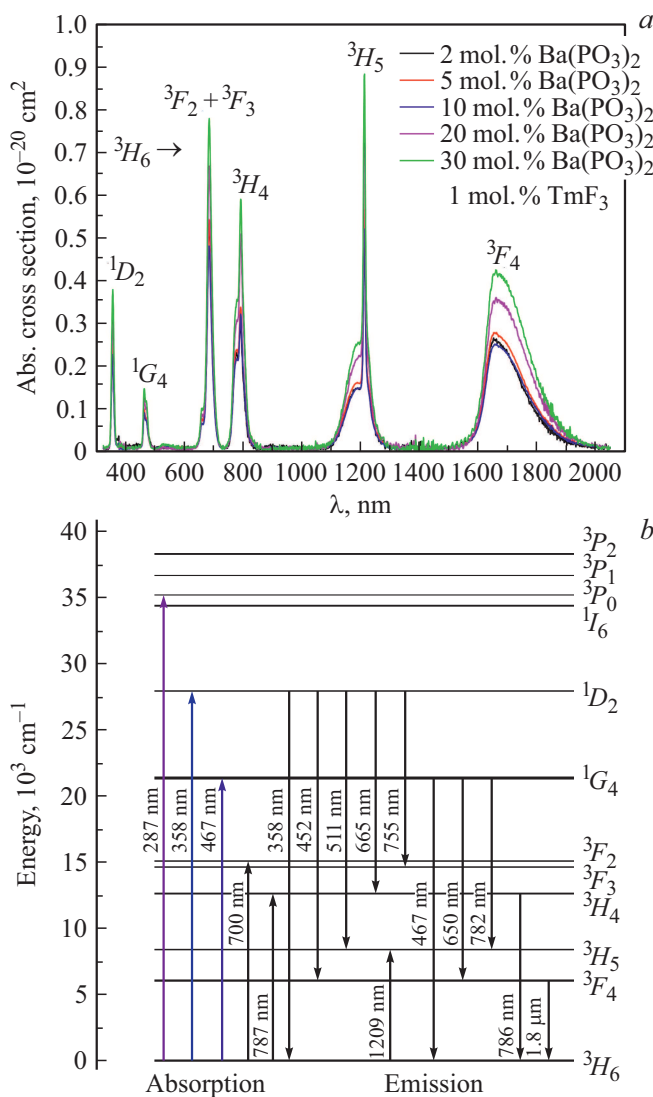


Рис. 1. (а) Сечение поглощения для стекол, активированных ионами Tm³⁺, при различных концентрациях фосфата. (б) Диаграмма энергетических состояний и основных переходов иона тулия.

поглощения полированных плоскопараллельных образцов регистрировались с помощью спектрофотометров Lambda 650 и Lambda 900 (PerkinElmer) в диапазонах длин волн 300–900 nm и 900–2050 nm соответственно. Плотность стекол определили гидростатическим взвешиванием с точностью 10⁻³ g/cm³. Показатель преломления измеряли с помощью рефрактометра Аббе IRF-454 BM, работающего на линиях спектра F, D, C.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Спектры поглощения и параметры Джадда–Офельта. Молярная концентрация Ba(PO₃)₂, плотность (ρ), показатель преломления (n) и концентрация

ионов Tm^{3+} (N_{Tm}) исследуемых стекол представлены в (табл. 1).

Спектры сечений поглощения стекол, активированных ионами Tm^{3+} , представлены на рис. 1, а. Анализ сечений поглощения показал их практическую неизменность в диапазоне 2–10 mol.% $Ba(PO_3)_2$ и заметный рост при дальнейшем увеличении содержания фосфатов. Диаграмма энергетических уровней иона тулия показана на рис. 1, б. Все наблюдаемые переходы и соответствующие им полосы поглощения являются переходами из основного состояния 3H_6 на возбужденные уровни.

