

УДК 535.37

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФТОРОФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ ИТТЕРБИЕМ И ЭРБИЕМ

С.В. Зайцева<sup>a, b</sup>, В.А. Асеев<sup>a</sup>, Е.В. Колобкова<sup>a</sup>, Н.В. Никонов<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, Aseev@oi.ifmo.ru<sup>b</sup> Университет Заарбрюкен, Заарбрюкен, Федеративная Республика Германия, Loony92@mail.ru

**Аннотация.** Фторофосфатные стекла являются одними из перспективных матриц для создания иттербий-эрбиевых лазеров. Это связано с высокой технологичностью синтеза стекол и низким содержанием снижающих эффективность люминесценции ОН-групп, а также возможностью синтеза стекол с высокими концентрациями редкоземельных ионов (до 15 вес.%). Целью работы являлось комплексное исследование спектрально-люминесцентных свойств фторофосфатных стекол с различным содержанием иттербия и эрбия. Стекла серии  $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2\text{-BaF}_2\text{-CaF}_2\text{-MgF}_2\text{-AlF}_3\text{-SrF}_2\text{-YF}_3$  получены методом высокотемпературного синтеза. Концентрация фторида эрбия изменялась в пределах 1–12,5 мол.%. Измерены спектры поглощения. На основании полученных данных определены сечения поглощения и параметры Джадда–Офельта. Спектры люминесценции записывались при возбуждении титан-сапфировым лазером с длиной волны 975 нм. Методом МакКамбера были рассчитаны сечения вынужденного излучения. Для расчета радиационного времени затухания люминесценции ионов эрбия использована формула Фюхтбауэра–Ланденбурга. Интегральные сечения поглощения и вынужденного излучения составили  $\sigma_{abs} = 1,37 \times 10^{-18} \text{ см}^{-2}$  и  $\sigma_{em} = 1,39 \times 10^{-18} \text{ см}^{-2}$ . Это превышает значения, получаемые в обычных фосфатных стеклах. Максимальное значение квантового выхода люминесценции составило 85% для образца с концентрацией эрбия  $N_{Er} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . При увеличении концентрации эрбия от  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  до  $12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  квантовый выход снижётся на 7%, что обусловлено малым содержанием гидроксильных групп во фторофосфатных стеклах. Исследованные стекла являются перспективным материалом для создания лазеров и усилителей, работающих на длине волны 1,5 мкм.

**Ключевые слова:** фторофосфатное стекло, лазерные стекла, спектрально-люминесцентные свойства эрбия, иттербий-эрбиевые стекла.

## SPECTRAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF FLUOROPHOSPHATE GLASSES DOPED WITH YTTERBIUM AND ERBIUM

S.V. Zaytseva<sup>a, b</sup>, V. A. Aseev<sup>a</sup>, E.V. Kolobkova<sup>a</sup>, N.V. Nikonov<sup>a</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, Russia, Aseev@oi.ifmo.ru<sup>b</sup> Saarland University, Saarbrücken, Germany

**Abstract.** Fluorophosphate glasses are among the most promising media for ytterbium erbium lasers. The following advantages of this glasses are low OH-content, simple glass synthesis process and the possibility for a relatively high dope concentration of rare-earth ions (up to 15 wt %). The paper deals with complex investigation of the spectral and luminescent properties of fluorophosphate glasses doped with different concentration of ytterbium and erbium ions. Glass compositions based on  $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2\text{-BaF}_2\text{-CaF}_2\text{-MgF}_2\text{-AlF}_3\text{-SrF}_2\text{-YF}_3$  with different erbium fluoride concentration (from 1 to 12.5 mol%) were synthesized by conventional high temperature method. Absorption cross-sections and Judd-Ofelt parameters were determined based on the measured absorption spectra data. Erbium ions luminescence was excited by titanium-sapphire laser at 975 nm. Stimulated emission cross section was calculated by McCumber method. Fuchtbauer-Landenburg formula is used to calculate erbium ions radiation lifetime. Calculated integral values of the absorption cross section are greater than of conventional phosphate glasses and reach  $\sigma_{abs} = 1,37 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}$  and  $\sigma_{em} = 1,39 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}$ . The maximum value of quantum yield was equal to 85% and was obtained for sample with the erbium concentration of  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Increasing of erbium ion concentration from 1 to  $12,9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  results in reducing of quantum yield by 7%, due to the low content of hydroxyl groups in fluorophosphate glasses. These glasses are a promising material for lasers and amplifiers design operating at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength.

