

Научная статья

УДК 541.35

doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.002

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0,8\text{MeO}/0,2\text{MeF}_2)$ (Me — Ca, Ba), СОДЕРЖАЩИХ ОКСИДЫ ДВУХВАЛЕНТНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Джулия Рафаеловна Еганиян¹, Мхитар Рафаелович Оганесян², Николай Владиславович Ященко³,
Татевик Васаковна Григорян⁴, Ваган Петросович Тороян⁵, Елена Викторовна Кумкумаджян⁶,
Карине Карленовна Галоян⁷, Лусине Альбертовна Гаспарян⁸, Гоарик Габриеловна Манукян⁹,
Николай Бабкенович Князян¹⁰**

^{1–10}Институт общей и неорганической химии имени М. Г. Манвеляна Национальной академии наук
Армении, Ереван, Армения

¹julia.yeganyan@gmail.com

²h-mkhitar@mail.ru

³iashchenkonikolai@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0951-9167>

⁴tatev1984@mail.ru

⁵toroyan50@mail.ru

⁶yelena.kumkumajyan53@gmail.com

⁷kkgaloyan1954@mail.ru

⁸lagasparyan@list.ru

⁹gmanukyan@sci.am, <https://orcid.org/0000-0001-8993-0471>

¹⁰knigo51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9500-0588>

Аннотация

Исследованы области стеклообразования и ликвации, предельные кривые температуры ликвидуса систем $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0,8\text{MeO}/0,2\text{MeF}_2)$ (Me — Ca, Ba) с целью разработки химически устойчивых стекол нового состава как матрицы для получения люминофоров. Определены эвтектические составы.

Ключевые слова:

стеклообразование, кристаллизация, фазовое разделение, ликвация, термическое расширение, эвтектические составы, люминофоры

Для цитирования:

Теплофизические свойства боросиликатных стекол системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0,8\text{MeO}/0,2\text{MeF}_2)$ (Me — Ca, Ba), содержащих оксиды двухвалентных металлов / Дж. Р. Еганиян [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 15–22. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.002.

Original article

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BOROSILICATE GLASSES OF THE $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0,8\text{MeO}/0,2\text{MeF}_2)$ (Me—Ca, Ba) CONTAINING DIVALENT METAL OXIDES

**Julia R. Yeganyan¹, Mkhitar R. Hovhannisyan², Nikolay V. Iashchenko³, Tatevik V. Grigoryan⁴,
Vahan P. Toroyan⁵, Yelena V. Kumkumajyan⁶, Karine K. Galoyan⁷, Lusine A. Gasparyan⁸,
Goharik G. Manukyan⁹, Nikolay B. Knyazyan¹⁰**

^{1–10}M. G. Manvelyan Institute of General and Inorganic Chemistry off the National Academy
of Sciences of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

¹julia.yeganyan@gmail.com

²h-mkhitar@mail.ru

³iashchenkonikolai@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0951-9167>

⁴tatev1984@mail.ru

⁵toroyan50@mail.ru

⁶yelena.kumkumajyan53@gmail.com

⁷kkgaloyan1954@mail.ru

⁸lagasparyan@list.ru

⁹gmanukyan@sci.am, <https://orcid.org/0000-0001-8993-0471>

¹⁰knigo51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9500-0588>

© Еганиян Д. Р., Оганесян М. Р., Ященко Н. В., Григорян Т. В., Тороян В. П., Кумкумаджян Е. В.,
Галоян К. К., Гаспарян Л. А., Манукян Г. Г., Князян Н. Б., 2025

Abstract

The glass formation and liquation regions, and the limiting liquidus temperature curves of the $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0.8\text{MeO}/0.2\text{MeF}_2)$ (Me—Ca, Ba) systems were studied with the aim of developing chemically stable glasses of a new composition as matrices for producing phosphors. Eutectic compositions were determined

Keywords:

glass formation, crystallization, phase separation, liquation, thermal expansion, eutectic compositions, phosphors

For citation:

Thermophysical properties of borosilicate glasses of the $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}(0.8\text{MeO}/0.2\text{MeF}_2)$ (Me—Ca, Ba) containing divalent metal oxides / J. R. Yeganyan [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 15–22. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.002.

Введение

Боросиликатные стекла находят широкое применение в микроэлектронике и фотонике благодаря их высокой химической устойчивости, микротвердости и хорошей прозрачности в видимом диапазоне спектра, высокой температуре размягчения, повышенному пропусканию ультрафиолетового излучения [1; 2]. Современные требования к материалам для оптоэлектронных устройств стимулируют разработку новых стеклообразных и стеклокристаллических материалов с регулируемыми теплофизическими свойствами, высокой термической стабильностью и возможностью легирования активными ионами.