Параметры Джадда–Офельта (Д-О) рассчитываются путем минимизирования среднеквадратического отклонения (СКО) между измеренными и расчетными силами линий дипольного электрического перехода. Расчетная сила линии рассчитывается по формуле:

$$S_{ed}^{calc}(J \rightarrow J') = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t |\langle \Psi_J || U^t || \Psi_{J'} \rangle|^2, \quad (1)$$

где коэффициенты Ω_t — это параметры Джадда–Офельта, $|U_t|^2$ — квадраты приведенных матричных элементов, рассчитанные в [19].

Измеренная сила линии рассчитывается по формуле

$$S_{ed}^{meas}(J \rightarrow J') = \frac{27hc(2J+1)n}{8\pi^3\lambda^2e^2(n^2+2)^2} \int \sigma_{abs}(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, e — заряд электрона, n — показатель преломления, λ — средняя длина волны полосы (nm), J и J' — значение полного момента начального и конечного состояний.

Точность подгонки Д-О параметров может быть выражена через СКО (Δrms) с помощью уравнения (3)

$$\Delta rms = \left[\frac{\sum (S_{ed}^{meas} - S_{ed}^{calc})^2}{p - q} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где p — число полос поглощения, входящих в расчеты Д-О, а q — число параметров интенсивности. В этой работе $p = 6$, $q = 3$.

Погрешность подгонки выражается в виде отношения СКО к среднему значению по всем используемым измеренным силам линий. Погрешность расчета параметров указывается в процентах [20].

Измеренные силы линий и параметры интенсивности Ω_t ($t = 2, 4, 6$) для стекол с переменным содержанием фосфатов приведены в табл. 2, расчетные силы линий, СКО и погрешность подгонки приведены в табл. 3. На рис. 2 показана зависимость параметров Д-О при изменении содержания фосфатов в стекле.

Изменения значений параметров Д-О имеют жесткую корреляцию с вариацией ближайшего окружения РЗ ионов [21,22]. На величину Ω_2 влияет симметрия поля лигандов и степень ионности/ковалентности связи активатор-лиганд. Ионы кислорода обладают более высокой поляризуемостью, чем ионы фтора. Известно,

Таблица 2. Измеренная сила линии (S_{ed}^{calc}) (10^{-20} cm^2) для переходов из основного состояния 3H_6 в конечные состояния и параметры Д-О

$Ba(PO_3)_2$, mol.%	2	5	10	20	30
3F_4	2.4434	2.7115	2.4339	3.5613	4.1716
3H_4	1.2888	1.4203	1.3224	1.9961	2.2739
$^3F_2+^3F_3$	1.8041	1.8108	1.5681	2.1319	2.4698
1G_4	0.3213	0.3035	0.2823	0.3903	0.4481
1D_2	0.7572	0.7127	0.6313	0.8671	1.0051
Ω_2 (10^{-20} cm^2)	1.55	2.14	2.10	3.48	4.00
Ω_4 (10^{-20} cm^2)	1.89	1.80	1.50	1.93	2.32
Ω_6 (10^{-20} cm^2)	1.12	1.15	1.02	1.44	1.63
Ω_4/Ω_6	1.69	1.57	1.47	1.34	1.42

Таблица 3. Расчетная сила линии S_{ed}^{calc} (10^{-20} cm^2), СКО (10^{-20} cm^2) и погрешность расчета

$Ba(PO_3)_2$, mol.%	2	5	10	20	30
3F_4	2.473	2.731	2.462	3.6131	4.2222
3H_4	1.239	1.386	1.269	1.8909	2.1716
$^3F_2+^3F_3$	1.8299	1.828	1.596	2.1889	2.5252
1G_4	0.2303	0.252	0.226	0.3303	0.3870
1D_2	0.7012	0.673	0.568	0.7413	0.8829
СКО	0.088	0.055	0.076	0.136	0.13
Погрешность, %	6.6	3.9	6.0	7.5	6.3

