

УДК 538.958, 535.37

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЭРБИЯ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$

В.А. Клинков^a, В.А. Асеев^b

^a Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: klinkovvictor@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.01.19, принята к печати 21.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-222-228

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Клинков В.А., Асеев В.А. Спектральные и люминесцентные свойства активированных ионами эрбия стекол на основе $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 222–228. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-222-228

Аннотация

Исследованы спектральные и люминесцентные свойства стекол состава $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ с содержанием ErF_3 0; 0,1; 0,5 и 1,0 мол. %. Образцы стекол получены методом высокотемпературного синтеза в атмосфере аргона. Установлено, что матрица фторалюминатного стекла обладает широкой областью спектральной прозрачности от 0,2 до 6,7 мкм, что свидетельствует о большой практической значимости исследуемого стеклообразного состава в качестве материала для устройств оптоэлектроники. По спектрам инфракрасного пропускания идентифицированы полосы поглощения, обусловленные наличием гидроксильных и фосфатных группировок, максимумы которых расположены около 3,0 и 4,7 мкм соответственно. Установлено, что фторалюминатная стеклообразная матрица содержит относительно низкое содержание ОН-групп. Для активированных ионами эрбия образцов, при возбуждении с длиной волны 487 нм, получены спектры люминесценции в области 500–900 нм. Природа данных полос объяснена на основе упрощенной энергетической диаграммы иона эрбия в стеклообразной матрице. Проанализированы концентрационные зависимости интегральных интенсивностей полос люминесценции, установлено, что максимальным значением обладает образец, содержащий 0,1 мол. % ErF_3 , а наиболее подвержен влиянию концентрационного тушения излучательный переход ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$.

Ключевые слова

спектры поглощения, фторалюминатные стекла, люминесцентные свойства, тушение люминесценции

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-58-00043.

SPECTRAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF GLASSES DOPED WITH ERBIUM IONS BASED ON $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$

V.A. Klinkov^a, V.A. Aseev^b

^aPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

^bITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: klinkovvictor@yandex.ru

Article info

Received 22.01.19, accepted 21.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-222-228

Article in Russian

For citation: Klinkov V.A., Aseev V.A. Spectral and luminescent properties of glasses doped with erbium ions based on $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 222–228 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-222-228

Abstract

The article is devoted to spectral and luminescent properties of glasses of $98\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}\text{-}2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ composition with ErF_3 content 0; 0.1; 0.5 and 1.0 mol. %. Samples of glasses were prepared by high-temperature synthesis in an argon atmosphere. It was found that the matrix of fluoroaluminat glass, has a wide spectral transparency range from 0.2 to 6.7 μm , which indicates the great practical importance of the glassy composition under study as a material for optoelectronics devices. From the infrared transmittance spectra, absorption bands were identified, due to the presence of hydroxyl and phosphate groups, the maxima of which are about 3.0 and 4.7 μm , respectively. It has been established that the

fluoroaluminate glassy matrix has a relatively low content of impurities of OH groups. For the samples doped with erbium upon excitation with a wavelength of 487 nm the luminescence spectra were obtained in the spectral range 500–900 nm. The nature of these bands is explained on the basis of a simplified energy diagram of erbium ion in a glassy matrix. Analysis of the concentration dependences of the integral intensities of the luminescence bands was also carried out, in the course of which it was found that a sample containing 0.1 mol. % ErF_3 has the maximum efficiency. The ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ radiative transition was found to be the one mostly exposed to concentration quenching.

Keywords

absorption spectra, fluoroaluminate glasses, luminescent properties, luminescence quenching

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-58-00043.