Одним из подходов к модификации свойств боросиликатных стекол является введение оксидов и фторидов двухвалентных щелочноземельных металлов, таких как Ca и Ba, в виде бинарных смесей MeO/MeF_2 . Эти добавки выполняют роль модификаторов, влияя на процессы стеклообразования, фазового разделения и кристаллизации [3; 4]. Ранее показано, что ионы Ca^{2+} и Ba^{2+} могут по-разному воздействовать на структуру и свойства стекла вследствие различий в их ионных радиусах и координационном поведении [5; 6]. Однако влияние смешанных оксифторидных компонентов на стеклообразование и ликвацию, термическое поведение стекол систем $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--MeO}/\text{MeF}_2$, особенности кристаллизации и образования оксифторидных фаз остаются недостаточно изученными.

Цель настоящей работы — исследовать влияние оксидов и фторидов кальция и бария (CaO , CaF_2 , BaO , BaF_2) на стеклообразование, фазовые превращения и теплофизические свойства стекол системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}0.8\text{MeO}/0.2\text{MeF}_2$, а также оценить возможность получения на их основе механически и химически устойчивых стекол, пригодных для использования в качестве матрицы для получения стеклообразных и стеклокристаллических люминофоров.

Результаты

Исследованы области стеклообразования двухкомпонентных и трехкомпонентных систем $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}0.8\text{MeO}/0.2\text{MeF}_2$ (Me = Ca, Ba), фазовые превращения. Определены приграничные соединения областей стеклообразования систем и пути кристаллизации первичных фаз. Исследовано влияние оксифторидов на легкоплавкость и свойства синтезированных стекол. Стекла синтезировали в платиновом тигле при 1 100–1 550 °С в атмосфере воздуха в течение 1 ч. Расплав отливали на холодную плиту и стальные формы, отжиг образцов при температуре стеклования. Диаграммы плавкости и кристаллизацию стекол систем исследовали методами ДТА и РФА.

Области стеклообразования, устойчивые интервалы ликвации и поля первичной кристаллизации соединений систем $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--}0.8\text{MeO}/0.2\text{MeF}_2$ (Me = Ca, Ba), приведены на рис. 1. В оксидных системах $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--MeO}$ многими исследованиями подтверждено наличие стабильной ликвации в широкой области составов [7; 8]. В бинарных боратных системах с оксидом кальция и бария выявлена область стабильной ликвации двух расплавов (выше ~1 100 °С в CaO и 950 °С в BaO содержащих системах), а в силикатных системах стабильная ликвация образуется только в кальциевой системе. В бариевой системе существует метастабильная ликвация, вследствие чего область ликвации в тройной системе сужается. Как показали наши исследования, при частичной замене кислорода на фтор приграничные линии стабильной ликвации систем смещаются в область с низким содержанием модификаторов.

Как видно из рис. 1 верхняя граница областей ликвации в обеих системах практически смещается параллельно нижней границы областей стеклообразования. Такое явление, по-видимому, связано с понижением температур ликвидуса систем при увеличении боратной составляющей в составах расплава

и, следовательно, с повышением их стеклообразующей способности [9; 10]. В псевдобинарной системе $B_2O_3-0,8CaO/0,2CaF_2$ в области образования стекол находятся поля первичной кристаллизации соединений $CaB_4(O,F)_7$ и $CaB_2(O,F)_4$, плавящиеся конгруэнтно при 995 и 1 120 °С. В системе $SiO_2-0,8CaO/0,2CaF_2$ в области стеклования находится поле первичной кристаллизации $CaSi(O,F)_3$. Фторсодержащий метасиликат плавится без разложения при 1 532 °С. Частично в области стеклования расположено поле кристаллизации соединения $Ca_3Si_2(O, F)$, плавящегося с разложением при 1 445 °С. В области стеклования в бинарной боратной системе образуются две эвтектики и эвтектика за пределом стеклования с температурой плавления 1 115 °С. В силикатной системе образуется две эвтектики в области образования стекол ($T_{пл.}$ 1 420 °С) и на верхней границе стеклообразования ($T_{пл.}$ 1 440 °С). В бинарных частях системы $SiO_2-B_2O_3-0,8BaO/0,2BaF_2$ располагаются первичные поля кристаллизации: в системе $B_2O_3-0,8BaO/0,2BaF_2$ — конгруэнтно плавящиеся соединения $BaB_8(O,F)_{13}$ ($T_{пл.}$ 875 °С), $BaB_4(O,F)_7$ ($T_{пл.}$ 895 °С) и за верхней границей области стекол $BaB_2(O,F)_4$ ($T_{пл.}$ 895 °С); в системе $SiO_2-0,8BaO/0,2BaF_2$ в области стеклования плавящееся без разложения соединение $BaSi_2(O, F)_5$ ($T_{пл.}$ 1 425 °С) и на границе стеклообразования — $Ba_2Si_3(O, F)_8$ ($T_{пл.}$ 1 430 °С). В системе $B_2O_3-0,8BaO/0,2BaF_2$ образуются три, а в силикатной — два эвтектических состава. Следовательно, в бинарных системах области стеклообразования заканчиваются из-за повышения температуры ликвидуса систем и увеличения концентрации модифицирующих компонентов [11–13].