что при замещении ионов фтора на ионы кислорода ковалентность связи между Tm^{3+} и анионами из первой координационной сферы увеличивается, а Ω_2 возрастает [21]. Вторым фактором, влияющим на величину Ω_2 , является симметрия поля лигандов, уменьшение которой также приводит к увеличению Ω_2 . Однако фосфатные группы играют особую роль в изменении доли ковалентности связи РЗ ионов с лигандами. Было обнаружено, что увеличение содержания фосфатов имеет два противоположных воздействия на $\Omega_{2,6}$ в отличие от других оксидных систем. Появление фосфатных групп в стекле приводит к увеличению электронной плотности от $2p$ -орбиталей ионов кислорода, а также донорству π -электронов от Р–О p -связи. Первый эффект приводит к увеличению Ω_2 , но уменьшению Ω_6 . Напротив, большее донорство π -электронов от фосфатных групп увеличивает Ω_6 .

Сопоставление этих закономерностей с нашими результатами, представленными на рис. 3, показывает, что

Таблица 4. Параметры Ω_i (10^{-20} cm^2) для Tm^{3+} в различных стеклах

Стекло	Ω_2	Ω_4	Ω_6
Силикатное [4]	3.08	0.99	0.40
Фторидное (ZBLAN) [5]	1.92	1.68	1.13
Фторофосфатное [5]	2.75	2.28	1.18
Теллуридное [6]	4.48	1.87	1.03
Германатное [7]	7.32	1.88	2.86
Фосфатное [8]	5.63	1.75	1.11
Фторофосфатное P5 (данная работа)	2.14	1.80	1.15
Фторофосфатное P30 (данная работа)	4.00	2.32	1.63

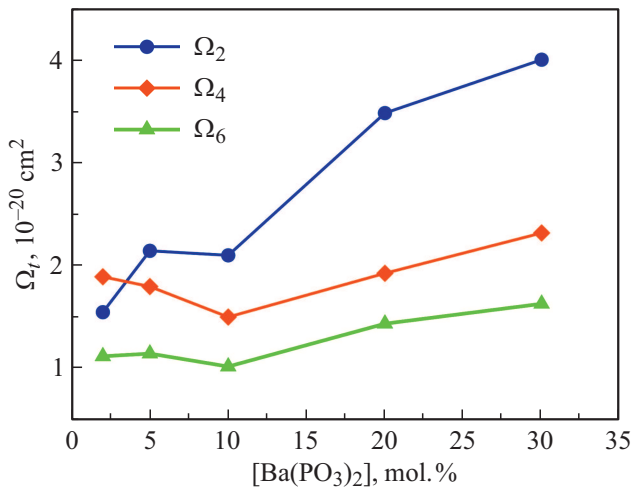


Рис. 2. Зависимость параметров Д-О от содержания фосфатов в стекле.

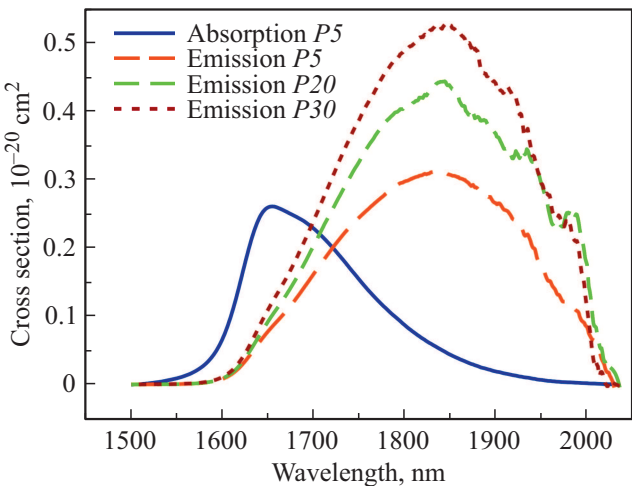


Рис. 3. Сечения поглощения стекла P5 (a) и вынужденного излучения стекол P5, P20, P30.

второй эффект превалирует и происходит увеличение параметра Ω_6 при увеличении содержания $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$. В табл. 4 параметры Д-О для фторофосфатных стекол с малым (P5) и большим (P30) содержанием фосфатов

сопоставлены с параметрами других стекол, легированных ионами Tm^{3+} . Видно, что при малом содержании фосфата параметры Ω_2 и Ω_6 для изучаемых стекол близки к параметрам фторидных стекол, легированных Tm^{3+} , и заметно изменяются при увеличении содержания фосфатной составляющей.