**Keywords:** fluorophosphate glass, laser glasses, spectral and luminescent properties of erbium, ytterbium-erbium glasses.

## Введение

Стекла, активированные ионами эрбия и иттербия, являются перспективными материалами для создания оптических усилителей, волокон и твердотельных лазеров, а также для использования в телекоммуникационных системах, медицине и в военной сфере. Это обусловлено тем, что длина волны генерации иона эрбия – 1,5 мкм – оптимальна для передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи, а также лежит в диапазоне длин волн, безопасном для глаз. Ион иттербия является сенситизатором для иона эрбия и вводится в матрицу стекла для повышения эффективности накачки, так как имеет интенсивную полосу поглощения в области 1 мкм. На спектрально-люминесцентные свойства иона эрбия в значительной мере влияет состав стекла. Так, в силикатных стеклах ширина линии люминесценции на полувысоте составляет порядка 40 нм, а в теллуридных стеклах достигает 100 нм [1, 2]. Таким образом, исследования, направленные на поиск новых материалов для матрицы стекла, активированного эрбием, являются актуальными [3–6]. К достоинствам фторофосфатных стекол можно отнести относительную простоту синтеза, большую способность растворять в себе редкоземельные ионы, а также более низкофонный колебательный спектр, чем у традиционных фосфатных стекол. На основе фторосодержащих систем возможно создание стекол, обладающих особыми термооптическими

характеристиками, пониженным показателем преломления и высокими значениями коэффициента дисперсии, широким диапазоном спектральной прозрачности и люминесцентными характеристиками [7]. Исходя из этого, при наличии уникальных оптических параметров и высокой технологичности фторофосфатных систем наибольший интерес представляет получение на их основе материалов для матрицы стекла, активированной эрбием.

#### Объект исследования и методика эксперимента

В работе исследованы фторофосфатные стекла в системе  $m\text{Ba}(\text{PO}_3)_2-10\text{BaF}_2-18,5\text{CaF}_2-10\text{MgF}_2-30\text{AlF}_3-18,5\text{SrF}_2-\text{YF}_3-n\text{ErF}_3-\text{YbF}_3$  (мол.%), где  $m = 4,25; 5$ ,  $n = 1; 2; 3; 8; 12,5$ . С целью сохранения максимальной концентрации фторидов в стекле шихту помещают в закрытый стеклоглеродный тигель и устанавливают в предварительно разогретую электрическую печь на 20 мин при постоянной температуре 950 °С. Синтез стекол проводится в электрической лабораторной печи с нагревом рабочей зоны до 1450 °С. Расплав стекломассы отливается на охлажденную стеклоглеродную пластину. После того, как стекла перешли в твердое состояние, их помещают в муфельную печь отжига.

Для всех стекол измерялся показатель преломления ( $n_d$ ). Полученные данные представлены в табл. 1.

Номер образца	ErF <sub>3</sub> , вес.%	YbF <sub>3</sub> , вес.%	$n_D$	$N_{\text{Er}} \times 10^{20}$ , см <sup>-3</sup>	$N_{\text{Yb}} \times 10^{20}$ , см <sup>-3</sup>
1	1	10	1,516	1	10
2	2	0	1,514	2	0
3	3		1,513	3,1	
4	8		1,512	8,2	
5	12,5		1,51	12,9	

Таблица 1. Составы образцов

В исследуемой системе получают однородные стекла, обладающие высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра (рис. 1). Активированные фторофосфатные стекла обладают хорошими оптическими параметрами [7]. Область прозрачности матрицы находится в пределах 300–3520 нм.