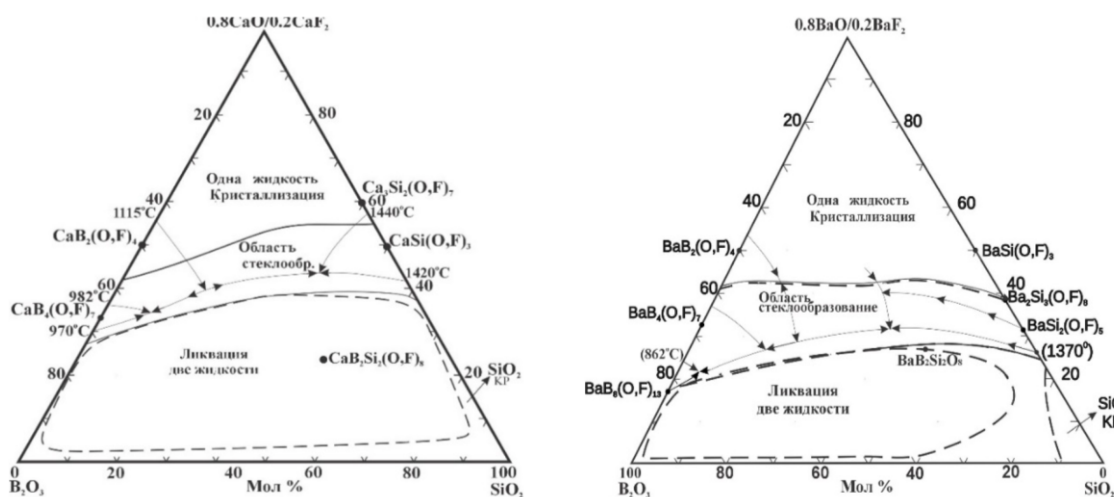


Рис. 1. Области стеклообразования, устойчивой ликвации и кривые температуры ликвидуса исследуемых систем: $0,8MeO/0,2MeF_2-B_2O_3-SiO_2$ ($Me = Ca, Ba$)

Стеклообразование в псевдотройных системах непрерывны и граничат с обеими бинарными системами и отличаются относительно узкой областью стеклообразования, ограниченными ликвацией (нижняя граница) и кристаллизацией (верхняя граница) расплавов. В псевдотройных системах образуются две тройные эвтектические составы.

Таким образом, можно отметить, что в боросиликатной системе стеклообразование связано с одновременным присутствием в расплаве структурных групп BO_3 , BO_4 и SiO_4 , которые при охлаждении объединяются в единую пространственную сетку стекла. Следовательно, координационные переходы и разное структурное положение боратных групп способствуют внедрению и оптимальному распределению в структуре стекла ионов с различными радиусами и зарядом при изменении степени окисления бора. Как видно из рис. 1, верхняя граница областей ликвации в обеих системах практически параллельно смещается до нижней границы областей стеклообразования. Такое явление, по-видимому, связано с понижением температур ликвидуса систем при увеличении боратной составляющей в составах расплава и, следовательно, с повышением их стеклообразующей способности [14; 15].

Из кривых дифференциально термического анализа стекол видно, что стекла по указанным разрезам и составам отличаются относительно высокими значениями температуры стеклования, изменяющимися в интервале 608–678 °С (кальциевые стекла) и 565–610 °С (бариевые стекла), а начало

размягчения — 707–752 °С (кальциевые стекла) и 670–710 °С (бариевые стекла) (рис. 2). Характер кристаллизации стекол, судя по интенсивности термических эффектов и их количеству, в отдельных системах практически идентичен.