Введение

Во многих сферах науки, промышленности и техники широко применяются лазерные стеклообразные материалы. Основой таких материалов является стеклообразная матрица, активированная ионами редкоземельных и переходных металлов. В последние годы проводятся многочисленные исследования новых стеклообразных систем, альтернативных классическим. В частности, важным направлением является разработка матриц с широкой областью пропускания в видимом и инфракрасном диапазоне спектра, а также с низким значением высокочастотной границы колебательного спектра ω_{\max} . Это способствует увеличению квантового выхода люминесценции за счет снижения вероятности безызлучательной релаксации энергии возбуждения между уровнями иона-активатора и позволяет получить излучательные переходы, «потушенные» в матрицах с высоким значением ω_{\max} [1]. Такие классические стеклообразные материалы, как кварцевые, фосфатные и боратные стекла, имеют значения ω_{\max} около 1100, 1300 и 1400 см^{-1} соответственно [2–4]. Рекордно низкие значения ω_{\max} имеют фторидные (около 700 см^{-1}) и халькогенидные (около 450 см^{-1}) стекла [5]. Поэтому большое количество научных работ посвящено изучению спектрально-люминесцентных свойств фторидных и халькогенидных стекол, активированных редкоземельными элементами [6–9].

Среди редкоземельных элементов наибольшую практическую значимость в качестве активаторной добавки имеют ионы эрбия (Er^{3+}). Материалы, активированные Er^{3+} , обладают полосами люминесценции в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра. Но в связи со сложной схемой энергетических уровней иона эрбия количество полос люминесценции, их ширина и квантовый выход чувствительны к составу стеклообразной матрицы [1]. В системах телекоммуникации широко применяются волоконно-оптические усилители на основе кварцевого волокна, активированного ионами эрбия (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier). В данных устройствах оптический сигнал усиливается в спектральной области 1530–1560 нм (Conventional band, C-band). На данный момент исследуются новые системы, в частности на основе фторидных и теллуридных стекол, для реализации усиления в длинноволновой области 1565–1625 нм [2].

Последние несколько лет активно развиваются новые области использования активированных стеклообразных материалов: оптические температурные сенсоры [10, 11], конверторы излучения для солнечных батарей [12], сцинтилляторы [13]. В качестве активаторной добавки ионы эрбия также получили широкое применение. Однако в качестве стеклообразных матриц в указанных областях возможности использования классических систем весьма ограничены.

Цель настоящей работы – исследование спектрально-люминесцентных свойств, а также анализ концентрационных зависимостей интегральных интенсивностей полос люминесценции в спектральной области 500–900 нм от содержания ионов эрбия в серии фторалюминатных стекол.

Объект исследования и методика эксперимента

Фторалюминатные стекла синтезировались в системе $(98-x)\text{MgCaSrBaYAl}_2\text{F}_{14}-2\text{Ba}(\text{PO}_3)_2-x\text{ErF}_3$ по классической для фторидных стеклообразных систем методике [14, 15]. Концентрация ErF_3 образца № 1 – $x=0$, 2 – 0,1, 3 – 0,5, 4 – 1,0 мол. %. Образцы стекол синтезировались в течение 1 ч при 850–950 °С в тиглях марки СУ-2000. Синтез осуществлялся в инертной атмосфере аргона с целью исключения попадания в расплав примесей из окружающего воздуха. Исходными компонентами были $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ и фториды с маркировкой ОСЧ. В качестве активатора использовался ErF_3 . Расплав стекломассы помещался в подогретую форму и отжигался в муфельной печи при 400–450 °С в течение 2 ч. Затем образцы нарезались и полировались.

Спектры оптического поглощения в области 200–1700 нм регистрировались на спектрофотометре Perkin-Elmer LLC, Lambda 900; спектры пропускания в области 2000–8500 нм – на инфракрасном фурье-спектрометре ФСМ 1201.

Измерения спектров люминесценции в области 500–900 нм проводились на многоканальной системе С9920-03 (Hamamatsu Photonics), совмещенной с интегрирующей сферой и фотоприемником. В качестве источника возбуждения использовалась ксеноновая лампа с монохроматором. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты измерений. Спектры пропускания и поглощения

В серии фторалюминатных стекол спектры пропускания в ИК области были идентичны. На рис. 1 представлен спектр ИК-пропускания неактивированного фторалюминатного стекла (образец № 1). Из рисунка следует, что область пропускания в ИК-диапазоне для фторалюминатного стекла простирается вплоть до 6,7 мкм (уровень пропускания 50 %). На рисунке видны полосы поглощения с максимумами около 3,0 и 4,7 мкм. Первая из них относится к поглощению гидроксильных групп, являющихся одними из основных тушителей люминесценции для активированных редкоземельными элементами стекол [16, 17]. Источниками OH-групп могут служить влага, содержащаяся в воздухе и проникающая в расплав стекла в процессе синтеза, а также влага в исходных компонентах стекла.

