

Научная статья
УДК 541.35
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.006

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ БЛИЖНЕГО ПОРЯДКА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКОЛ $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100-2x)\text{B}_2\text{O}_3$

Н. М. Барабанов¹, Н. Г. Тюрнина², З. Г. Тюрнина³, А. В. Поволоцкий⁴, И. Г. Полякова⁵

^{1,4}Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии, Санкт-Петербург, Россия

^{2,3,5}Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), Санкт-Петербург, Россия

¹barabanovnikita14@gmail.com

²turnina.ng@iscras.ru

³turnina.zg@iscras.ru

⁴alexey.povolotskiy@spbu.ru

⁵ira_pp@list.ru

Аннотация

При помощи ИК-спектроскопии проведены исследования структуры ближнего порядка стёкол одного из разрезов системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3$. Определены значения доли тетраэдрического бора и её зависимость от состава. Показана корреляция между базовыми структурными единицами и температурой стеклования.

Ключевые слова:

стёкла, бор, базовые структурные группировки, ближний порядок, температура стеклования

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания на НИР ИХС РАН (№ 1023032900385-8-1.4.3), субсидия Минобрнауки РФ.

Финансирование:

государственное задание на НИР ИХС РАН (№ 1023032900385-8-1.4.3), субсидия Минобрнауки РФ.

Для цитирования:

Связь структуры ближнего порядка и физико-химических свойств стёкол $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100-2x)\text{B}_2\text{O}_3$ / Н. М. Барабанов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 42–49. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.006.

Original article

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE OF THE SHORT-RANGE ORDER AND THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF GLASSES $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100-2x)\text{B}_2\text{O}_3$

**N. M. Barabanov¹, N. G. Tyurnina², Z. G. Tyurnina², A. V. Povolotskiy⁴,
I. G. Polyakova⁵**

^{1,4}Saint-Petersburg State University, Institute of Chemistry, Saint Petersburg, Russia

^{2,3,5}I. V. Grebenshchikov Institute of Chemistry of Silicates of RAS (ICS RAS), Saint Petersburg, Russia

¹barabanovnikita14@gmail.com

²turnina.ng@iscras.ru

³turnina.zg@iscras.ru

⁴alexey.povolotskiy@spbu.ru

⁵ira_pp@list.ru

Abstract

Using IR spectroscopy, studies of the structure of the near-order glasses of one of the sections of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3$ system were carried out. The values of the tetrahedral boron fraction and its dependence on the composition are determined. The correlation between the basic structural units and the glass transition temperature is shown.

Keywords:

glasses, boron, basic structural groupings, short-range order, glass transition temperature

Acknowledgments:

the work was performed within the framework of the state assignment for research and Development of the ICS RAS (No. 1023032900385-8-1.4.3), subsidized by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Funding:

state assignment for research and Development of the ICS RAS (No. 1023032900385-8-1.4.3), a subsidy from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation:

The relationship between the structure of the short-range order and the physico-chemical properties of glasses $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100-2x)\text{B}_2\text{O}_3$ / N. M. Barabanov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 42–49. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.006.

Введение

Боратные стёкла обладают рядом незаменимых в технологических областях свойств. Так, известно, что боратное стекло является одним из наилучших поглотителей всех типов нейтронов (тепловых, медленных и быстрых), что обусловлено высоким природным содержанием изотопа B^{10} [1, 2]. Кроме того, такие стёкла отличаются высокой рентгенопрозрачностью, а также имеют перспективы применения в качестве оптических фильтров и оптоволокон [3, 4]. Важным качеством бинарных щёлочно-боратных стекол является широкий интервал стеклования с редкоземельными оксидами, что делает их удобной матрицей для создания ряда твердофазных люминофоров и сцинтилляторов. Кроме того, боратные, по сравнению с боросиликатными стеклами, характеризуются существенно меньшими температурами тепловой обработки, что делает их перспективной заменой существующим матрицам для остекловывания радиоактивных отходов. Однако малая химическая и термическая устойчивость стеклообразного борного ангидрида и бинарных стекол на его основе ограничивает возможности их применения в технологии.