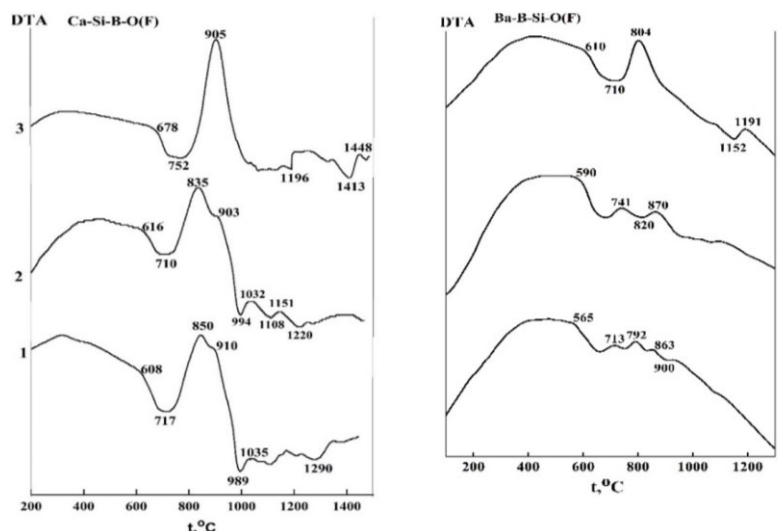


Рис. 2. Термограммы стекол по разрезу 0,8CaO/0,2CaF₂–40 мол. %; 0,8BaO/0,2BaF₂–30 мол. %; содержание SiO₂: 1 — 20; 2 — 40; 3 — 60 мол. %

Интенсивная стадия процесса кристаллизации кальцийсодержащих стекол с выраженным экзотермическим эффектом происходит в интервале 835–850 °С при содержании 20 мол. % SiO₂, связана с выделением метабората CaB₂(O, F)₄, и максимум экзотермического эффекта смещается в область высоких температур. При увеличении в стекле концентрации SiO₂ до 40 мол. % совместно с боратом выделяется боросиликат CaB₂Si₂(O, F)₈, каркас которого строится из тетраэдров SiO₄ и B(O, F)₄. Согласно диаграмме состояния исследованной системы, далее путь кристаллизации может продолжаться по прямой, показанной стрелкой на диаграмме (см. рис. 1). Увеличение в стекле SiO₂ до 60 мол. % приводит к появлению второго высокотемпературного экзотермического эффекта, относящегося к выделению фторсодержащего CaSi(O, F)₃. В барийсодержащей системе в области боратной составляющей на кривых ДТА проявляются два экзотермических максимума в области 741–870 °С, которые по результатам РФА связаны с выделением фторборатов бария BaV₄(O, F)₇, BaB₂(O, F)₄ и BaSi₂B₂(O, F)₈. Данные рентгенофазового анализа показывают также, что при кристаллизации стекол, расположенных в средней области стеклообразования, по изученному разрезу системы происходит совместное образование трехкомпонентных фторсодержащих боросиликатов щелочноземельных металлов (дамбурита и малеевита) со структурой Me[B₂Si₂(O, F)₈] (Me — Ca, Ba) (рис. 3).

Теплофизические свойства стекол зависят от состава стекла, влияния каждого компонента, их количества и координационных чисел, и поэтому температурные зависимости теплового расширения, стеклования (t_g) и размягчения от состава являются сложными функциями. Чем прочнее и направленнее химические связи в структуре стекла, тем ниже значение коэффициента расширения. С увеличением числа конечных связей и ионов с высоким координационным числом, которое уменьшается по мере увеличения степени связности пространственной сетки, стекла становятся более пластичными и значения линейного расширения увеличиваются. На рис. 4 представлена зависимость значений ТКЛР стекол исследованных систем от состава. Стекла характеризуются широким диапазоном изменения термического расширения и температуры стеклования ($\alpha = 65\text{--}115 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, $t_g = 550\text{--}760 \text{ °C}$).

Из кривых видно, что влияние обоих оксифторидов в бинарных системах аналогично и в целом значение ТКЛР увеличивается с введением модификаторов. Таким образом, можно отметить, что при введении оксифторидов и их дальнейшем увеличении связи между ионами в структуре стекла ослабевают, возникают конечные связи Si-O-Me, B-O-Me, B-F, Me-F, которые уменьшают степень пространственной

связанности каркаса. Близость значений длин связей Ca-O и Ba-O, монотонное увеличение ТКЛР при введении оксифторидов свидетельствуют о модифицирующей роли ионов Ca^{2+} и Ba^{2+} , что объясняет высокие значения коэффициента расширения ($>115 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) стекол. Структурные изменения, происходящие при введении фторидов, также отражаются на кривых температуры стеклования в зависимости от состава. В области трансформации ангармоничные колебания структурной сетки настолько велики, что упругие силы почти не действуют, и чем выше ТКЛР стекла, тем ниже температура стеклования [16–18].