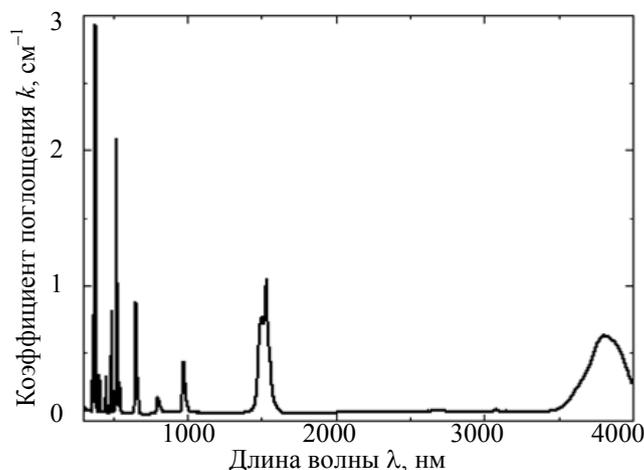


Рис. 1. Спектр поглощения видимой и ИК областей спектра (образец 5)

В работе определены:

- сечения поглощения из основного состояния;
- параметры Джадда–Офельта [8];
- сечения вынужденного излучения
- время затухания люминесценции ионов эрбия для перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  (1535 нм);
- квантовый выход люминесценции ( $q$ ) ионов Er<sup>3+</sup>.

Спектры поглощения стекол измерены с помощью спектрофотометра (Cary 500 фирмы Varian) в спектральном диапазоне 300–1700 нм с разрешением 1 нм (оптическая плотность  $D = 0-10$ ; время интеграции 0,5 с).

ИК спектры поглощения измерялись с помощью ИК Фурье-спектрометра Perkin-Elmer Spectrum 100 в спектральном диапазоне 1700–4000 нм с разрешением 1 нм. Все измерения проводились при комнатной температуре.

В случае лазерных материалов актуально поглощение света локальными оптическими центрами, типичными примерами которых являются редкоземельные ионы. Сечение поглощения было определено по формуле

$$\sigma(\nu) = \frac{k(\nu)}{N},$$

где  $k(\nu)$  – коэффициент поглощения;  $N$  – число локальных оптических центров эрбия [ $\text{см}^{-3}$ ].

Анализ Джадда–Офельта проведен следующим образом: для полосы поглощения, соответствующей электрическому дипольному переходу эрбия  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ , рассчитывалось интегральное сечение поглощения, вычислялась сила линии и составлялась система из  $i$  уравнений с тремя неизвестными параметрами Джадда  $\Omega_i$  ( $i = 2, 4, 6$ ).

Спектры люминесценции возбуждались излучением  $\lambda_{\text{pump}} = 975$  нм непрерывного титан-сапфирового лазера (модель 3900 фирмы Spectra Physics). Спектры люминесценции были записаны с использованием монохроматора (модель Acton-300 фирмы Acton Research Corporation) и приемника (модель ID-441 фирмы Acton Research Corporation) для ИК области, а для видимой области использовалось ФЭУ R928 фирмы Hamamatsu. Сигналы от приемника усиливались и обрабатывались при помощи цифрового синхронного усилителя (модель SR850 фирмы Stanford Research Systems). Сечения вынужденного излучения рассчитывались по методу МакКамбера из спектров поглощения [9].

Во всех исследованных образцах кинетика затухания люминесценции измерялась с использованием излучения импульсного лазера LQ 129 фирмы Solar Laser system ( $\lambda_{\text{pump}} = 975$  нм), возбуждающего люминесценцию, которая регистрируется приемником ID-441 фирмы Acton Research Corporation. На цифровом запоминающем осциллографе модели Infinium HP54830 фирмы Agilent Technologies наблюдается кривая распада люминесценции. Время жизни определялось через отношение площади под кривой затухания к ее амплитуде.

Для расчета радиационного времени затухания люминесценции ионов эрбия используется формула Фюхтбауэра–Ланденбурга:

$$\tau_{\text{рад}}^{-1} = 8 \times \pi \times c \times n^2 \times \tilde{\nu}^2 \times \frac{8}{7} \times \int \sigma_{\text{abs}}(\nu) d\nu,$$

где  $c$  – скорость света;  $n$  – показатель преломления стекла,  $\tilde{\nu}$  – средняя частота полосы,  $\int \sigma_{\text{abs}}(\nu) d\nu$  – интегральное сечение поглощения основного резонансного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ .

Квантовый выход люминесценции был определен косвенным способом по формуле

$$q = \left( \frac{\tau_{\text{эксп}}}{\tau_{\text{рад}}} \right) \times 100\%,$$

где  $\tau_{\text{эксп}}$  – экспериментально определенное время жизни люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  $\tau_{\text{рад}}$  – радиационное время жизни люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ .

### Результаты и обсуждение

Спектр поглощения эрбия представлен несколькими полосами относительно слабой интенсивности с максимумами около 408, 450 и 800 нм в видимой и ближней ИК областях спектра (рис. 2).

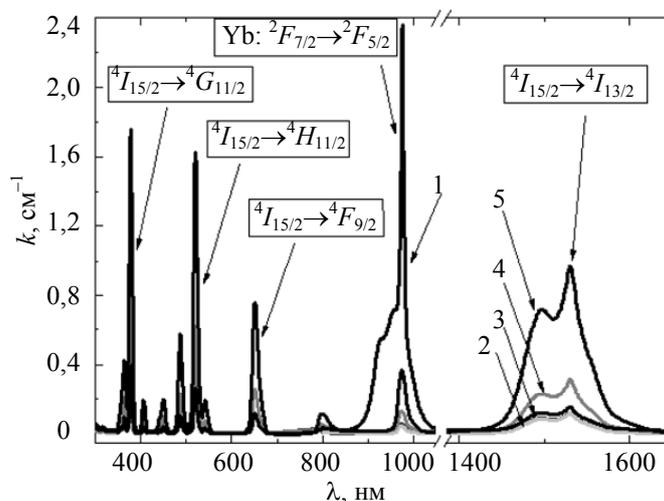


Рис. 2. Спектр поглощения образцов фторофосфатных стекол: 1 –  $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{\text{Er}} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{\text{Er}} = 3,1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 4 –  $N_{\text{Er}} = 8,2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 5 –  $N_{\text{Er}} = 12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$

К самым интенсивным полосам поглощения относятся полосы с максимумами при 522 нм (соответствует переходу  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ ) и 378 нм (соответствует переходу  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ ). Значения интенсивностей остальных полос меньше примерно на порядок. С учетом их относительной узости обеспечить инверсную населенность уровня  ${}^4I_{13/2}$  при ламповой накачке очень сложно.

Введение в состав стекла иттербия приводит к появлению интенсивной полосы поглощения на длине волны 980 нм, соответствующей переходу иттербия  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ . Из-за того, что ширина полосы поглощения иттербия составляет примерно  $1000 \text{ см}^{-1}$ , излучение накачки практически полностью поглощается в диапазоне 870–1100 нм [10]. По сравнению с остальными образцами, у образца 1 фторофосфатного стекла существует очень сильная полоса поглощения, расположенная на 980 нм, вызванная наложением переходов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Повышение эффективности поглощения на 980 нм позволяет использовать волоконные устройства с гораздо меньшей длиной волокна, например, при создании оптоволоконных лазеров с длиной всего в несколько сантиметров [11].

На рис. 3 представлены характерные зависимости сечения поглощения ( $\sigma_{abs}$ ) и вынужденного излучения ( $\sigma_{em}$ ) от длины волны ( $\lambda$ ), полученные методом МакКамбера. Максимальные значения сечений составили  $\sigma_{abs} = 6,80 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2}$  и  $\sigma_{em} = 6,83 \times 10^{-21} \text{ см}^{-2}$  соответственно.

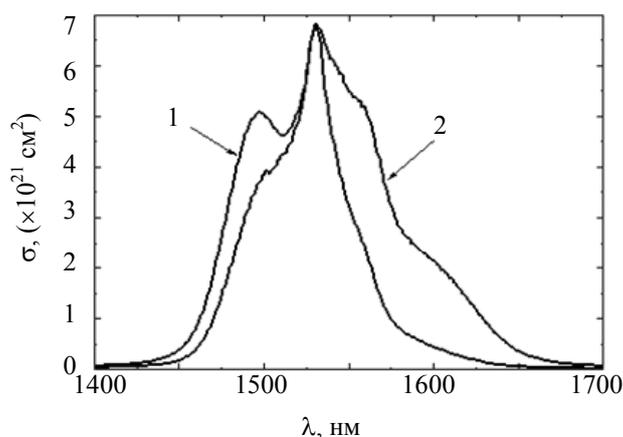


Рис. 3. Спектр сечения поглощения и вынужденного излучения иона эрбия.