Существующая модель боратных стекол подразумевает, что исходная структура стеклообразного борного ангидрида составлена из плоских треугольников BO_3^0 , которые объединяются в трёхчленные циклы — борксольные кольца. Введение в его состав оксидов щелочных и щелочноземельных металлов приводит к трансформации треугольников борксольных колец в тетраэдры бора BO_4^- , обладающие эффективным зарядом группировки, равным -1 . Формирование тетраэдров бора позволяет боратной сетке развиваться в трёх направлениях пространства, что приводит к росту температуры стеклования (T_g) и снижению коэффициента термического линейного расширения (ТКЛР) [5–7]. При этом известно, что существование трёх тетраэдров в пределах одного кольца невозможно, и поэтому начиная с определённой концентрации щелочного или щелочноземельного оксида вместо тетраэдров формируются треугольники с немостиковыми атомами кислорода, что приводит к обратным тенденциям для T_g и ТКЛР. Такая нелинейная зависимость свойств боратного стекла от содержания оксидов модификаторов названа борной аномалией. Между структурой ближнего порядка боратного стекла и его свойствами существует зависимость, которую обычно выражают через долю четырёхкоординированного бора (N_4) [8]. Этот параметр не является исчерпывающим для объяснения свойств боратного стекла, однако экспериментально определяем и удобен для количественного анализа.

Разработка перспективных составов боратных стекол требует понимания корреляции между их структурой, составом и свойствами. Бинарные щелочные и щелочноземельные боратные стёкла исследованы подробно, в то время как данных о более сложных тройных системах имеется крайне ограниченное количество. В связи с чем в настоящей работе по данным ИК-спектроскопии были определены тенденции в изменениях структуры и установлена зависимость доли N_4 от состава стекол одного из разрезов тройной системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3$, а также показана связь между структурой исследованных стекол и их физико-химическими характеристиками.

Экспериментальная часть

Боратные стекла синтезировали из разреза концентрационного треугольника, содержащего равные количества щелочного и щелочноземельного оксида с общей формулой $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100 - 2x)\text{B}_2\text{O}_3$. Составы полученных образцов представлены в таблице. Для синтеза шихту, состоящую из Na_2CO_3 (ч. д. а.), BaCO_3 (ч. д. а.) и H_3BO_3 (ч. д. а.) и предварительно перемешанную, нагревали в платиновом тигле до температуры 1200°C и выдерживали в течение 2 ч с дальнейшей отливкой на стальную изложницу и последующим отжигом при 450°C для фиксации низкотемпературной равновесной структуры.

Составы исследованных образцов

Номер образца	Содержание оксида, мол. %		
	Na ₂ O	BaO	B ₂ O ₃
1	7,5	7,5	85,0
2	10,0	10,0	80,0
3	12,5	12,5	75,0
4	16,67	16,67	66,7
5	20,0	20,0	60,0

(ДТА), который проводили на дериватографе Q-1500 в температурном интервале 20–1000 °С со скоростью 10 °С /мин.

Результаты и обсуждение

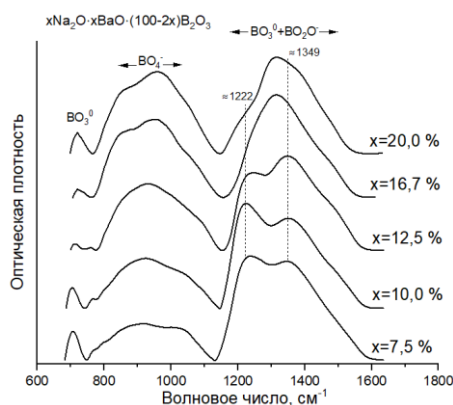


Рис. 1. ИК-спектры стёкол $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100 - 2x)\text{B}_2\text{O}_3$

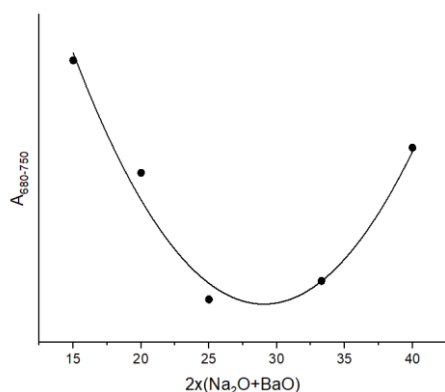


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности спектрального интервала 680–750 см⁻¹ от суммарного содержания оксидов бария и натрия в составе исследованных стёкол. Соотношение Na₂O/BaO равно 1

Для идентификации структурных изменений в стёклах использовали метод нарушенного полного внутреннего отражения ИК-спектроскопии (НПВО). Исследования проводили на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 8700 (Thermo Scientific) в диапазоне волновых чисел 600–1800 см⁻¹. Измерение ИК-спектров проводилось в ресурсном центре «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка СПбГУ.