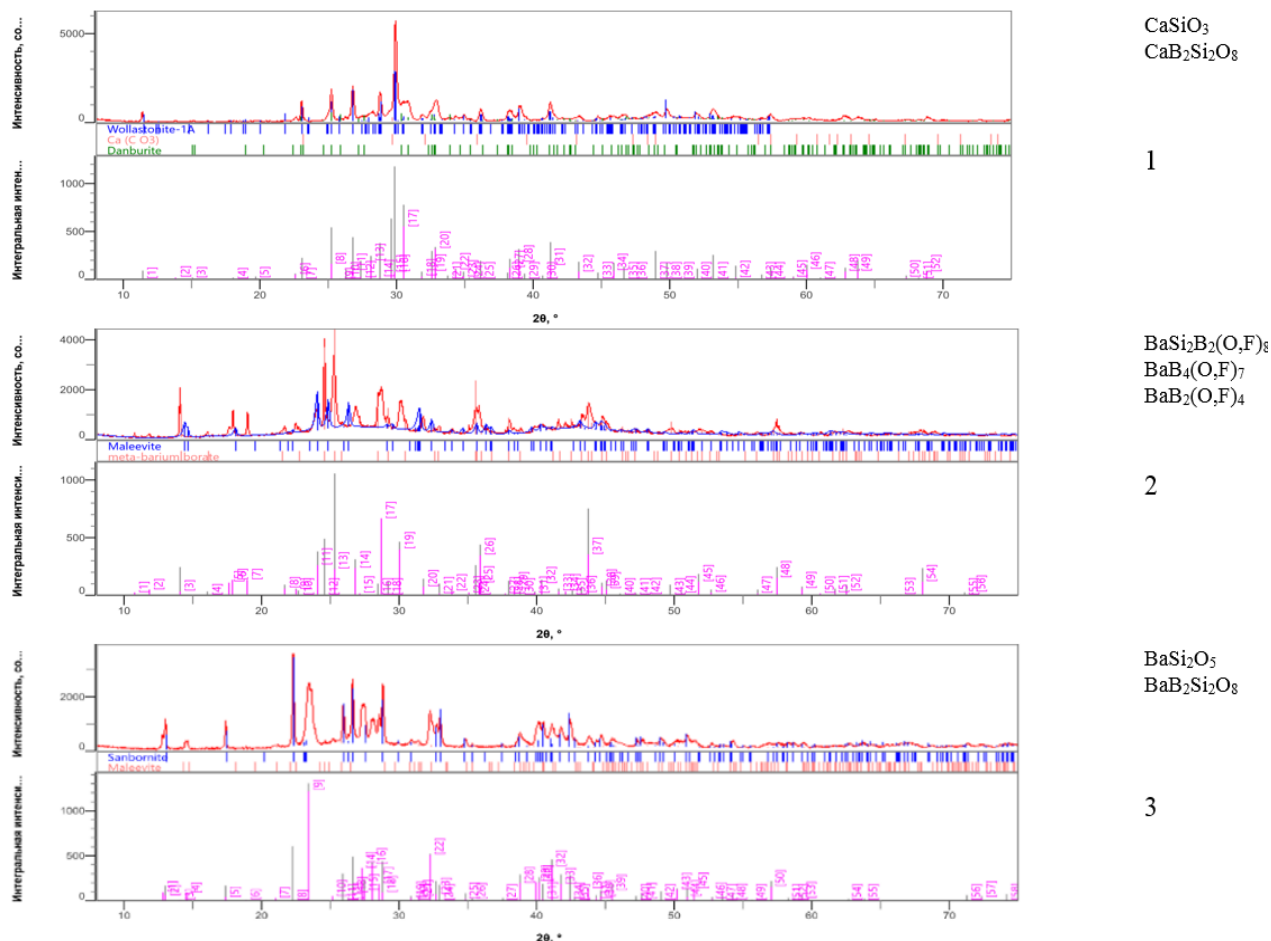


Рис. 3. Рентгенограммы закристаллизованных стекол по разрезу $0,8\text{CaO}/0,2\text{CaF}_2$ –40 мол%; $0,8\text{BaO}/0,2\text{BaF}_2$ –30 мол. %; содержание SiO_2 : 1 — 40; 2 — 20; 3 — 60 мол. %

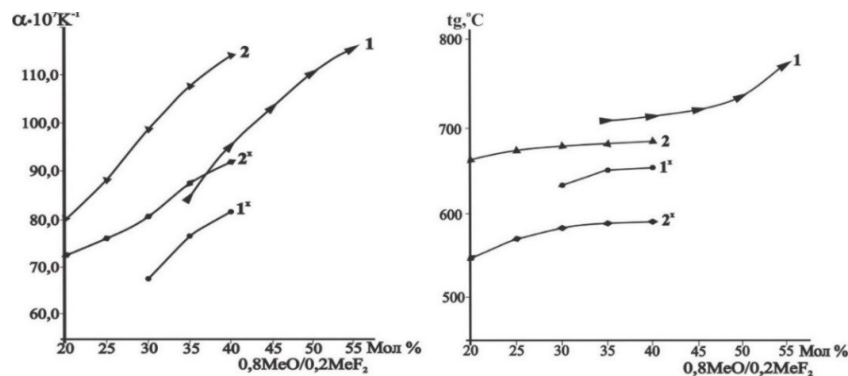


Рис. 4. Зависимость ТКЛР и t_g стекол псевдобинарных систем от содержания $0,8\text{MeO}/0,2\text{MeF}_2$ ($\text{Me} = \text{Ca}, \text{Ba}$): 1 — $0,8\text{CaO}/0,2\text{CaF}_2$ – SiO_2 ; 1* — $0,8\text{CaO}/0,2\text{CaF}_2$ – B_2O_3 ; 2 — $0,8\text{BaO}/0,2\text{BaF}_2$ – SiO_2 ; 2* — $0,8\text{BaO}/0,2\text{BaF}_2$ – B_2O_3