Люминесцентные свойства. Вероятность радиационного перехода между двумя состояниями (с J на J'), $A(J \rightarrow J')$, можно получить, используя расчетную силу линии, из соотношения (4)

$$A(J \rightarrow J') = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \left[n \left(\frac{n^2+2}{3} \right)^2 S_{\text{ed}}^{\text{calc}} \right]. \quad (4)$$

Радиационное время жизни (τ_{rad}) для верхнего метастабильного состояния можно рассчитать по формуле

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{1}{\sum A(J \rightarrow J')}. \quad (5)$$

С другой стороны, коэффициенты ветвления флуоресценции (β) выражаются как отношения вероятностей радиационных переходов к сумме вероятностей всех радиационных переходов следующим образом:

$$\beta(J \rightarrow J') = \frac{A(J \rightarrow J')}{\sum A(J \rightarrow J')}. \quad (6)$$

В табл. 5 приведены расчетные прогнозируемые вероятность спонтанного перехода (A), общая вероятность спонтанного перехода ($\sum A$), радиационное время жизни (τ_{rad}) и коэффициенты ветвления (β) оптических переходов для образца стекла P5, легированного Tm^{3+} .

Расчёты показали (табл. 5), что радиационное время жизни для перехода ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ иона Tm^{3+} в стекле P5 составляет 8.54 ms, что значительно превышает аналогичный параметр, рассчитанный для ранее исследованных фторофосфатных стекол: 4.86 и 4.44 ms соответственно [23,24]. Следует отметить, что увеличение времени жизни верхнего лазерного уровня позволяет уменьшить порог генерации [24].

Сравнение параметров люминесценции для стекол с переменным содержанием фосфатов представлено в табл. 6. Показано, что при увеличении содержания фосфатов время жизни метастабильного состояния 3F_4 , уменьшается примерно от 10 до 5 ms.

Сечение вынужденного излучения было рассчитано при использовании модифицированного метода соответствия для аморфных изотропных сред (ММС) [25] по формуле

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \frac{\beta}{8\pi n^2 \tau_{\text{rad}} c} \times \frac{\exp(-hc/(\lambda kT\lambda))}{\int \lambda^{-4} \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \exp(-hc/(kT\lambda)) d\lambda} \sigma_{\text{abs}}(\lambda). \quad (7)$$

Таблица 5. Прогнозируемая вероятность спонтанного перехода (A), общая вероятность спонтанного перехода ($\sum A$), коэффициенты ветвления (β) и радиационные времена жизни (τ_{rad}) стекла $P5$ для возбужденных состояний иона Tm^{3+}