Температуру стеклования T_g определяли при помощи дифференциального термического анализа

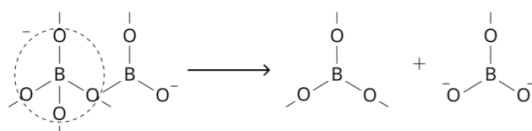
ИК-спектры исследованных стёкол представлены на рис. 1. Спектры имеют вид, типичный для боратных стёкол, и разделяются на три характеристичных области. Низкочастотная малоинтенсивная область в интервале 680–780 см⁻¹ отвечает за деформационные колебания В-О-В в симметричных треугольниках BO_3^0 [9–11] и присутствует в спектре чистого стеклообразного борного ангидрида.

Область средних частот в диапазоне 750–1150 см⁻¹ отсутствует в спектре чистого стеклообразного борного ангидрида и отражает валентные колебания В-О в тетраэдрических группировках бора BO_4^- [12–13]. Поскольку в данном спектральном интервале отсутствуют полосы, ответственные за колебания тригональных группировок бора, её можно рассматривать как характеристику структурных преобразований боратного стекла.

Высокочастотный интервал 1150–1630 см⁻¹ включает в себя полосы валентных колебаний как симметричных треугольников BO_3^0 , так и асимметричных с различным числом немостиковых атомов кислорода, в частности мета- BOO_2^- и пироборатных BOO_2^{2-} [14].

Анализ полученных спектров следует начать с низкочастотной области, где наблюдается асимметричная полоса, интегральная интенсивность которой нелинейно изменяется с ростом содержания оксидов натрия и бария в составе стёкол. Наличие данной полосы в спектре чистого стеклообразного борного ангидрида позволяет рассматривать её как свидетельство присутствия симметричных треугольников бора в структуре боросодержащих колец. При изменении содержания x от 7,5 до 12,5 мол. % интегральная интенсивность данной полосы уменьшается (рис. 2). Это можно объяснить тем фактом, что в области исследованных составов наблюдается активная

трансформация симметричных треугольников бора BO_3^0 в борксольных кольцах в тетраэдры бора BO_4^- с формированием надструктурных группировок, таких как три- и пентаборатные с одним тетраэдром бора в составе, и ди- и ди-триборатные с двумя, то есть доля исходных борксольных колец уменьшается, что приводит к снижению интегральной интенсивности низкочастотной полосы. Однако в интервале x от 12,5 до 20 мол. % интегральная интенсивность этой области начинает расти, что свидетельствует о повторном формировании симметричных треугольников в структуре стекла в высокощелочной области. Это явление объясняется с точки зрения распределения надструктурных и базовых группировок в стёклах состава $16,67\text{Na}_2\text{O} \cdot 16,67\text{BaO} \cdot 66,7\text{B}_2\text{O}_3$ и $20\text{Na}_2\text{O} \cdot 20\text{BaO} \cdot 60\text{B}_2\text{O}_3$. В этих стёклах, помимо нарастания содержания тетраэдрических группировок бора, наблюдается и обратный процесс их разрушения с образованием метаборатных BOO_2^- и пироборатных $\text{B}_2\text{O}_7^{2-}$ треугольников. Формирование метаборатного треугольника в надструктурной группировке, содержащей тетраэдр бора, может приводить к активации механизма диспропорционирования такой группировки на симметричный треугольник структуры борксольного кольца и пироборатный треугольник с двумя немостиковыми атомами кислорода. Наличие пироборатных треугольников для названных составов фиксируется в спектрах комбинационного рассеяния, не вошедших в представленную работу:



Среднечастотная область, ответственная за колебания связей в тетраэдрах бора, содержит в себе, по данным [15], значительное количество отдельных полос, характеризующих колебания связей В-О в тетраэдрах, находящихся в разных надструктурных группировках. При этом анализ распределения надструктурных группировок в боратном стекле по данным ИК-спектроскопии затруднён, поэтому в настоящей работе анализировалось только изменение интегральной интенсивности среднечастотной области по мере роста содержания оксидов бария и натрия.