Следует отметить, что изменение пропускания ΔT в области 3 мкм относительно уровня пропускания в области 2,5 мкм не превышало 3 %, что свидетельствует о низком содержании OH-групп. Так, например, для стекол на основе оксидов тяжелых металлов ΔT более 15 % [18], фтортеллуридных более 20 % [19], висмут-германатных – около 16 % [20].

Вторая более широкая и интенсивная полоса поглощения, расположенная около 4,7 мкм, обусловлена обертонами фосфатных групп [P-O]. Природа данной полосы описана для различных фторфосфатных стекол в работе [9], ее присутствие не оказывает существенного влияния на люминесценцию Er^{3+} .

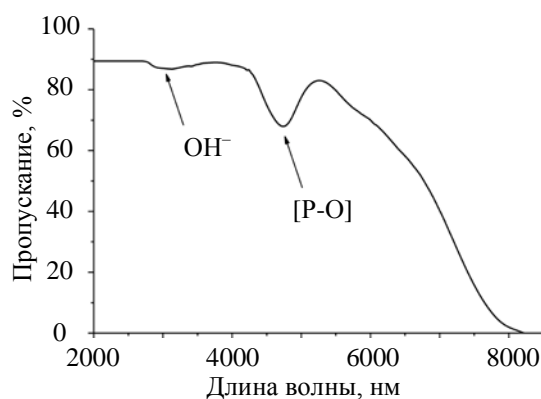


Рис. 1. Типичный спектр инфракрасного пропускания фторалюминатного стекла

На рис. 2 представлены спектры оптического поглощения образцов фторалюминатного стекла в спектральной области 200–1700 нм. Для наглядности на рисунке изображены спектры для образцов с минимальным (образец № 1) и максимальным содержанием иона-активатора (№ 4). Видно, что неактивированный образец прозрачен во всей исследуемой области. Наблюдаемые для № 4 полосы поглощения обусловлены внутриконтинуальными переходами Er^{3+} . Наиболее интенсивные полосы имеют максимумы около 378, 487, 521, 651 и 1532 нм, их положение соответствует [8]. Этим полосам соответствуют следующие энергетические переходы: ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$; ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$; ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$; ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$ и ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$.

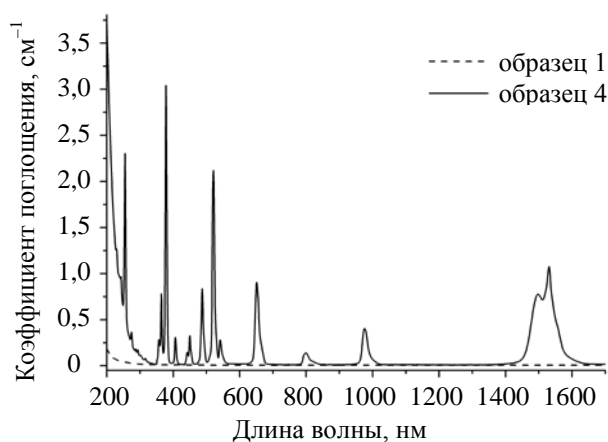


Рис. 2. Спектры оптического поглощения для неактивированного образца (№ 1, пунктир) и образца с максимальным содержанием ErF_3 (№ 4, сплошная)

Таким образом, из приведенных на рис. 1 и 2 спектров следует, что фторалюминатные стекла

исследуемого состава обладают широким окном прозрачности: 0,2–6,7 мкм. Последнее свидетельствует о возможности использования их в качестве материала для оптических и оптоэлектронных устройств, в том числе работающих в среднем ИК-диапазоне.