Новые синтезированные стекла на основе исследуемых систем активированы лантанидами, определены их люминесцентные свойства (рис. 5). На основе предыдущих работ и исследованных систем [19; 20], а также на основании полученных результатов можно заключить, что разработанные новые составы устойчивых и высокопрозрачных стекол могут служить матрицами для люминофоров, которые отличаются широкой областью отражения в видимой области спектра.

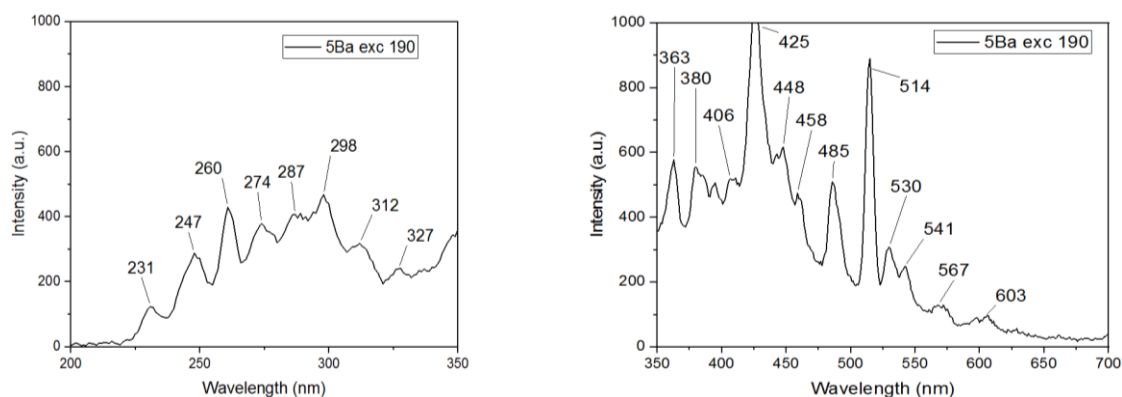


Рис. 5. Спектры люминесценции барийборосиликатного стекла, активированного Eu_2O_3

Список источников

- Shelby J. E. Introduction to Glass Science and Technology. Royal Society of Chemistry, 2005, 291.
- Varshneya A. K. Fundamentals of Inorganic Glasses. Academic Press, 2019. 570 p.
- Kim H. et al. Effect of CaF_2 , B_2O_3 and the CaO/SiO_2 mass ratio on the viscosity and structure of B_2O_3 -containing calcium-silicate-based melts // J. Am. Ceram. Soc. 2019, V. 102. P. 6575–6590.
- Bhattacharya A. et al. Effect of BaO on thermal and mechanical properties of alkaline earth borosilicate glasses with and without Al_2O_3 // Physica B: Physics of Condensed Matter. 2019. V. 571. P. 76–86.
- Xinfang Li et al. Crystallization behavior of $\text{BaO-CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ glass sealant and adjusting its thermal properties for oxygen transport membrane joining application // Journal of the European Ceramic Society. V. 43. P. 2541–2552.
- Левицкий И. А. Влияние двухвалентных катионов на процессы фазового разделения в боросиликатных стеклах // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2003. № 3. С. 111–116.
- Fletcher G., Glasser F. P. Phase relations in the system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // J. Mater. Sci. 28 [10] 2677–2686 (1991).
- Md Khairul Islam, Mark I. Pownceby, Michael Somerville, James Tardio, Nawshad Haque & Suresh Bhargava. Effect of B_2O_3 on the Liquidus Temperature and Phase Equilibria in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ Slag System, Relevant to the Smelting of E-waste // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. V. 8. P. 1590–1605.
- Мазурин О. В., Роскова Г. П. и др. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. Л.: Наука, 1991. 276 с.
- Kokh A. E., Kononova N. G., Bekker T. B., Kargin Yu. F., Furmanova N. G., Fedorov P. P., Kuznetsov S. V., Tkatchenko E. A. $\text{BaO-BaB}_2\text{O}_4$ phase diagram. // Russian J. Inorg. Chem. 2005. V. 50. P. 1749–1753.
- Yano T., Kunimine N., Shibata S., Yamane M. Structural investigation of sodium borate glasses and melts by Raman spectroscopy. III. Relation between the rearrangement of super-structures and the properties of glass // J. Non-Cryst. Solids. 2003. V. 321. P. 157–168.
- Yin Cheng, Hanning Xiao, Chen Shuguang, Bingzhong Tang — Structure and crystallization of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses // Physica B: Condensed Matter. 2009. Vol. 404, Issues 8–11. P. 1230–1234.
- Yeganyan J. R. Physico-Chemical properties and structural transformations in the synthesis of boroalumosilicate glass-crystal materials // Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 2021. № 1. P. 3–8.
- Еганян Дж. Р., Князян Н. Б. Теплофизические свойства стеклокристаллического материала в зависимости от относительного содержания фаз // Вестник НПУА. Химические и природоохранные технологии. 2020. № 1. С. 32–42.
- Неволина Л. А., Королева О. Н., Тюрнина Н. Г., Тюрнина З. Г. Исследование щелочноземельных боросиликатных стекол методом спектроскопии комбинационного рассеяния // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47, № 1. С. 29–36.
- Мазурин О. В., Стрельцина М. В., Швайко-Швайковская Т. П. Свойство стекол и стеклообразующих расплавов: Справочник. Л.: Наука, 1980. Т. 4, ч. 1. 443 с.
- Князян Н. Б. Неорганические оксифторидные стекла // Хим. ж. Армении. 2017. № 3–4. С. 40–67.
- Князян Н. Б. Влияние предкристаллизационного фазового разделения алюмосиликатных стекол на свойства прозрачной стеклокерамики // Труды Кольского научного центра. Серия: Химия и материаловедение. 2018. Ч. 2. С. 48–53.