1 – сечение поглощения; 2 – сечение вынужденного излучения, образец 1

В табл. 2 приведены значения параметров Джадда–Офельта и рассчитанные значения радиационного времени затухания и интегральных сечений поглощения и вынужденного излучения.

Номер образца	$N_{\text{Er}} \times 10^{20}, \text{ см}^{-3}$	$N_{\text{Yb}} \times 10^{20}, \text{ см}^{-3}$	Параметры Джадда–Офельта, $10^{-20} \text{ см}^{-2}$			$\tau_{\text{рад}}, \text{ мс}$	$\int \sigma_{abs}, 10^{-18} \text{ см}$	$\int \sigma_{em}, 10^{-18} \text{ см}$
			$\Omega_2$	$\Omega_4$	$\Omega_6$			
1	1	10	2,969	1,128	0,41	7,99	1,37	1,39
2	2	0	2,807	1,111	0,36	7,84	1,34	1,38
3	3,1		2,916	1,17	0,47	7,62	1,33	1,38
4	8,2		2,81	1,19	0,38	6,85	1,35	1,38
5	12,9		2,849	1,123	0,506	6,63	1,36	1,38

Таблица 2. Параметры Джадда–Офельта

Спектры видимой люминесценции стекол, содержащих  $\text{Er}^{3+}$ , имеют в диапазоне 500–700 нм две группы полос, соответствующие переходам  ${}^4H_{11/2}, {}^4S_{3/2}, {}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  (рис. 4). В образце 1, дополнительно активированном ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , интенсивность красной полосы люминесценции в красной области спектра (650–675 нм) больше, чем интенсивность полос в зеленой области (515–550 нм). Концентрация эрбия определяет изменение соотношения интенсивностей полос. В образцах 2 и 3 достаточно низкое содержание эрбия, поэтому полоса 515–550 нм превалирует над полосой 650–675 нм. В образце 4 концентрация эрбия увеличилась, соответственно, увеличилась интенсивность полосы в красной области спектра.

Спектры ИК люминесценции стекол, соответствующие переходу  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ , наблюдаются в диапазоне 1400–1700 нм (рис. 5). Образцы фторофосфатных стекол отличаются большими значениями полуширины полосы люминесценции основного эрбиевого перехода: она составляет примерно 88 нм, что намного больше, чем, например, у силикатного стекла (40 нм) или у фосфатного (37 нм) [1, 2].

Исследование кинетики затухания люминесценции образцов фторофосфатных стекол показало, что распад люминесценции происходит по экспоненциальному закону.

При увеличении концентрации ионов эрбия квантовый выход снижается (рис. 6). При концентрации эрбия  $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  квантовый выход люминесценции образца 2 составляет 83%, а при концентрации ионов эрбия  $12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  образца 5 – 78%. Значения квантового выхода люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  представлены в табл. 3.

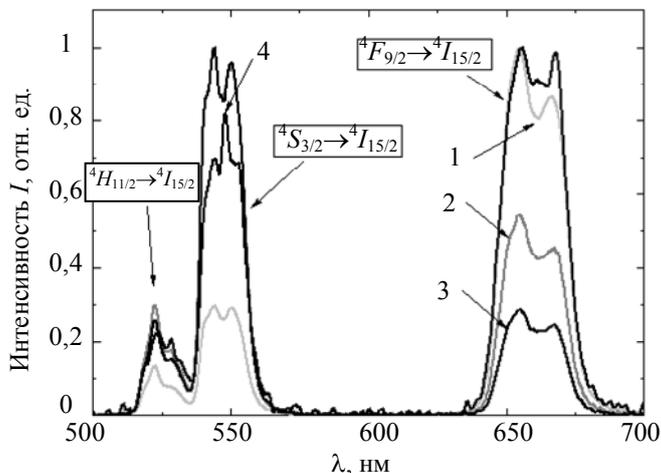


Рис. 4. Спектры видимой люминесценции образцов фторофосфатных стекол. 1 –  $N_{Er} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{Yb} = 10 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{Er} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{Er} = 3,1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 4 –  $N_{Er} = 8,2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$