Результаты измерений. Люминесцентные свойства

На рис. 3 приведены спектры люминесценции активированных ионами эрбия фторалюминатных стекол при возбуждении с длиной волны 487 нм. Спектры люминесценции нормированы на долю поглощенной энергии возбуждения. Длина волны возбуждения соответствует полосе поглощения $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$. На вставке на рис. 3 изображена упрощенная энергетическая диаграмма Er^{3+} во фторалюминатном стекле.

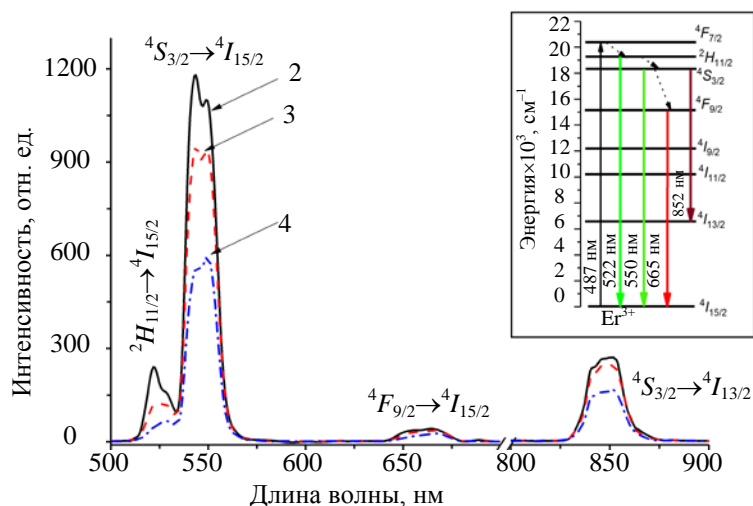


Рис. 3. Спектры люминесценции фторалюминатных стекол, активированных ионами эрбия, при возбуждении с $\lambda=487$ нм (образцы № 2–4). На вставке упрощенная энергетическая диаграмма Er^{3+} во фторалюминатном стекле; пунктир – безызлучательные переходы

В спектре люминесценции можно выделить четыре полосы с максимумами 522, 550, 665 и 852 нм. Полосы люминесценции около 522, 550 и 665 нм обусловлены излучательными переходами в основное состояние иона эрбия с уровней энергии $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$ соответственно. Механизм заселения рассматриваемых энергетических состояний заключается в безызлучательной мультифононной релаксации с вышележащих уровней. Как следует из энергетической диаграммы Er^{3+} и спектров оптического поглощения, между состояниями $^2H_{11/2}$ и $^4S_{3/2}$ имеется достаточно малый энергетический зазор ΔE – около 700 см^{-1} . Между состояниями $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$ ΔE составляет около 3100 см^{-1} . Как известно, вероятность безызлучательных внутрицентровых переходов W описывается следующим выражением [1, 2]:

$$W = A \exp(-B\Delta E / h\omega_{\max}),$$

где коэффициенты A и B определяются параметрами стеклообразной матрицы, h – постоянная Планка.

Таким образом, для безызлучательных переходов в рамках одной матрицы величина W определяется энергетическим зазором ΔE . Вследствие максимальной величины ΔE между состояниями $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$ населенность последнего существенно меньше, чем $^4S_{3/2}$ и $^2H_{11/2}$, поэтому интенсивность излучательного перехода $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ минимальна.

Рассмотрим полосу люминесценции с максимумом, расположенным около 852 нм. Она обусловлена электронным переходом $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$. Полосы люминесценции с максимумами около 550 и 852 нм связаны с излучательным переходом из одного и того же возбужденного состояния иона эрбия – $^4S_{3/2}$. Стоит отметить особый характер излучательного перехода $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$. В данном случае реализуется переход не из возбужденного состояния в основное (как для обсуждаемых ранее переходов), а из возбужденного состояния $^4S_{3/2}$ в нижележащее неосновное состояние – на метастабильный энергетический уровень $^4I_{13/2}$. Вероятность обсуждаемого перехода достаточно мала, причем существенные роли в этом играют значение высокочастотной границы колебательного спектра стеклообразной матрицы ω_{\max} и населенность уровня $^4I_{13/2}$. Из литературных данных известно, что для фторалюминатной матрицы ω_{\max} не превышает 800 см^{-1} [9], что значительно меньше, чем для кварцевой и фосфатной систем. Полоса люминесценции около 852 нм преимущественно обнаруживается в бескислородных стеклах, в частности во фториндиевых [21].