Отмечается, что при переходе от $x = 7,5$ к $x = 20$ мол. % интегральная интенсивность спектрального интервала $750\text{--}1150\text{ см}^{-1}$ возрастает. Это характеризует усиление механизма трансформации симметричных треугольников бора в тетраэдры бора с ростом содержания оксидов бария и натрия для стёкол вплоть до состава $20\text{Na}_2\text{O} \cdot 20\text{BaO} \cdot 60\text{B}_2\text{O}_3$, для которого рост интегральной интенсивности области средних частот всё ещё наблюдается, но уже замедлен. Это связано с пограничным характером данного состава, при котором параллельно протекает обратный процесс деструкции тетраэдров бора и формирование группировок с немостиковыми атомами кислорода.

Высокочастотная область спектра характеризуется интенсивной асимметричной полосой, в интервале x от 7,5 до 12,5 мол. % разделяющейся на два визуально фиксируемых плеча, при этом низкочастотное плечо с максимум около 1220 см^{-1} сначала растёт, затем исчезает для составов с $x > 12,5$ мол. %, что позволяет считать его связанным с борксольными кольцами, доля которых постепенно уменьшается до нуля для составов с наибольшим значением x . Имеющиеся данные [16] подтверждают связь этой полосы со структурой чистого стеклообразного борного ангидрида. Асимметрия же плеча и его рост от состава с $x = 7,5$ мол. % к составу с $x = 10$ мол. % указывает на вклад в общую интенсивность полосы, отвечающей колебаниям мостиковой связи В-О-В между борксольным кольцом и надструктурной группировкой, содержащей тетраэдр бора. В интервале составов от $x = 7,5$ мол. % к $x = 10$ мол. %, по-видимому, решающий вклад в интенсивность этого плеча вносит наблюдаемый ранее рост доли тетраэдров бора, которому противопоставляется снижение доли симметричных треугольников бора в борксольных кольцах. Дальнейшая же деградация данного плеча обусловлена практически полным исчезновением борксольных колец в составах с меньшим содержанием борного ангидрида.

Высокочастотное плечо с максимум около 1349 см^{-1} относится к валентным колебаниям метаборатных треугольников с одним немостиковым атомом кислорода [17]. Для составов

с $x > 12,5$ мол. % высокочастотное плечо становится доминирующим. Это указывает, как уже было сказано ранее, на активацию постепенного процесса разрушения тетраэдрических группировок с формированием мета- и пироборатных треугольников. На формирование треугольников с двумя немостиковыми атомами кислорода указывает и наблюдаемое усиление асимметрии высокочастотной полосы для состава с $x = 20$ мол. %.

Для расчёта доли тетраэдрического бора в структуре стёкол по данным ИК-спектроскопии необходимо определить отношение суммарной интегральной интенсивности спектрального интервала тетраэдрического и тригонального бора A_r :

$$A_r = \frac{A_4}{A_3}, \quad (1)$$

где A_4 отражает интегральную интенсивность интервала $750\text{--}1150\text{ см}^{-1}$, A_3 — сумму интегральных интенсивностей низко- и высокочастотной областей.

Доля N4 далее рассчитывается согласно выражению

$$N4 = \frac{A_r}{A_r + \alpha}, \quad (2)$$

где α — коэффициент пропорциональности, был введён для спектроскопии комбинационного рассеяния света, как параметр, позволяющий учесть различное сечение рассеяния боратных группировок и сопоставить результаты расчётов с прямыми результатами измерений в методе ЯМР.

По данным [18], для бинарной системы $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ он составляет 1,1, для системы $\text{BaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ — 1,3. Из-за отсутствия значений данного коэффициента для тройных систем в представленной работе он был принят равным 1,2 — как среднее между бинарными системами. Теоретическое изменение доли N4 описывается выражением

$$N4 = \frac{2x}{1 - 2x} \quad (3)$$

и не учитывает фактора деструкции тетраэдров с образованием мета- и пироборатных треугольников.