19. Еганян Дж. Р., Кумкумаджян Е. В., Галоян К. К., Гаспарян Л. А., Манукян Г. Г., Князян Н. Б. Исследование процесса фазового разделения и разработка прозрачных ситаллов на основе фторсодержащих бороалумосиликатных систем // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 46–51.
20. Евстропьев С. К., Столярова В. Л., Князян Н. Б., Манукян Г. Г., А. В. Шашкин. Структурное конструирование Eu^{2+} -содержащих стекол и ситаллов на основе системы $\text{BaO-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-MgF}_2$ для светодиодной техники // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2023. Т. 512, № 1. С. 101–106.

References

1. Shelby J. E. Introduction to Glass Science and Technology. Royal Society of Chemistry, 2005, 291.
2. Varshneya A. K. *Fundamentals of Inorganic Glasses*. Academic Press, 2019, 570 p.
3. Kim H. et al. Effect of CaF_2 , B_2O_3 and the CaO/SiO_2 mass ratio on the viscosity and structure of B_2O_3 -containing calcium-silicate-based melts. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2019, Vol. 102, pp. 6575–6590.
4. Bhattacharya A. et al. Effect of BaO on thermal and mechanical properties of alkaline earth borosilicate glasses with and without Al_2O_3 . *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2019, Vol. 571, pp. 76–86.
5. Xinfang Li et al. Crystallization behavior of $\text{BaO-CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ glass sealant and adjusting its thermal properties for oxygen transport membrane joining application. *Journal of the European Ceramic Society*, V. 43, pp. 2541–2552.
6. Levitski I. A., Gailevich S. A. Vliyanie dvukhvalentnykh kationov na protsessy fazovogo razdeleniya v borosilikatnykh steklakh [Influence of divalent cations on the process of phase separation in borosilicate glasses]. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Sciences Series], 2003, No 3, pp. 111–116.
7. Fletcher G., Glasser F. P. Phase relations in the system $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *J. Mater. Sci.* 28[10]2677-2686(1991).
8. Md Khairul Islam, Mark I. Pownceby, Michael Somerville, James Tardio, Nawshad Haque & Suresh Bhargava. Effect of B_2O_3 on the Liquidus Temperature and Phase Equilibria in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ Slag System, Relevant to the Smelting of E-waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, Vol. 8, pp. 1590–1605.
9. Mazurin O. V., Roskova G. P., Averianov V. I., Antropova T. V. *Dvukhfaznye stekla: struktura, svoystva, primeneniye* [Two-phase glasses: structure, properties, applications]. Leningrad, Nauka, 1991, 276 p. (In Russ.).
10. Kokh A. E., Kononova N. G., Bekker T. B., Kargin Yu. F., Furmanova N. G., Fedorov P. P., Kuznetsov S. V., Tkatchenko E. A. $\text{BaO-BaB}_2\text{O}_4$ phase diagram. *Russian J. Inorg. Chem.*, 2005, Vol. 50, pp. 1749–1753.
11. Yano T., Kunimine N., Shibata S., Yamane M. Structural investigation of sodium borate glasses and melts by Raman spectroscopy. III. Relation between the rearrangement of super-structures and the properties of glass. *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, Vol 321, pp. 157–168.
12. Yin Cheng, Hanning Xiao, Chen Shuguang, Bingzhong Tang—Structure and crystallization of $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses. *Physica B: Condensed Matter*, 2009, vol. 404, issues 8–11, pp. 1230–1234.
13. Yeganyan J. R. Physico-Chemical properties and structural transformations in the synthesis of boroalumosilicate glass-crystal materials. *J. of Chemistry and Chemical Engineering*, 2021, no. 1, pp. 3–8.