На рис. 4 приведены концентрационные зависимости интегральных интенсивностей полос люминесценции. Их значения рассчитывались как площадь под кривой соответствующей полосы люминесценции. Экспериментальные значения были аппроксимированы линейной функцией. Из рисунка

видно, что для фторалюминатных стекол с увеличением содержания ионов эрбия интегральная интенсивность всех полос линейно убывает. Преимущественной причиной сокращения их значений с ростом содержания Er^{3+} является концентрационное тушение люминесценции.

На данный момент в литературе отсутствуют данные о концентрационном тушении люминесценции при возбуждении с длиной волны 487 нм для фторалюминатных стекол исследованного состава. Люминесцентные свойства фторфосфатных стекол исследованы в работе [22], где показано, что снижение эффективности люминесценции за счет отмеченного эффекта начинает проявляться при концентрациях активатора выше 0,05 мол. %. В исследовании [23] для оксифтортеллуридных стекол также наблюдалось концентрационное тушение при концентрации Er_2O_3 от 0,1 мол. %, в [24] для теллуридного стекла такая концентрация составила 0,35 мол. %. Таким образом, для фторалюминатных стекол исследуемого состава содержание активатора, при котором проявляется концентрационное тушение люминесценции, сопоставимо со значениями для теллуридных и фтортеллуридных систем.

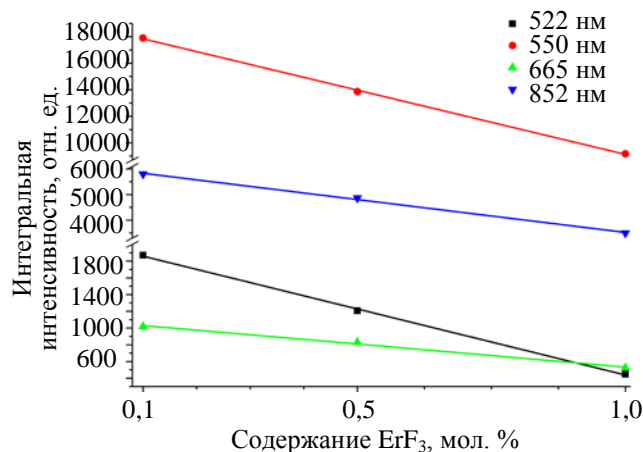


Рис. 4. Концентрационные зависимости интегральных интенсивностей полос люминесценции

Из рис. 4 видно, что тушение люминесценции различным образом воздействует на переходы. Так, максимальное снижение интенсивности имел излучательный переход ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, а минимальное ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. Таким образом, получена следующая тенденция по тушению люминесценции Q :

$$Q({}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}) < Q({}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}) < Q({}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}) < Q({}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}).$$

Представленная зависимость согласуется с описанным выше механизмом заполнения соответствующих возбужденных состояний: максимальному тушению подвержены энергетические состояния с минимальными значениями зазора ΔE с вышележащими энергетическими уровнями.

Заключение

Проведены исследования спектральных и люминесцентных свойств фторалюминатных стекол с различным содержанием ErF_3 (0; 0,1; 0,5; 1,0 мол. %). Показано, что фторалюминатные стекла характеризуются малым содержанием гидроксильных групп, а также имеют широкую область прозрачности 0,2–6,7 мкм. В области 4,7 мкм идентифицирована полоса поглощения, которая связана с присутствием в составе стекла фосфатных группировок. Получена люминесценция с излучательным переходом ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. Наличие полосы люминесценции около 852 нм обусловлено особенностью структуры фторалюминатных стекол. Проанализированы концентрационные зависимости интегральных интенсивностей полос люминесценции. Установлено, что причиной снижения значений интегральных интенсивностей является концентрационное тушение люминесценции. При этом показано, что концентрационное тушение различным образом воздействует на излучательные переходы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что фторалюминатные стекла исследованного состава могут быть использованы для активных и пассивных оптоэлектронных устройств, в том числе в среднем инфракрасном диапазоне.