Результаты расчётов доли N4 и график её зависимость от состава представлены на рис. 3а и сопоставлены с теоретическими величинами, рассчитанными по уравнению (3). Здесь же (рис. 3б) отражена зависимость T_g от состава.

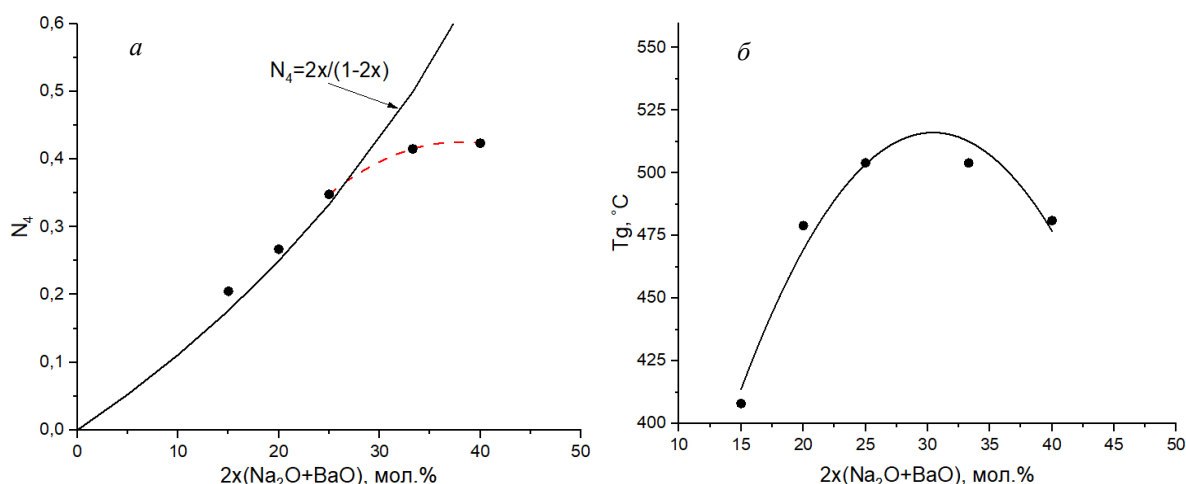


Рис. 3. Зависимость экспериментально рассчитанной и определённой теоретически доли N4 от суммарного содержания оксидов бария и натрия в составе (а); зависимость T_g от суммарного содержания оксидов бария и натрия в составе (б). Соотношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{BaO}$ равно 1

Согласно данным рис. 3а, видно, что полученные экспериментальные величины близки, но несколько отклоняются в большую сторону от рассчитанных по уравнению (3) в области линейной зависимости N4 от состава. Это может быть связано как с несколько разной степенью конвертации симметричных треугольников в тетраэдры для катионов Na^+ и Ba^{2+} , так и с произвольным выбором коэффициента α в уравнении (2). Тем не менее выбор значения этого коэффициента как среднего между бинарными системами можно считать правомерным вследствие близости экспериментальных значений к теоретической кривой. Положение экспериментальных точек и область отклонения от линейности коррелирует с данными литературы для бинарных систем. Корреляция между значениями T_g (см. рис. 3б) и N4 наиболее ярко проявляется для образцов с $x \leq 12,5$ мол. %, то есть для образцов, в которых доля мета- и пироборатных треугольников ещё мала. Далее, несмотря на продолжающийся, хотя и замедленный рост доли N4 для стёкол с $x > 12,5$ мол. %, величина T_g уменьшается. Это связано с наблюдаемым ранее в литературе доминирующим влиянием фактора формирования треугольников с немостиковыми атомами кислорода на изменение температуры стеклования и ТКЛР.

Выводы

Исследована структура ближнего порядка боратных стёкол серии $x\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{BaO} \cdot (100-2x)\text{B}_2\text{O}_3$. Установлено, что с ростом содержания оксидов бария и натрия симметричные треугольники бора трансформируются в тетраэдры. При этом в интервале x от 12,5 до 20 мол. % наблюдается повторное формирование симметричных треугольников, связанное с диспропорционированием тетраэдрических надструктурных группировок, сопровождаемое появлением в структуре пироборатных треугольников. Рассчитана доля N4 для исследованных составов, которая лежит в интервале $0,2 \leq x \leq 0,42$. Показано, что изменения в значениях T_g хорошо описываются зависимостью N4 от содержания оксида натрия и бария в линейной области графика, после чего корреляция нарушается вследствие формирования мета- и пироборатных треугольников, оказывающих на эту характеристику большее влияние, чем содержание тетраэдров бора.