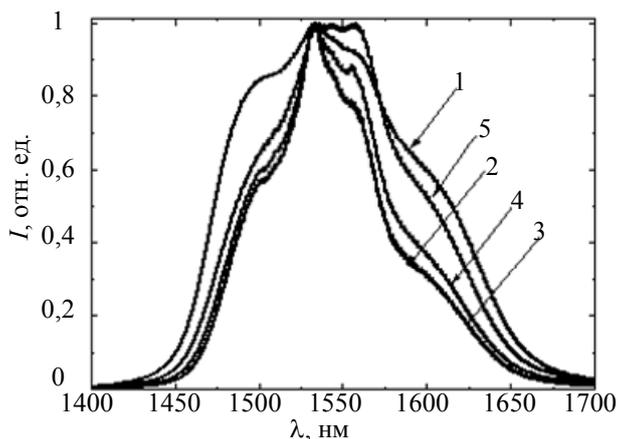


Рис. 5. Спектры ИК люминесценции образцов фторофосфатных стекол. 1 –  $N_{Er} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{Yb} = 10 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{Er} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{Er} = 3,1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 4 –  $N_{Er} = 8,2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 5 –  $N_{Er} = 12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$

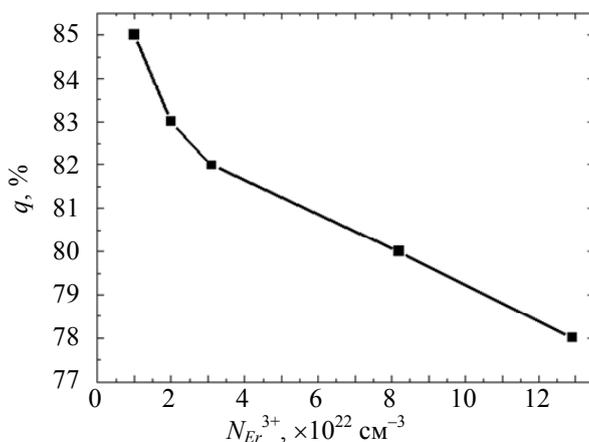


Рис. 6. Зависимость квантового выхода люминесценции ( $q$ ) для лазерного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  от концентрации эрбия

Номер образца	$q, \%$
1	85
2	83
3	82
4	80
5	78

Таблица 3. Квантовый выход

Также с увеличением концентрации  $\text{Er}^{3+}$  уменьшается время жизни люминесценции ( $\tau$ ) перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ . Для ионов эрбия одним из основных тушителей люминесценции являются гидроксильные (ОН-) группы [12–14]. Наличие этих групп в стекле можно оценить по полосе поглощения в районе 3300 нм, т.е. чем больше коэффициент поглощения, тем больше ОН-групп содержит образец. Образцы фторофосфатного стекла характеризуются крайне малым числом гидроксильных групп. В образце 5 коэффициент поглощения составляет около  $0,0094 \text{ см}^{-1}$ , а в образце 3 – около  $0,108 \text{ см}^{-1}$ . Это означает, что содержание ОН-групп значительно больше в образце 3, чем в образце 5 (рис. 7), а концентрация при этом отличается в 4 раза.