Литература

1. Пржевуский А.К., Никоноров Н.В. Конденсированные лазерные среды. Курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
2. Henderson-Sapir O. Development of Dual-Wavelength Pumped Mid-Infrared Fibre Lase. PhD Thesis, University of Adelaide, 2015.
3. Rasool S.N. et al. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped phosphate based glasses for broadband 1.54 μm emission // *Journal of Molecular Structure*. 2017. V. 1130. P. 837–843.

References

1. Przhevuskii A.K., Nikonov N.V. *Condensed Laser Mediums. Lecture Course*. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2009. (in Russian)
2. Henderson-Sapir O. *Development of Dual-Wavelength Pumped Mid-Infrared Fibre Lase*. PhD Thesis, University of Adelaide, 2015.
3. Rasool S.N. et al. Spectroscopic properties of Er^{3+} -doped phosphate based glasses for broadband 1.54 μm emission. *Journal of Molecular Structure*, 2017, vol. 1130, pp. 837–843.

- doi: 10.1016/j.molstruc.2016.10.090
4. Joshi P., Shen S., Jha A. Er 3+-doped boro-tellurite glass for optical amplification in the 1530-1580 nm // *Journal of Applied Physics*. 2008. V. 103. N 8. P. 083543. doi: 10.1063/1.2908873
 5. Som T., Karmakar B. Nephelauxetic effect of low phonon antimony oxide glass in absorption and photoluminescence of rare-earth ions // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2011. V. 79. N 5. P. 1766–1782. doi: 10.1016/j.saa.2011.05.054
 6. Karaksina E.V., Shiryayev V.S., Kotereva T.V., Velmuzhov A.P., Ketkova L.A., Snopatin G.E. Preparation of high-purity Pr³⁺ doped Ge–As–Se–In–I glasses for active mid-infrared optics // *Journal of Luminescence*. 2016. V. 177. P. 275–279. doi: 10.1016/j.jlumin.2016.05.005
 7. Tang Z. et al. Mid-infrared photoluminescence in small-core fiber of praseodymium-ion doped selenide-based chalcogenide glass // *Optical Materials Express*. 2015. V. 5. N 4. P. 870–886. doi: 10.1364/ome.5.000870
 8. Huang F., Liu X., Hu L., Chen D. Spectroscopic properties and energy transfer parameters of Er 3+-doped fluorozirconate and oxyfluoroaluminate glasses // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. P. 5053. doi: 10.1038/srep05053
 9. Ehrh D. Phosphate and fluoride phosphate optical glasses—properties, structure and applications // *Physics and Chemistry of Glasses-European Journal of Glass Science and Technology Part B*. 2015. V. 56. N 6. P. 217–234. doi: 10.13036/17533562.56.6.217
 10. Wade S.A. Temperature Measurement using Rare Earth Doped Fibre Fluorescence. PhD Thesis, Victoria University, 1999.
 11. Rai V.K., Rai A. Temperature sensing behavior of Eu 3+ doped tellurite and calibo glasses // *Applied Physics B*. 2007. V. 86. N 2. P. 333–335. doi: 10.1007/s00340-006-2445-1
 12. Mizuno S. et al. Spectroscopic properties of Er doped and Er, Nd codoped fluoride glasses under simulated sunlight illumination // *Optical Materials*. 2011. V. 33. N 12. P. 1958–1963.
 13. Lan Y., Mei B., Li W., Xiong F., Song J. Preparation and scintillation properties of Eu²⁺: CaF₂ scintillation ceramics // *Journal of Luminescence*. 2018. V. 208. P. 183–187. doi: 10.1016/j.jlumin.2018.12.047
 14. Бочарова Т.В. и др. Радиационные явления в микро неоднородных структурах фторалюминатных стеклообразных материалов // *Физика твердого тела*. 2014. Т. 56. № 2. С. 349–354.
 15. Зайцева С.В., Асеев В.А., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В. Спектрально-люминесцентные свойства фторофосфатных стекол, активированных иттербием и эрбием // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. № 4 (92). С. 62–68.
 16. Алексеев Н.Е., Изъинев А.А., Кравченко В.Б., Рудницкий Ю.П. Влияние концентрационного тушения и воды на энергетические характеристики стекол, активированных неодимом // *Квантовая электроника*. 1974. Т. 1. № 9. С. 2002–2008.
 17. Асеев В.А., Жукова М.Н., Никоноров Н.В., Пржевуцкий А.К., Федоров Ю.К., Федорова Е.М. Влияние ОН-групп на спектрально-люминесцентные свойства высококонцентрированных иттербий-эрбиевых стекол // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2006. № 34. С. 60–67.
 18. Ragin T., Zmojda J., Kochanowicz M. et al. Energy transfer mechanisms in heavy metal oxide glasses doped with lanthanide ions // *Proc. SPIE*. 2016. V. 10031. doi: 10.1117/12.2247810
 19. Wang P.F., Li W.N., Peng B., Lu M. Effect of dehydration techniques on the fluorescence spectral features and OH absorption of heavy metals containing fluoride tellurite glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. V. 358. N 4. P. 788–793. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.029