14. Eganjan Dzh. P., Knjazjan N. B., Teplofizicheskie svoystva steklokristallicheskogo materiala v zavisimosti ot otositel'nogo soderzhaniya faz [Thermophysical properties of glass crystalline material depending on the relative content of phases]. *Vestnik NPUA. Himicheskie i prirodoohrannyye tehnologii* [Proceedings of state engineering university of Armenia, series Chemical and Environmental Technologies], 2020, no. 1, pp. 32–42. (In Russ.).
15. Nevolina L. A., Koroleva O. N., Tyurnina N. G., Tyurnina Z. G. Issledovaniye shchelochnozemelnykh borosilikatnykh stekol metodom spektroskopii kombinatsionnogo rasseyaniya [Study of alkaline earth borosilicate glasses by Raman spectroscopy]. *Fizika i khimiya stekla*, 2021, vol. 47, no. 1, pp. 29–36.
16. Mazurin O. V., Streltsina M. V. Shvayko-Shvaykovskaya T. P. *Svoystvo stekol i stekloobrazuyushchikh rasplavov* [Properties of glasses and glass-forming melts]. Leningrad, Nauka, 1980, vol. 4, ch. 1, 443 p. (In Russ.).
17. Knyazyan N. B. Neorganicheskiye oksifloridnyye stekla [Inorganic oxyfluoride glasses]. *Khim. zh. Armenii*. 2017, no. 3–4, pp. 40–67.
18. Knyazyan N. B. Vliyanie predkristallizatsionnogo fazovogo razdeleniya alyumosilikatnykh stekol na svoystva prozrachnoy steklokeramiki. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra. Seriya: Khimiya i materialovedeniye* [Proceedings of the Kola Science Center. Series: Chemistry and Materials Science], 2018, Part 2, pp. 48–53. (In Russ.).
19. Eganjan Dzh. R., Kumkumadzhyan E. V., Galoyan K. K., Gasparyan L. A., Manukyan G. G., Knyazyan N. B. Issledovaniye protsessy fazovogo razdeleniya i razrabotka prozrachnykh sitallov na osnove ftorsoderzhashchikh boroalumosilikatnykh sistem [Study of the phase separation process and development of transparent glass ceramics based on fluorine-containing boron-aluminosilicate systems]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki* [Proceedings of the Kola Science Center. Series: Chemistry and Materials Science], 2023, Vol. 14, No 1, pp. 46–51. (In Russ.).

20. Evstropyev S. K., Stolyarova V. L., Knyazyan N. B., Manukyan G. G., Shashkin A. V. Strukturnoye konstruirovaniye Eu^{2+} -soderzhashchikh stekol i sitallov na osnove sistemy $\text{BaO-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-MgF}_2$ dlya svetodiodnoy tekhniki [Structural design of Eu^{2+} -containing glass and glass-ceramics based on the system $\text{BaO-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-MgF}_2$ for led applications]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Science], 2023, Vol. 512, No 1, pp. 101–106. (In Russ.).

Информация об авторах

Дж. Р. Еганян — соискатель;
М. Р. Оганесян — соискатель;
Н. В. Яценко — аспирант, младший научный сотрудник;
Т. В. Григорян — старший научный сотрудник;
В. П. Тороян — научный сотрудник;
Е. В. Кумкумаджян — старший научный сотрудник;
К. К. Галоян — научный сотрудник;
Л. А. Гаспарян — старший научный сотрудник;
Г. Г. Манукян — ученый секретарь;
Н. Б. Князян — доктор технических наук, заведующий лабораторией.

Information about the authors

J. R. Yeganyan — Doctoral Candidate;
M. R. Hovhannisyan — Doctoral Candidate;
N. V. Iashchenko — Postgraduate Student, Research Assistant;
T. V. Grigoryan — Senior Researcher;
V. P. Toroyan — Researcher;
E. V. Kumkumajyan — Senior Researcher;
K. K. Galoyan — Researcher;
L. A. Gasparian — Senior Researcher;
G. G. Manukyan — Academic Secretary;
N. B. Knyazyan — DSc (Engineering), Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.
The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 22.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.