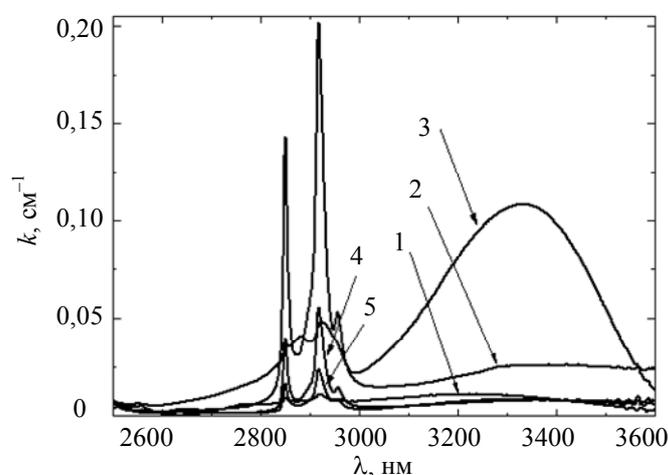


Рис. 7. Полосы поглощения ОН-групп. 1 –  $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Yb}} = 10 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_{\text{Er}} = 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 3 –  $N_{\text{Er}} = 3,1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 4 –  $N_{\text{Er}} = 8,2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ; 5 –  $N_{\text{Er}} = 12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Еще одним фактором уменьшения квантового выхода и времени затухания люминесценции основного эрбиевого перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  является нелинейное ап-конверсионное тушение люминесценции [15–17]. Этот процесс можно охарактеризовать следующим образом: два иона эрбия в начальном состоянии находятся на метастабильном уровне  ${}^4I_{13/2}$ , далее в последующем состоянии один из ионов возвращается на основной уровень  ${}^4I_{15/2}$ , при этом второй ион переходит на высоко возбужденный уровень  ${}^4I_{9/2}$ . Впоследствии ион, находящийся на возбужденном уровне  ${}^4I_{9/2}$ , как правило, безызлучательно релаксирует обратно на метастабильный уровень  ${}^4I_{13/2}$  [15]. Доказательством наличия ап-конверсионных процессов служит видимая люминесценция эрбия, наблюдаемая при ИК накачке (рис. 4). При введении в состав стекла ионов иттербия время жизни ионов эрбия и квантовый выход увеличиваются и достигают максимальных значений – 7,65 мс и 85% соответственно. Далее за счет концентрационного тушения и ап-конверсии наблюдается снижение квантового выхода и времени затухания люминесценции. При максимальной концентрации эрбия квантовый выход составляет 78%. Видно, что увеличение концентрации в 4 раза снизило квантовый выход на 7%, т.е. концентрационное тушение незначительно.

### Заключение

Проведены комплексные исследования спектрально-люминесцентных свойств фторофосфатного стекла, активированного  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ . Данные стекла обладают малым содержанием гидроксильных групп и могут быть активированы большими концентрациями редкоземельных ионов, вплоть до  $12,9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Рассчитанные значения максимума сечения поглощения и вынужденного излучения составили  $\sigma_{\text{abs}} = 6,80 \times 10^{-21} \text{ см}^2$  и  $\sigma_{\text{em}} = 6,83 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ , что больше, чем в обычных фосфатных стеклах. Максимальная полуширина полосы люминесценции, соответствующей переходу  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ , составила 141 нм, что также превосходит эти значения в фосфатных стеклах. Максимальное значение квантового выхода люминесценции равно 85% для образца с концентрацией эрбия  $N_{\text{Er}} = 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Полученные данные позволяют сделать вывод, что эти стекла могут в дальнейшем применяться в качестве материала для создания оптических усилителей, волокон и твердотельных лазеров.