 20. Ragin T., Zmojda J., Kochanowicz M. et al. Enhanced mid-infrared 2.7 μm luminescence in low hydroxide bismuth-germanate glass and optical fiber co-doped with Er³⁺/Yb³⁺ ions // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017. V. 457. P. 169–174. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.12.001
 21. Catunda T., Nunes L.A.O., Florez A. et al. Spectroscopic doi: 10.1016/j.molstruc.2016.10.090
 4. Joshi P., Shen S., Jha A. Er 3+-doped boro-tellurite glass for optical amplification in the 1530-1580 nm. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 103, no. 8, pp. 083543. doi: 10.1063/1.2908873
 5. Som T., Karmakar B. Nephelauxetic effect of low phonon antimony oxide glass in absorption and photoluminescence of rare-earth ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011, vol. 79, no. 5, pp. 1766–1782. doi: 10.1016/j.saa.2011.05.054
 6. Karaksina E.V., Shiryayev V.S., Kotereva T.V., Velmuzhov A.P., Ketkova L.A., Snopatin G.E. Preparation of high-purity Pr³⁺ doped Ge–As–Se–In–I glasses for active mid-infrared optics. *Journal of Luminescence*, 2016, vol. 177, pp. 275–279. doi: 10.1016/j.jlumin.2016.05.005
 7. Tang Z. et al. Mid-infrared photoluminescence in small-core fiber of praseodymium-ion doped selenide-based chalcogenide glass. *Optical Materials Express*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 870–886. doi: 10.1364/ome.5.000870
 8. Huang F., Liu X., Hu L., Chen D. Spectroscopic properties and energy transfer parameters of Er 3+-doped fluorozirconate and oxyfluoroaluminate glasses. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 5053. doi: 10.1038/srep05053
 9. Ehrh D. Phosphate and fluoride phosphate optical glasses—properties, structure and applications. *Physics and Chemistry of Glasses-European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 217–234. doi: 10.13036/17533562.56.6.217
 10. Wade S.A. *Temperature Measurement using Rare Earth Doped Fibre Fluorescence*. PhD Thesis, Victoria University, 1999.
 11. Rai V.K., Rai A. Temperature sensing behavior of Eu 3+ doped tellurite and calibo glasses. *Applied Physics B*, 2007, vol. 86, no. 2, pp. 333–335. doi: 10.1007/s00340-006-2445-1
 12. Mizuno S. et al. Spectroscopic properties of Er doped and Er, Nd codoped fluoride glasses under simulated sunlight illumination. *Optical Materials*, 2011, vol. 33, no. 12, pp. 1958–1963.
 13. Lan Y., Mei B., Li W., Xiong F., Song J. Preparation and scintillation properties of Eu²⁺: CaF₂ scintillation ceramics. *Journal of Luminescence*, 2018, vol. 208, pp. 183–187. doi: 10.1016/j.jlumin.2018.12.047
 14. Bocharova T.V., Sysoev D.S., Vlasova A.N., Maslennikova I.G., Tagiltseva N.O. Radiation phenomena in microinhomogeneous structures of fluoroaluminate glass-like materials. *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 353–358.
 15. Zaytseva S.V., Aseev V.A., Kolobkova E.V., Nikonov N.V. Spectral and luminescent properties of fluorophosphates glasses doped with ytterbium and erbium. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 4, pp. 62–68. (in Russian)
 16. Alekseev N.E. et al. Influence of the concentration quenching and of water on the energy characteristics of neodymium-activated glasses. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. 4, no. 9, pp. 1111–1114. doi: 10.1070/QE1975v004n09ABEH011461
 17. Aseev V.A., Zhukova M. N., Nikonov N. V., Przewuski A. K., Fedorov Yu. K., Fedorova E.M. Effect of OH-groups on the spectral-luminescent properties of highly concentrated ytterbium-erbium glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 34, pp. 60–67. (in Russian)
 18. Ragin T., Zmojda J., Kochanowicz M. et al. Energy transfer mechanisms in heavy metal oxide glasses doped with lanthanide ions. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10031. doi: 10.1117/12.2247810
 19. Wang P.F., Li W.N., Peng B., Lu M. Effect of dehydration techniques on the fluorescence spectral features and OH absorption of heavy metals containing fluoride tellurite glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, no. 4, pp. 788–793. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.029
 20. Ragin T., Zmojda J., Kochanowicz M. et al. Enhanced mid-infrared 2.7 μm luminescence in low hydroxide bismuth-germanate glass and optical fiber co-doped with Er³⁺/Yb³⁺ ions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, vol. 457, pp. 169–174. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.12.001
 21. Catunda T., Nunes L.A.O., Florez A. et al. Spectroscopic properties and upconversion mechanisms in Er 3+-doped fluoroindate glasses. *Physical Review B*, 1996, vol. 53, no. 10, pp. 6065–6070. doi: 10.1103/physrevb.53.6065