Переход	λ, nm	$S_{\text{ed}}, 10^{-20} \text{cm}^2$	$S_{\text{md}}, 10^{-20} \text{cm}^2$	$A_{\text{rad}}, \text{s}^{-1}$	$\sum A_{\text{rad}}, \text{s}^{-1}$	$\beta, \%$	$\tau_{\text{rad}}, \text{ms}$
${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$	1711	2.7310	0	117.03	117.03	100.0	8.54
${}^3H_5 \rightarrow {}^3F_4$	3942	1.4669	0	4.20	193.93	2.16	5.16
${}^3H_5 \rightarrow {}^3H_6$	1193	1.3779	0.4021	189.73		97.84	
${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$	2304	0.8968	0.2348	20.35	690.52	2.95	1.45
${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$	1454	0.7499	0	52.41		7.59	
${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	786	1.3866	0	617.76		89.46	
${}^3F_3 \rightarrow {}^3H_4$	5272	1.1162	0	2.10	1540.16	0.14	0.65
${}^3F_3 \rightarrow {}^3H_5$	1603	1.9715	0	132.14		8.58	
${}^3F_3 \rightarrow {}^3F_4$	1140	0.2002	0.1556	70.07		4.55	
${}^3F_3 \rightarrow {}^3H_6$	684	1.5323	0	1335.86		86.73	
${}^3F_2 \rightarrow {}^3F_3$	18030	0.1402	0	0.01	809.76	0.00	1.23
${}^3F_2 \rightarrow {}^3H_4$	4079	1.0188	0	5.79		0.72	
${}^3F_2 \rightarrow {}^3H_5$	1472	1.1928	0	144.61		17.86	
${}^3F_2 \rightarrow {}^3F_4$	1072	0.8013	0	252.17		31.14	
${}^3F_2 \rightarrow {}^3H_6$	659	0.2981	0	407.19		50.28	
${}^1G_4 \rightarrow {}^3F_2$	1615	0.2032	0	10.36	1178.05	0.88	0.85
${}^1G_4 \rightarrow {}^3F_3$	1482	0.5174	0	34.15		2.90	
${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1157	0.7966	0	110.69		9.40	
${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_5$	770	0.8043	0	381.29		32.37	
${}^1G_4 \rightarrow {}^3F_4$	644	0.1240	0	100.92		8.57	
${}^1G_4 \rightarrow {}^3H_6$	468	0.2524	0	540.65		45.89	
${}^1D_2 \rightarrow {}^1G_4$	1542	0.7378	0	77.79	13556.77	0.57	0.07
${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_2$	789	0.6849	0	542.98		4.01	
${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_3$	756	0.4562	0	411.48		3.04	
${}^1D_2 \rightarrow {}^3H_4$	661	0.5293	0	716.42		5.28	
${}^1D_2 \rightarrow {}^3H_5$	514	0.0235	0	68.05		0.50	
${}^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$	454	1.4001	0	5921.18		43.68	
${}^1D_2 \rightarrow {}^3H_6$	359	0.6737	0	5818.87		42.92	

Таблица 6. Характеристики перехода ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ иона Tm^{3+} для стекол с различным содержанием $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$

$\text{Ba}(\text{PO}_3)_2, \text{mol.}\%$	$S_{\text{ed}}, 10^{-20} \text{cm}^2$	$A_{\text{rad}}, \text{s}^{-1}$	$\tau_{\text{rad}}, \text{ms}$
2	2.4732	100.47	9.95
5	2.7310	117.03	8.54
10	2.4625	108.59	9.21
20	3.6131	173.44	5.77
30	4.2222	201.17	4.97

Полученные сечения излучения для перехода ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ионов тулия в стеклах, содержащих разные концентрации фосфата, представлены на рис. 3. Было показано, что увеличение содержания фосфатов в стекле увеличивает сечение вынужденного излучения.

Характеристики коэффициента усиления $G(\lambda)$ непосредственно связаны с сечениями поглощения σ_{abs} и излучения σ_{em} . $G(\lambda)$ является функцией инверсии насе-

ленности, как видно из соотношения

$$G(\lambda) = N[\gamma\sigma_{\text{em}} - (1 - \gamma)\sigma_{\text{abs}}], \tag{8}$$

где γ — нормированная населенность верхнего лазерного уровня, определяемая интенсивностью накачки.

На рис. 4, а показан коэффициент усиления для перехода ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ в стекле $P5$. Сравнение формы полосы усиления стекла $P5$ с полученным в [4] коэффициентом усиления силикатного стекла, активированного ионами тулия (рис. 4, б) показало, что фторофосфатное имеет более широкую бесструктурную полосу усиления.