Список источников

1. Barium-borate-flyash glasses: As radiation shielding materials / S. Sukhpal [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms. 2008. Vol. 266 (1). P. 140–146.
2. Saeed A. Elastic, transparent, and thermally stable borate glass reinforced by barium as an efficient gamma ray attenuator // Materials Today Communications. 2024. Vol. 38. P. 108361.
3. Development of Optical Material Based on Glass Doped Rare Earth for Photonic Devices / M. Djamel [et al.] // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 43 (3). P. 2531–2537.
4. Sallam O. I., Abdel-Galil A., Moussa N. L. Tuning of smart cobalt doped borate glasses by electron beam as band-pass filters // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 162. P. 108361.
5. Structural investigation of sodium borate glasses and melts by Raman spectroscopy. III. Relation between the rearrangement of super-structures and the properties of glass / T. Yano [et al.] // J. Non-Cryst. Solids. 2003. Vol. 321. P. 157–168.
6. Yiannopoulos Y. D., Chryssikos G. D., Kamitsos E. I. Structure and properties of alkaline earth borate glasses // Phys. Chem. Glasses. 2001. Vol. 42 (3). P. 164–72.
7. Kamitsos E. I., Karakassides M. A., Chryssikos G. D. Vibrational spectra of magnesium-sodium-borate glasses. 2. Raman and mid-infrared investigation of the network structure. // J. Phys. Chem. 1987. Vol. 91 (5). P. 1073–1079.
8. Aguiar P., Ongio G., Affatigato M. Alkali Dependence of Tetrahedral Boron in Alkali Borate Glasses. // Physics and Chemistry of Glasses: European Journal of Glass Science and Technology Part B. 2006. Vol. 47. P. 393–396.
9. Doweidar H., el Damrawi G., Agammy E. F. Structural correlations in $\text{BaO-PbO-B}_2\text{O}_3$ glasses as inferred from FTIR spectra // Vibrational Spectroscopy. 2014. Vol. 73. P. 90–96.

10. Kamitsos E. I., Chrysikos G. D. Borate glass structure by Raman and infrared spectroscopies // *J. Molecular Structure*. 1991. Vol. 247. P. 1–16.
11. Infrared Reflectance Spectra of Lithium Borate Glasses / E. I. Kamitos [et al.] // *J. Non-Crystalline Solids*. 1990. Vol. 126 (1–2). P. 52–67.
12. Kamitsos E. I. Infrared Studies of Borate Glasses // *Physics and Chemistry of Glasses*. 2003. Vol. 44 (2). P. 79.
13. Stoch L., Sroda M. Infrared Spectroscopy in the Investigation of Oxide Glasses Structure // *J. Molecular Structure*. 1999. Vol. 511–512. P. 77–84.
14. Gautam C., Yadav A. K., Singh A. K. A Review on Infrared Spectroscopy of Borate Glasses with Effects of Different Additives // *ISRN Ceramics*. 2012. P. 1–17.
15. Short-range structure, the role of bismuth and property-structure correlations in bismuth borate glasses / C. P. E. Varsamis [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021. Vol. 23.
16. El-Ghany S., Nabhan E., Saudi H. A. Effect of gamma ray on some properties of bismuth borate glasses containing different transition metals // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2.
17. IR analysis of borate glasses containing three alkali oxides / G. Balachander [et al.] // *Science Asia*. 2013. Vol. 39. P. 278.
18. Transition and post-transition metal ions in borate glasses: Borate ligand speciation, cluster formation, and their effect on glass transition and mechanical properties / D. Möncke [et al.] // *J. Chemical Physics*. 2016. Vol. 145.