## Литература

1. Condon N.J., Bowman S.R., O'Connor S.P., Myers M.J. Heat loads in erbium-doped laser materials // *Optical Materials*. 2010. V. 32. N 9. P. 1050–1054.
2. Babu S.S., Babu P., Jayasankar C.K., Sievers W., Troster Th., Wortmann G. Optical absorption and photoluminescence studies of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped phosphate and fluorophosphate glasses // *Journal of Luminescence*. 2007. V. 126. N 1. P. 109–120.
3. Zheng T., Qin J.-M., Jiang D.-Y., Xiao S.-C. Spectroscopic properties in  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fluorophosphate glass // *Chinese Physics B*. 2012. V. 21. N 4. Art. N 043302.
4. Liao M.-S., Fang Y.-Z., Hu L.-L., Zhang L.-Y., Xu S.-Q. Effects of  $\text{Yb}^{3+}$  in  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped fluorophosphate glasses // *Chinese Physics Letters*. 2007. V. 24. N 4. P. 1062–1065.
5. Laporta P., Taccheo S., Longhi S., Svelto O., Svelto C. Erbium-ytterbium microlasers: optical properties and lasing characteristics // *Optical Materials*. 1999. V. 11. N 2-3. P. 269–288.
6. Reddy B.S., Buddhudu S., Rao K.S.R.K., Babu P.N., Annapurna K. Optical analysis of  $\text{Er}^{3+}$ : boro-fluorophosphate glasses // *Spectroscopy Letters*. 2008. V. 41. N 8. P. 376–384.
7. Liao M., Duan Z., Hu L., Fang Y., Wen L. Spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  codoped fluorophosphate glasses // *Journal of Luminescence*. 2007. V. 126. N 1. P. 139–144.
8. Aseev V.A., Burdaev P.A., Kolobkova E.V., Nikonorov N.V. Fluorophosphate glasses activated by rare-earth ions and AgBr // *Glass Physics and Chemistry*. 2012. V. 38. N 4. P. 366–372.
9. Ofelt G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ion // *The Journal of Chemical Physics*. 1962. V. 37. N 3. P. 511–520.
10. McCumber D.E. Theory of photon-terminated Optical Masers // *Physical Review*. 1964. V. 134. P. 299–306.
11. Bocharova T.V., Vlasova A.N., Karapetyan G.O., Maslennikova O.N., Sirotkin S.A., Tagil'tseva N.O. Influence of small additives of rare-earth elements on the structure of fluorophosphate glasses // *Glass Physics and Chemistry*. 2010. V. 36. N 3. P. 286–293.
12. Асеев В.А., Ульященко А.М., Никоноров Н.В., Пржеvusкий А.К., Федоров Ю.К. Спектрально-люминесцентные свойства метафосфата иттербия, активированного ионами эрбия // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2005. № 18. С. 180–185.
13. Balakrishnaiah R., Vijaya R., Babu P., Jayasankar C.K., Reddy M.L.P. Characterization of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped fluorophosphate glasses for red emission // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. V. 353. N 13-15 spec. P. 1397–1401.
14. Aseev V.A., Nikonorov N.V., Chukharev A.V., Rokhmin A.S., Przhhevuskii A.K. Measuring the gain/loss spectra in high-concentration ytterbium-erbium-doped laser glasses // *Journal of Optical Technology*. 2003. V. 70. N 11. P. 778–781.
15. Lai B., Feng L., Wang J., Su Q. Optical transition and upconversion luminescence in  $\text{Er}^{3+}$  doped and  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  co-doped fluorophosphate glasses // *Optical Materials*. 2010. V. 32. N 9. P. 1154–1160.
16. Xu W., Li C.-R., Cao B.-S., Dong B. Optical temperature sensor based on up-conversion fluorescence emission in  $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  co-doped ceramics glass // *Chinese Physics B*. 2010. V. 19. N 12. P. 804–808.
17. Liao M., Hu L., Fang Y., Zhang J., Sun H., Xu S., Zhang L. Upconversion properties of  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Tm}^{3+}$  codoped fluorophosphate glasses // *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2007. V. 68. N 3. P. 531–535.

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Зайцева Софья Викторовна</b>       | – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия; студент, Университет Заарбрюкен, Заарбрюкен, Федеративная Республика Германия, Loony92@mail.ru |
| <b>Асеев Владимир Анатольевич</b>     | – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, Aseev@oi.ifmo.ru                                |
| <b>Колобкова Елена Вячеславовна</b>   | – доктор химических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, Kolobok106@rambler.ru  |
| <b>Никоноров Николай Валентинович</b> | – доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, nikonorov@oi.ifmo.ru                       |
| <b>Sofia V. Zaytseva</b>              | – student, ITMO University, Saint Petersburg, Russia; student, Saarland University, Saarbrücken, Germany, Loony92@mail.ru                            |
| <b>Vladimir A. Aseev</b>              | – PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, Aseev@oi.ifmo.ru  |
| <b>Elena V. Kolobkova</b>             | – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, Kolobok106@rambler.ru   |
| <b>Nikolai V. Nikonorov</b>           | – D.Sc., Professor, Department head, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, nikonorov@oi.ifmo.ru   |

Принято к печати 21.03.14

Accepted 21.03.14