Выводы

В рамках теории Джадда-Офельта проведен анализ спектрально-люминесцентных параметров фторофосфатных стекол, активированных ионами тулия, при изменении содержания фосфатов. Показаны близость значе-

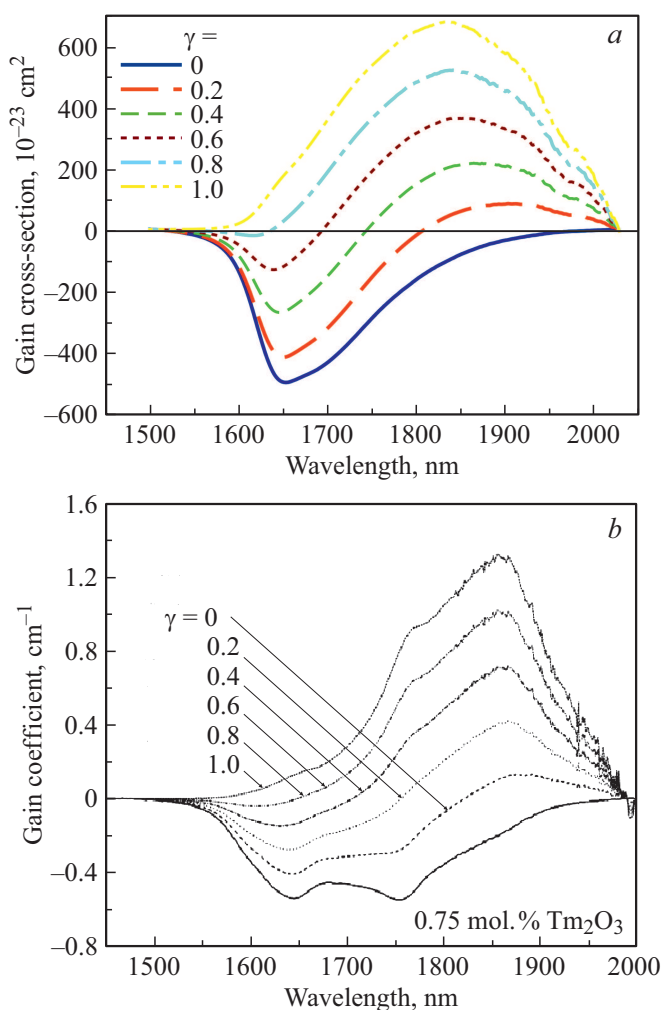


Рис. 4. Сечение усиления стекла P5 (a) и коэффициент усиления силикатного стекла, легированного Tm^{3+} (b) [4], при различных значениях γ — нормализованной заселенности верхнего лазерного уровня, определяемой интенсивностью накачки.

ний параметров Ω , стекол с содержанием до 10 mol.% $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ к аналогичным параметрам фторидных стекол и резкое увеличение их значений при дальнейшем увеличении фосфатов. Обнаружено, что при малых концентрациях фосфатов для стекол характерно высокое радиационное время жизни возбужденного лазерного уровня 3F_4 . Для исследованных стекол характерен широкий бесструктурный спектр коэффициента усиления, что делает их перспективными материалами для создания широкополосных усилителей, работающих в диапазоне 1800–2000 nm.