- properties and upconversion mechanisms in Er³⁺-doped fluorindate glasses // *Physical Review B*. 1996. V. 53. N 10. P. 6065–6070. doi: 10.1103/physrevb.53.6065
22. Lai B., Feng L., Wang J., Su Q. Optical transition and upconversion luminescence in Er³⁺ doped and Er³⁺–Yb³⁺ co-doped fluorophosphate glasses // *Optical Materials*. 2010. V. 32. N 9. P. 1154–1160. doi: 10.1016/j.optmat.2010.03.023
 23. Babu P., Seo H.J., Kesavulu C.R. et al. Thermal and optical properties of Er³⁺-doped oxyfluorotellurite glasses. *Journal of Luminescence*, 2009, vol. 129, no. 5, pp. 444–448. doi: 10.1016/j.jlumin.2008.11.014
 24. Goncalves A., Zanuto V.S., Flizikowski G.A.S. et al. Luminescence and upconversion processes in Er³⁺-doped tellurite glasses // *Journal of Luminescence*. 2018. V. 201. P. 110–114. doi: 10.1016/j.jlumin.2018.04.031

Авторы

Клинок Виктор Артемович – аспирант, заведующий учебной лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, Scopus ID: 56711881900, ORCID ID: 0000-0002-5527-7256, klinkovvictor@yandex.ru

Асеев Владимир Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7004254881, ORCID ID: 0000-0003-4098-2136, Aseev@oi.ifmo.ru

Authors

Victor A. Klinkov – postgraduate, Head of university laboratory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Scopus ID: 56711881900, ORCID ID: 0000-0002-5527-7256, klinkovvictor@yandex.ru

Vladimir A. Aseev – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7004254881, ORCID ID: 0000-0003-4098-2136, Aseev@oi.ifmo.ru