References

1. Sukhpal S., Ashok K., Kulwant T., Gurmel M. Barium-borate-flyash glasses: As radiation shielding materials. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008. Vol. 266, No. 1, pp. 140–146.
2. Saeed A. Elastic, transparent, and thermally stable borate glass reinforced by barium as an efficient gamma ray attenuator. *Materials Today Communications*, 2024, Vol. 38, pp. 108361.
3. Djamal M., Yuliantini L., Hidayat R., Boonin K., Yasaka P., Kaewkhao J. Development of Optical Material Based on Glass Doped Rare Earth for Photonic Devices. *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 43, No. 3, pp. 2531–2537.
4. Sallam O. I., Abdel-Galil A., Moussa N. L. Tuning of smart cobalt doped borate glasses by electron beam as band-pass filters. *Optics & Laser Technology*, 2023, Vol. 162, pp. 108361.
5. 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. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, Vol. 321, pp. 157–168.
6. Yiannopoulos Y. D., Chrysikos G. D., Kamitsos E. I. Structure and properties of alkaline earth borate glasses. *Physics and Chemistry of Glasses*, 2001, Vol. 42, No. 3, pp. 164–72.
7. Kamitsos E. I., Karakassides M. A., Chrysikos G. D. Vibrational spectra of magnesium-sodium-borate glasses. 2. Raman and mid-infrared investigation of the network structure. *The Journal of Physical Chemistry*, 1987, Vol. 91, No. 5, pp. 1073–1079.
8. Aguiar P., Ongio G., Affatigato M. Alkali Dependence of Tetrahedral Boron in Alkali Borate Glasses. *Physics and Chemistry of Glasses — European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 2006, Vol. 47, pp. 393–396.
9. Doweidar H., el Damrawi G., Agammy E. F. Structural correlations in BaO-PbO-B₂O₃ glasses as inferred from FTIR spectra. *Vibrational Spectroscopy*, 2014. Vol. 73, pp. 90–96.
10. Kamitsos E. I., Chrysikos G. D. Borate glass structure by Raman and infrared spectroscopies. *Journal of Molecular Structure*, 1991, Vol. 247, pp. 1–16.
11. Kamitos E. I., Patris A. P., Karakassides M. A., Chrysikos J. D. Infrared Reflectance Spectra of Lithium Borate Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1990, Vol. 126, No. 1–2, pp. 52–67.
12. Kamitsos E. I. Infrared Studies of Borate Glasses. *Physics and Chemistry of Glasses*, 2003, Vol. 44, No. 2, pp. 79.

13. Stoch L., Sroda M. Infrared Spectroscopy in the Investigation of Oxide Glasses Structure. *Journal of Molecular Structure*, 1999, Vol. 511–512, pp. 77–84.
14. Gautam C., Yadav A. K., Singh A. K. A Review on Infrared Spectroscopy of Borate Glasses with Effects of Different Additives. *ISRN Ceramics*, 2012, pp. 1–17.
15. Varsamis C. P. E., Makris N., Valvi C., Kamitsos E. I. Short-range structure, the role of bismuth and property-structure correlations in bismuth borate glasses. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, Vol. 23.
16. El-Ghany S., Nabhan E., Saudi H. A. Effect of gamma ray on some properties of bismuth borate glasses containing different transition metals. *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2.
17. Balachander G., Shareefuddin L., Sayanna R., Venudhar Y. C. IR analysis of borate glasses containing three alkali oxides. *Science Asia*, 2013, Vol. 39, pp. 278.
18. Möncke D., Kamitsos E., Palles D., Limbach R., Winterstein-Beckmann A., Honma T., Yao Z. Y., Rouxel T., Wondraczek L. Transition and post-transition metal ions in borate glasses: Borate ligand speciation, cluster formation, and their effect on glass transition and mechanical properties. *The Journal of Chemical Physics*, 2016, Vol. 145.

Информация об авторах

Никита Максимович Барабанов — магистрант;

Наталья Геральдовна Тюрнина — кандидат химических наук;

Зоя Геральдовна Тюрнина — кандидат химических наук;

Алексей Валерьевич Поволоцкий — доктор физико-математических наук, профессор.

Ирина Георгиевна Полякова — старший научный сотрудник.

Information about the authors

Nikita M. Barabanov — Master's Degree Student;

Natalia G. Tyurnina — PhD (Chemistry);

Zoya G. Tyurnina — PhD (Chemistry);

Alexey V. Povolotskiy — Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor;

Irina G. Polyakova — Researcher.

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.