Финансирование работы

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФ (соглашение № 19-13-00343).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Jackson S.D., Sabella A., Hemming A., Bennetts S., Lancaster D.G. // *Opt. Lett.* 2007. V. 32. N 3. P. 241–243. doi 10.1364/OL.32.000241
- [2] Jackson S.D. // *Laser Photon. Rev.* 2009. V. 3. N 5. P. 466–482. doi 10.1002/lpor.200810058
- [3] Richards B., Tsang Y., Binks D., Lousteau J., Jha A. // *Opt. Lett.* 2008. V. 33. N 4. P. 402–404. doi 10.1364/OL.33.000402
- [4] Li M., Bai G., Guo Y., Hu L., Zhang J. // *J. Lumin.* 2012. V. 132. N 7. P. 1830–1835. doi 10.1016/J.JLUMIN.2012.02.022
- [5] Peng B., Izumitani T. // *Opt. Mater.* 1995. V. 4. P. 797–810.
- [6] Li K., Zhang Q., Bai G., Fan S., Zhang J., Hu L. // *J. Alloys Compd.* 2010. V. 504. N 2. P. 573–578. doi 10.1016/J.JALLCOM.2010.05.162
- [7] Xu R.R., Tian Y., Wang M., Hu L.L., Zhang J.J. // *Appl. Phys. B.* 2011. V. 102. N 1. P. 109–116. doi 10.1007/s00340-010-4115-6
- [8] Kermaoui A., Pellé F. // *J. Alloys Compd.* 2009. V. 469. N 1–2. P. 601–608. doi 10.1016/J.JALLCOM.2008.02.024
- [9] Nazabal V., Poulain M., Olivier M., Pirasteh P., Camy P., Doualan J.-L., Guy S., Djouama T., Boutarfaia A., Adam J.L. // *J. Fluor. Chem.* 2012. V. 134. P. 18–23. doi 10.1016/j.jfluchem.2011.06.035
- [10] Ehrst D. // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2003. V. 7. N 2. P. 135–141. doi 10.1016/S1359-0286(03)00049-4
- [11] Kolobkova E., Alkhlef A., Dinh B.M., Yasukevich A.S., Dernovich O.P., Kuleshov N.V., Nikonorov N. // *J. Lumin.* 2019. V. 206. P. 523–529. doi 10.1016/j.jlumin.2018.10.082
- [12] Kolobkova E., Alkhlef A., Nikonorov N. // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11357, *Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications II*, 113571V (1 April 2020). doi 10.1117/12.2555856
- [13] Kolobkova E., Alkhlef A., Mironov L.Yu., Bogdanov O. // *Ceramics International.* 2020. doi 10.1016/j.ceramint.2020.04.221
- [14] Kolobkova E., Alkhlef A., Yasukevich A., Babkina A. // *Opt. Mat. Express.* 2019. V. 9. P. 3666–3679. doi 10.1364/OME.9.003666D
- [15] Binmians K., Van Deun R., Görrler-Walrand C., Adam J.L. // *J. Non-Cryst. Solids.* 1998. V. 238. N 1. P. 11–29. doi 10.1016/S0022-3093(98)00540-7
- [16] Zhang G., Poulain M.J. // *J. Alloys Compd.* 1998. P. 275–277. P. 15–20. doi 10.1016/S0925-8388(98)00265-5
- [17] Kolobkova E., Kuleshov N.V., Nikonorov N., Yasukevich A.S., Babkina A. // *J. Non-Cryst. Solids.* 2019. V. 526. P. 119703. doi 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119703
- [18] Walsh B.M., Barnes N.P., Reichle D.J., Jiang S. // *J. Non-Cryst. Solids.* 2006. V. 352. P. 5344–5352. doi 10.1016/j.jnoncrysol.2006.08.029
- [19] Carnall W.T., Fields P.R., Rajnak K. // *J. Chem. Phys.* 1968. V. 49. N 10. P. 4424–4442. doi 10.1063/1.1669893
- [20] Wachtler M., Speghini A., Gatterer K., Fritzer H.P., Ajò D., Bettinelli M. // *J. Am. Ceram. Soc.* 1998. V. 81. N 8. P. 2045–2052. doi 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02586.x

- [21] *Ebendorff-Heidepriem H., Ehrt D., Bettinelli M., Spighini A.* // *J. Non. Cryst. Solids.* 1998. V. 240. N 1–3. P. 66–78. doi 10.1016/S0022-3093(98)00706-6
- [22] *Liao M.S., Fang Y.Z., Sun H.T., Hu L.L.* // *Opt. Mater.* 2007. V. 29. N 7. P. 867–872. doi 10.1016/J.OPTMAT.2006.01.012
- [23] *Tian Y., Xu R., Zhang L., Hu L., Zhang J.* // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 108. N 8. P. 83504. doi 10.1063/1.3499283
- [24] *Zhang Q., Chen G., Zhang G., Qiu J., Chen D.* // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106. N 11. P. 113102. doi 10.1063/1.3264882
- [25] *Yasyukevich A.S., Shcherbitskii V.G., Kisel' V.É., Mandrik A.V., Kuleshov N.V.* // *J. Appl. Spectrosc.* 2004. V. 71. N 2. P. 202–208. doi 10.1023/B:JAPS.0000032875.04400.a0